

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**“GUÍA PARA EL USO DEL MÉTODO DE DISEÑO DE  
ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS NUEVOS SEGÚN  
MÉTODO AASHTO 2002”**

PRESENTADO POR

**Jorge Alexander Figueroa Gómez**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE DEL 2005

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTORA :

**DRA. MARÍA ISABEL RODRÍGUEZ**

SECRETARIA GENERAL:

**LICDA. ALICIA MARGARITA RIVAS DE RECINOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

SECRETARIO :

**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

DIRECTOR :

**ING. LUIS RODOLFO NOSIGLIA DURÁN**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:  
**INGENIERO CIVIL**

Título :

**“GUÍA PARA EL USO DEL MÉTODO DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE  
PAVIMENTOS NUEVOS SEGÚN MÉTODO AASHTO 2002”**

Presentado por :

**Jorge Alexander Figueroa Gómez**

Trabajo de Graduación aprobado por :

Docentes Directores :

Ing. Mauricio Ernesto Valencia

Ing. Edgar Alfredo Gavidia Paredes

Ing. Carlos Antonio Quintanilla Rodríguez

San Salvador, Diciembre del 2005

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores:

Ing. Mauricio Ernesto Valencia

Ing. Edgar Alfredo Gavidia Paredes

Ing. Carlos Antonio Quintanilla Rodríguez



## **AGRADECIMIENTOS**

**A Dios Todopoderoso** por todos esos momentos felices, tristes y de desesperación en los cuales nunca me dejaste solo a lo largo de mi vida. Gracias a tu gran amor y misericordia, me has permitido ser lo que soy en estos momentos. Gracias por la fortaleza que me has brindado hasta hoy y por el anhelo de tratar de ser un hombre de bien.

**A mis padres** por haberme otorgado toda su paciencia y amor, por respaldarme en todo momento, por estar conmigo en las buenas y en las malas. Gracias por todo y por haberme permitido ser lo que soy ahora con sus consejos y apoyo en todo momento, los amo mucho y esto es el fruto de sus esfuerzos, se los dedico de todo corazón.

**A mi hermana** por estar conmigo en todo momento, por apoyarme en el proceso de mi vida, por haber compartido un poco de su tiempo en el proceso de este trabajo de tesis. Por todo esto y más, Gracias.

**A toda mi familia** que confió en mí en todo momento. Gracias a mis tíos en Australia por estar pendientes de mí y por apoyarme desde lejos. A mi tía que se encuentra en el país por apoyarme y creer en mí. A mi familia en general que confió en mí. A todos ustedes, muchas gracias.

**A la Familia Alvarez** por haberme apoyado en los momentos más difíciles en el proceso de este trabajo, les estaré eternamente agradecido. Muchas gracias por su ayuda desinteresada y que Dios los bendiga siempre. Gracias.

**A mis amigos y conocidos** por haber creído en mí y por apoyarme en los momentos más difíciles en el proceso de este trabajo de tesis. Parte de este

trabajo esta hecho con sus consejos y ayuda desinteresada, buena onda por todo. Gracias por aquellas personas que me ayudaron con información técnica, consejos y apoyo en todo momento. Gracias por brindarme apoyo en especial a Susana, Héctor, Alba y Eva por brindar parte de su tiempo en la elaboración de este trabajo. Me apoyaron mucho de varias formas y les estoy eternamente agradecido. Gracias.

**A Ing. Carlos Quintanilla** por su tiempo, paciencia y dedicación para el desarrollo de este trabajo de tesis. Gracias por compartir parte de su tiempo, su conocimiento y tener confianza en mí para la realización de este trabajo.

**A Ing. Mauricio Valencia** por su tiempo y dedicación en este trabajo de graduación. Por la confianza brindada y por el apoyo para la realización de este documento.

**A Ing. Edgar Gavidia** por la dedicación y empeño en el desarrollo de este trabajo.

**A Ing. Ricardo Burgos** por brindarme parte de su tiempo y de sus conocimientos. Gracias por el apoyo técnico y revisiones de este documento.

**A Ing. Lesly Mendoza** por su apoyo desinteresado, por brindarme parte de su tiempo y por confiar en mí para la realización de este documento.

Y a todas las personas que en forma directa e indirecta me ayudaron en el desarrollo y formación de este trabajo. Muchas Gracias.

# ÍNDICE

<b>Introducción</b> .....	xiv
---------------------------	-----

## CAPITULO 1.

### **Antecedentes del Método de diseño AASHTO 2002 (Anteproyecto).**

1.1	Antecedentes.....	2
1.1.1	<i>Generalidades</i> .....	2
1.1.2	<i>Desarrollo histórico del diseño de pavimentos</i> .....	2
1.1.3	<i>Evolución de los procedimientos de diseño AASHTO</i> .....	9
1.1.4	<i>Diseño Empírico vs. Diseño Mecanicista</i> .....	11
1.2	Planteamiento del problema.....	13
1.3	Objetivos.....	14
1.4	Alcances.....	15
1.5	Limitaciones.....	16
1.6	Justificaciones.....	17

## CAPITULO 2.

### **Introducción al Método de diseño Mecanicista-Empírico.**

2.1	Visión General de los conceptos del diseño Mecanicista-Empírico.....	19
-----	----------------------------------------------------------------------	----

2.1.1	<i>Definiciones</i> .....	19
2.1.2	<i>Procesos de Diseño Mecanicista-Empírico para pavimentos</i> .....	20
2.1.3	<i>Ventajas y Características del método Mecanicista-Empírico</i> .....	21
2.2	Sistema de Manejo de información del Desempeño del Pavimento a Largo Plazo (LTPP).....	36
2.2.1	<i>Introducción</i> .....	36
2.2.2	<i>Objetivo del programa LTPP</i> .....	37
2.2.3	<i>Los experimentos del LTPP</i> .....	38
2.2.4	<i>Estudios generales del pavimento</i> .....	39
2.3	Datos de Entrada para el Diseño.....	47
2.3.1	<i>Tránsito</i> .....	47
2.3.2	<i>Subrasante</i> .....	75
2.3.3	<i>Materiales para pavimentos</i> .....	87
2.3.4	<i>Efectos del medio ambiente</i> .....	87
2.4	Drenaje.....	177
2.4.1	<i>Introducción</i> .....	177
2.4.2	<i>Fallas Inducidas por la humedad</i> .....	178
2.4.3	<i>Principios de un sistema de drenaje</i> .....	180
2.4.4	<i>Sistemas de drenaje subterráneos de caminos</i> .....	182
2.4.5	<i>Material para drenaje</i> .....	184
2.4.6	<i>Diseño de drenaje sistemático para la superficie</i> .....	188
2.4	Hombros.....	202
2.4.1	<i>Consideraciones geométricas</i> .....	202
2.4.2	<i>Cargas de tráfico sobre los hombros</i> .....	203

### **CAPITULO 3.**

#### **Análisis estructural, predicción de desempeño mecanicista-empírico de pavimentos rígidos nuevos.**

3.1	Modelos de comportamiento estructural.....	209
3.1.1	<i>Introducción.....</i>	209
3.1.2	<i>Esfuerzos debido a curvaturas de la losa.....</i>	210
3.1.3	<i>Esfuerzos y deflexiones debido a las cargas.....</i>	215
3.1.4	<i>Esfuerzos debido a la fricción.....</i>	226
3.2	Modelos de predicción de fallas estructurales en pavimentos	
	Rígidos.....	228
3.2.1	<i>Introducción.....</i>	228
3.2.2	<i>Modelos estructurales.....</i>	229
3.2.3	<i>Modelos de grietas por fatiga.....</i>	230
3.2.4	<i>Modelos de bombeo y erosión.....</i>	233
3.2.5	<i>Modelos de fallas.....</i>	235
3.2.6	<i>Deterioro de juntas.....</i>	240
3.2.7	<i>Modelos de despostillamiento.....</i>	241
3.3	Deterioros en pavimentos de concreto hidráulico.....	243

### **CAPITULO 4.**

#### **Análisis estructural, predicción de desempeño mecanicista-empírico de pavimentos flexibles nuevos.**

4.1	Modelo y respuesta de comportamiento estructural.....	265
-----	-------------------------------------------------------	-----

4.1.1	<i>Introducción</i> .....	265
4.1.2	<i>Teoría del semi-espacio elástico de Boussinesq</i> .....	266
4.1.3	<i>Masa homogénea</i> .....	267
4.1.4	<i>Sistema de capas</i> .....	268
4.1.5	<i>Sistemas de doble capa</i> .....	269
4.1.6	<i>Sistemas de tres capas</i> .....	276
4.1	Modelo y respuesta de comportamiento estructural.....	265
4.2.1	<i>Introducción</i> .....	265
4.2.2	<i>Modelos de grieta por fatiga</i> .....	278
4.2.3	<i>Modelos de ahuellamiento</i> .....	280
4.2.4	<i>Modelos de grietas por bajas temperaturas</i> .....	287
4.3	Deterioros en pavimentos asfálticos.....	287

## **CAPITULO 5.**

### **Diseño de pavimentos flexibles nuevos.**

5.1	Visión general del proceso de diseño de pavimentos flexibles nuevos.....	300
5.2	Entrada de datos para el diseño de pavimentos flexibles nuevos.....	302
5.2.1	<i>Información general</i> .....	303
5.2.2	<i>Identificación del sitio/proyecto</i> .....	304
5.2.3	<i>Análisis de parámetros</i> .....	305
5.2.4	<i>Tráfico</i> .....	308
5.2.5	<i>Clima</i> .....	315
5.2.6	<i>Estructura de pavimento</i> .....	317

5.3	Reglas de simulación.....	327
5.3.1	<i>Notas generales.....</i>	328
5.3.2	<i>Capas de subrasante.....</i>	328
5.3.3	<i>Materiales de agregados no ligados.....</i>	329
5.3.4	<i>Materiales estabilizados y tratados.....</i>	330
5.3.5	<i>Capas/materiales de drenaje.....</i>	332
5.3.6	<i>Materiales y mezcla de HMA.....</i>	332
5.4	Ejemplo de diseño de un pavimento flexible utilizando el método de diseño AASHTO 2002.....	333
5.4.1	<i>Información general.....</i>	333
5.4.2	<i>Criterios de comportamiento.....</i>	333
5.4.3	<i>Localización.....</i>	334
5.4.4	<i>Tráfico.....</i>	334
5.4.5	<i>Propiedades de drenaje y de superficie.....</i>	336
5.4.6	<i>Propiedades del material asfáltico.....</i>	336
5.4.7	<i>Subrasante.....</i>	337
5.4.8	<i>Otras capas.....</i>	337
5.4.9	<i>Diseño de prueba.....</i>	338
5.5	Ejemplo de diseño de un pavimento flexible utilizando el método de diseño AASHTO 1993.....	382

## **CAPITULO 6.**

### **Diseño de pavimentos rígidos nuevos.**

6.1	Visión general del proceso de diseño de pavimentos rígidos nuevos.....	387
-----	------------------------------------------------------------------------	-----

6.2	Entrada de datos para el diseño de pavimentos rígidos nuevos.....	390
6.2.1	<i>Información general.....</i>	390
6.2.2	<i>Identificación del sitio/proyecto.....</i>	391
6.2.3	<i>Análisis de parámetros.....</i>	392
6.2.4	<i>Tráfico.....</i>	394
6.2.5	<i>Clima.....</i>	400
6.2.6	<i>Propiedades de drenaje y de la superficie.....</i>	406
6.2.7	<i>Estructura de pavimento.....</i>	408
6.2.8	<i>Características de diseño del pavimento rígido.....</i>	422
6.3	Consideraciones de diseño para JPCP.....	427
6.3.1	<i>Espesor de losa.....</i>	428
6.3.2	<i>Ancho de losa.....</i>	428
6.3.3	<i>Materiales del concreto hidráulico.....</i>	429
6.3.4	<i>Espaciamiento entre juntas.....</i>	431
6.3.5	<i>LTE en juntas transversales.....</i>	432
6.3.6	<i>Profundidad del cortado con sierra de las juntas transversales.....</i>	433
6.3.7	<i>Transferencia de carga y amarre en juntas longitudinales..</i>	434
6.3.8	<i>Profundidad del cortado con sierra de las juntas Longitudinales.....</i>	434
6.3.9	<i>Base.....</i>	435
6.3.10.	<i>Subbase.....</i>	437
6.3.11.	<i>Drenaje subsuperficial.....</i>	437
6.3.12.	<i>Diseño de hombros.....</i>	439
6.3.13.	<i>Mejoramiento de la subrasante.....</i>	439
6.4	Ejemplo de diseño de un JPCP utilizando el método de diseño AASHTO 2002.....	440



6.4.1	<i>Información general</i> .....	440
6.4.2	<i>Criterios de comportamiento</i> .....	440
6.4.3	<i>Localización</i> .....	440
6.4.4	<i>Tráfico</i> .....	441
6.4.5	<i>Propiedades de la superficie y de drenaje</i> .....	443
6.4.6	<i>Características de diseño para el JPCP</i> .....	443
6.4.7	<i>Propiedades de mezcla del concreto hidráulico</i> .....	443
6.4.8	<i>Material de la base</i> .....	444
6.4.9	<i>Subrasante</i> .....	444
6.4.10	<i>Diseño de prueba</i> .....	445
6.5	Ejemplo de diseño de un JPCP utilizando el método de diseño AASHTO 1993.....	483

## **CAPITULO 7.**

<b>Conclusiones</b> .....	489
<b>Recomendaciones</b> .....	491
<b>Bibliografía</b> .....	495
<b>Glosario de términos</b> .....	498
<b>Anexos</b>	

## **INTRODUCCIÓN.**

Con mucha expectativa, los diseñadores de pavimentos están esperando que se ponga a su disposición la última guía de diseño estructural conocida como AASHTO 2002.

El objetivo general de esta nueva Guía de Diseño AASHTO 2002 es el de proveer a la comunidad vial una herramienta más adecuada para el diseño de estructuras nuevas y rehabilitadas de pavimentos, basada en principios mecanicistas-empíricos.

Una característica innovadora de la nueva guía de diseño AASHTO es que define varios niveles de complejidad en función del tránsito e importancia de la carretera, los cuales se desarrollarán posteriormente.

Además permite la calibración de modelos de desempeño mecanicistas-empíricos en función de las condiciones particulares del proyecto, lo cual favorecerá su aplicación universal.

Otro cambio importante es que muy pronto los diseñadores estarán empleando distribuciones de frecuencia para cargas por eje (a la usanza de la metodología PCA para pavimentos rígidos), en vez del concepto de ejes equivalentes simples de 8.200 Kg., que pasa a la historia con esta nueva Guía, al igual que el índice de serviciabilidad (PSI), que cede su lugar a indicadores de deterioro funcional y estructural.

Este nuevo método representa un cambio significativo en el procedimiento de diseño de pavimentos. En la aplicación de la Guía de Diseño AASHTO 2002 se debe considerar, en primer lugar, las condiciones específicas del sitio involucrado (tráfico, clima, suelo de la subrasante, condición del

pavimento existente si se trata de una rehabilitación), así como las condiciones de la construcción; a continuación, el diseñador deberá proponer un diseño de prueba a ser evaluado mediante corridas del “software” que provee el AASHTO 2002, para determinar así si éste es adecuado conforme a los pronósticos de los deterioros y de rugosidad lisa durante su vida útil.

Si el diseño de prueba no satisface los criterios de desempeño preestablecidos, éste debe ser revisado mediante la repetición del proceso de evaluación las veces que sea necesario. De esta manera, el diseñador estará plenamente involucrado en el proceso de diseño y tendrá flexibilidad para considerar particularidades y materiales para las condiciones prevalecientes en el sitio.

Una limitante del método AASHTO 1993, como en todo estudio empírico, ha sido la de establecer la validez de las relaciones propuestas para condiciones diferentes a las existentes en el lugar de la prueba, situación que ha inquietado a los diseñadores al momento de aplicarlo a las condiciones locales de un proyecto.

A través de los años, se han analizado una serie de modelos matemáticos, conocidos como "mecanicistas", que han procurado reflejar el funcionamiento estructural del pavimento al experimentar carga, mismos que se han utilizado como materia prima para la modelación con métodos empíricos comprobados en la práctica (se asocia la respuesta elástica ante la carga con repeticiones de carga para la falla estructural a partir de regresión múltiple).

A partir de la versión del año 1986, el método de diseño AASHTO comenzó a introducir conceptos mecanicistas para adecuar algunos parámetros a condiciones diferentes a las que imperaron en el lugar del ensayo

original. Tales modelos matemáticos requieren calibración para las condiciones locales del área donde se pretenden aplicar.

La enorme suma que todos los años se emplea en conservación y construcción vial obliga a la aplicación de los mejores procedimientos de diseño disponibles para así optimizar el uso de los recursos del país. Una mejora como la comentada en el diseño de las vías será un significativo aporte a la reducción del costo del mantenimiento de la red vial.

# **CAPITULO 1**

**ANTECEDENTES DEL**

**MÉTODO DE DISEÑO**

**AASHTO 2002**

**(ANTEPROYECTO)**

## **1.1 ANTECEDENTES**

### **1.1.1 GENERALIDADES.**

Los métodos de diseño de la Asociación de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte por sus siglas en inglés (AASHTO) se basan en resultados y conclusiones obtenidos de ensayos de los Experimentos Viales de la Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras (AASHO) en Estados Unidos de América de las cuales surgieron ecuaciones empíricas que sirvieron de base para el diseño de pavimentos tanto flexibles como rígidos. Los ensayos más importantes de los Experimentos Viales AASHO fueron los realizados entre 1958 y 1960 cerca de Ottawa, en el estado de Illinois.

### **1.1.2 DESARROLLO HISTÓRICO DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS.**

#### **1.1.2.1 MÉTODOS PREVIOS A ENSAYOS DE LOS EXPERIMENTOS VIALES (ROAD TEST).**

Los primeros métodos de diseño de pavimentos se remontan a tiempos anteriores a 1920. En ese tiempo los diseños se hacían en base a la experiencia y al sentido común del proyectista. En algunos casos los resultados eran buenos, pero cuando se extrapolaban a zonas de diferente tipo de suelo, distinta composición de tránsito y distinto clima, los resultados eran dudosos, por lo que eran métodos poco confiables.

### **a. MÉTODOS BASADOS EN LA MECÁNICA DE SUELOS.**

Muchos de estos métodos estaban basados en principios geotécnicos. El concepto era proteger la subrasante de tensiones excesivas colocando un espesor suficiente de materiales por encima de ésta.

#### **1. Método del Índice de Grupo.**

Se basa en el concepto del Índice de Grupo. El Índice de Grupo de un suelo aumenta a medida que disminuye su calidad, por lo tanto, a subrasantes de alto Índice de Grupo le corresponderán grandes espesores de pavimentos. Este método no especificaba cargas por eje, simplemente tiene en cuenta el número de vehículos pesados diarios.

#### **2. Métodos Edafológicos.**

Están basados en la clasificación de la formación de suelos. Se basan en el principio de que los suelos del mismo origen y con condiciones climáticas similares tendrán propiedades ingenieriles similares.

### **b. MÉTODOS BASADOS EN LA RESISTENCIA.**

Estos métodos usan las propiedades de resistencia o de carga-deformación de los suelos que forman las subrasantes.

#### **1. Método del Valor Soporte California (CBR).**

Este método usa las características de carga-deformación de la subrasante, subbase y base y en forma empírica los relaciona con los espesores totales del pavimento, de base y subbase. El CBR es la relación existente entre una carga que produce una deformación de 0.1 pulg. (2.5 mm) en el material en cuestión y la carga que produce esa misma deformación en una muestra patrón que es un material granular de excelentes cualidades.

### **2. Método del valor R de Hveem.**

Se basa en el ensayo del estabilómetro de Hveem que mide las presiones horizontales desarrolladas en un material granular por efecto de la aplicación de una carga vertical. A mayor resistencia a la presión vertical, mejor será la calidad del material. El espesor de un paquete estructural es función del valor R de la subrasante, a menor R mayor espesor.

### **3. Métodos basados en ensayos de carga-deformación.**

Este método de diseño supone que el comportamiento del pavimento es función de las características de carga-deformación de la subrasante. Para medir esta característica se usa el ensayo de la placa o plato de carga en el cual la subrasante es cargada a través de una serie de placas rígidas de 300 a 750 mm. de diámetro y se mide la deflexión de la placa. El espesor de diseño está basado en una correlación entre la deflexión de la placa y el comportamiento del pavimento.

### **4. Métodos basados en ensayos triaxiales.**

Se coloca la muestra de material a ensayar dentro de una cámara triaxial, se le aplica una presión de confinamiento que simula las condiciones imperantes en el pavimento y se le carga verticalmente hasta rotura. Estas tensiones de rotura se relacionan con los espesores de pavimentos necesarios para proteger la subrasante y también espesores de base para proteger la subbase.

## **1.1.2.2 MÉTODOS DE DISEÑO BASADOS EN ENSAYOS DE LOS EXPERIMENTOS VIALES (ROAD TEST).**

### **1. Experimento Vial de Bates.**

En la década de 1920 a 1930, los ingenieros comenzaron a reconocer que las cargas de tránsito y su distribución por ejes eran factores fundamentales en el diseño de pavimentos. Así la División de Carreteras de Illinois realizó el



Experimento Vial de Bates entre 1922 y 1923. Este ensayo fue hecho en una calzada de 4 Km. de largo cerca de Springfield, Illinois.

La misma fue dividida en distintos sectores y se usaron diferentes materiales: Ladrillo, concreto asfáltico y hormigón.

## ***2. Experimento Vial de Maryland.***

Se hizo en 1950 sobre un tramo de 1.8 km. de un pavimento rígido de una ruta existente cerca de La Plata, Maryland. El ensayo consistía en estudiar una sección transversal de espesor variable (7-9 pulg.) con juntas de contracción cada 12.2m. y juntas de expansión cada 36.6m. La losa se armó con malla de acero y se usaron pasadores de 19 mm. de diámetro en correspondencia con las juntas transversales.

El objetivo de este ensayo fue determinar los efectos relativos de cuatro distintas cargas por eje usando dos vehículos tipo. Las cargas eran 80 KN (simple), 100 KN (simple), 142 KN (tándem) y 200KN (tándem). Estas eran las cargas previstas en la red vial. Los resultados de los ensayos eran los siguientes:

- a) La figuración y asentamiento de la losa en las juntas se incrementaba de acuerdo a las cargas en este orden: 80 kN (simple), 142 kN (tandem), 100 kN (simple), 200 kN (tandem).
- b) Cuando habían subrasantes plásticas se observaba bombeo, pero esto no ocurría cuando la subrasante era granular con muy pequeños porcentajes de limo y arcilla.
- c) La equivalencia entre ejes tandem y ejes simples dependía de la ubicación transversal de la carga.
- d) Las tensiones y deflexiones causadas por cargas actuando en las esquinas y bordes estaban influenciadas por el alabeo térmico.

### **3. Experimento Vial de la WASHO.**

Fue realizado entre 1953 y 1954 por la Asociación de Autoridades Estatales de Carreteras del Oeste por sus siglas en inglés (WASHO) en la ruta existente cerca de Malad, Idaho. Se hicieron dos pistas de 580 m. en tramo recto cada una, en las cuales había 5 secciones de ensayos de 92 m. de largo separados por tramos en transición de 30 m. Las cargas por ejes usadas fueron: 80 kN (simple), 100 kN (simple), 142 kN (tandem), 178 kN (tandem).

Los espesores de pavimentos oscilaban entre 152 y 559 mm. (6 a 22 pulg.). Las conclusiones fueron:

- a) El daño en el pavimento se incrementaba en el siguiente orden: 80 KN (simple), 142 kN (tandem), 100 kN (simple), 178 kN (tandem).
- b) El comportamiento del pavimento con 4 pulg. de concreto asfáltico fue superior a uno de igual espesor pero con 2 pulg. de concreto asfáltico.
- c) De acuerdo a las fallas producidas al pavimento, un eje tandem con una carga 1.5 veces mayor que la carga de un eje simple es equivalente a ese eje simple. La equivalencia entre ejes simples y tandem en lo concerniente a deformaciones es 1.8 veces.

### **4. Experimento Vial de AASHO.**

Fue el último de los grandes ensayos de los Experimentos Viales en Estados Unidos. Fue hecho entre 1958 y 1960 cerca de Ottawa, Illinois. Se eligió esta zona por poseer características de suelos uniformes y típicos de gran parte de Estados Unidos. Por otro lado el clima es el típico del norte del País.

Este ensayo introdujo el concepto de serviciabilidad en el diseño de pavimentos. La serviciabilidad es una medida de la capacidad del pavimento para brindar una superficie lisa y suave al usuario. Este parámetro varía entre 0 (pavimento intransitable) a 5 (pavimento perfecto). Para cada sección de pavimentos se estudió el índice de serviciabilidad presente o actual, PSI (índice

de serviciabilidad presente) y se graficó en función del tiempo. En base a datos de este tipo se dedujeron las ecuaciones de diseño.

#### **4.1 Extensiones de los Experimentos Viales de la AASHO.**

Fue el ensayo más completo realizado hasta el momento, pero adolecía de ciertos defectos como ser: Un único ambiente, el mismo tipo de subrasante y materiales para pavimentos del norte de Illinois. Como paso siguiente se consideraban diferentes condiciones y materiales. Los componentes del proceso de diseño que requerían verificación local eran:

- Factor regional (clima).
- Valor soporte para distintas subrasantes.
- Coeficientes estructurales para las distintas capas.

Se hacían estudios complementarios en otras regiones de Estados Unidos con diferentes materiales y condiciones ambientales, pero lamentablemente nunca se llevaron a cabo dejando al método AASHTO con estas limitaciones:

- Verificación.
- Base de datos estadísticos inadecuados.
- Definiciones no reales de falla.

No obstante, esto sirvió de base para muchos procesos de diseño de pavimentos en Estados Unidos.

#### **4.2 Objetivos de los Experimentos Viales de la AASHO.**

Los objetivos de AASHO eran:

- a) Determinar la relación entre el número de repeticiones de cargas por eje de diferente magnitud y configuración y el espesor necesario de

pavimento (rígido o flexible) que apoya en una subrasante de características conocidas.

- b) Determinar los efectos significativos de vehículos de distinto peso cuando se aplican solicitaciones de distinta frecuencia a los puentes. Los puentes analizados eran vigas I de acero, de concreto armado y de concreto pretensado.
- c) Realizar estudios especiales en lo que concierne a hombros, tipos de base, fatiga del pavimento, dimensiones y presión de neumáticos y vehículos militares pesados y correlacionar los resultados de estos estudios especiales con los de la investigación básica.
- d) Tomar los datos recolectados necesarios para mantener las secciones de estudio lo máximo posible en buenas condiciones para la medida de las variables en estudio.
- e) Desarrollar instrumentos, procedimientos de ensayos, datos, tablas, gráficos y fórmulas que reflejen la capacidad de las distintas secciones ensayadas y que serán muy valiosas en el diseño de futuras carreteras y en la evaluación de la calidad de calzadas existentes.

### **1.1.3 EVOLUCIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO AASHTO.**

- En el período de 1958 a 1960 se realizaron los Experimentos Viales de la AASHO.
- La primera Guía de Diseño AASHTO que se emitió fue en 1961. Esta fue revisada y expandida muchas veces.
- En 1961 y 1962 se realizó la Guía Provisional de AASHO.
- En 1972 se revisó la Guía Provisional AASHO.
- En el año de 1981 se revisó el Capítulo III referente a pavimentos Rígidos.
- En 1986 apareció la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO.
- En 1993 apareció la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO con el concepto del proceso de diseño de sobrecapas.
- En el año de 1998 se presentó un suplemento para la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO de 1993 que estaba enfocado al diseño de pavimentos rígidos. En esta etapa de la Guía de Diseño AASHTO se comenzó con los principios del método mecanicista.
- Este fue el comienzo del uso del método Mecánico-Empírico y el comienzo de una nueva era del diseño de pavimentos con la nueva Guía de Diseño AASHTO 2002.

Los clásicos métodos de AASHTO surgieron debido a las pruebas anteriores, presentándoseles muchas modificaciones en sus versiones pero aunque todavía son de carácter empírico, se diferencia del nuevo método de diseño AASHTO 2002 en que ahora contiene una base mecanicista, apoyada en la teoría de la elasticidad y en la aplicación de modelos de deterioro de pavimentos.

La guía de diseño AASHTO 2002 representa un mayor cambio en la forma del desarrollo del diseño del pavimento. El diseñador considera primer lugar condiciones de sitio como tráfico, clima, subrasante, condiciones del pavimento existente para el caso de rehabilitación y en segundo lugar una propuesta de un diseño de prueba que se ajusta de acuerdo a los comportamientos estructurales y funcionales obtenidos.

El diseñador esta completamente envuelto en el proceso de diseño y tiene la flexibilidad para considerar diferentes características de diseño y materiales predominantes del sitio.

El formato empírico-mecanicista de la Guía de Diseño AASHTO 2002 provee un bosquejo para el continuo mejoramiento y mantenimiento con cambios en el transporte, materiales, construcción, conceptos de diseño, uso de software, etc.

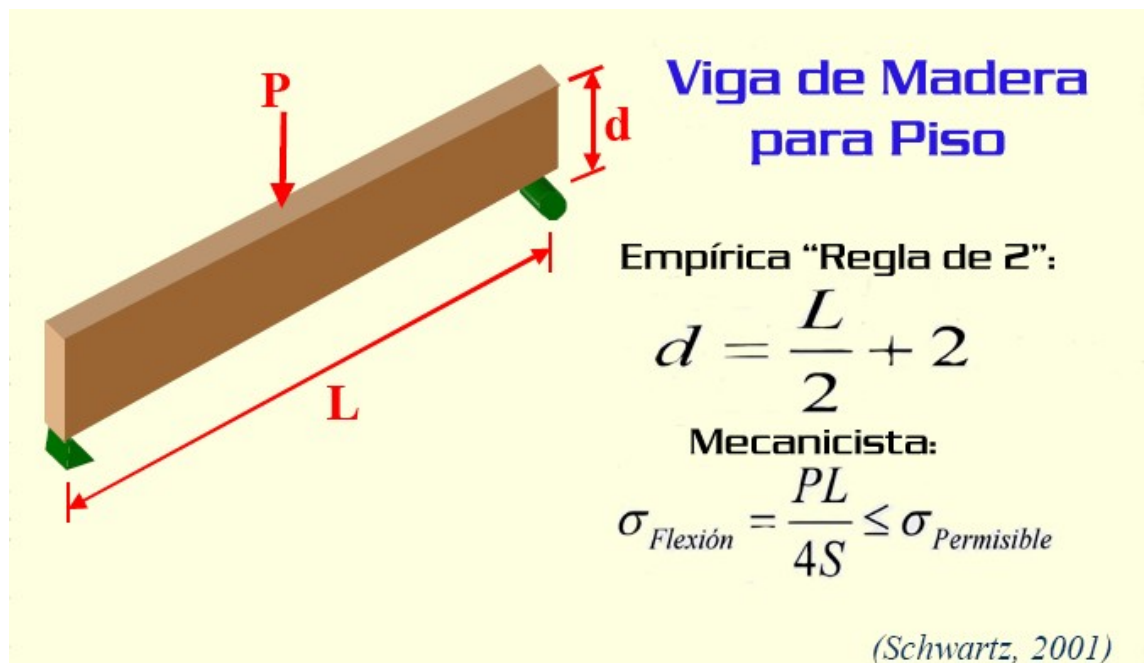
Yoder y Witczak (1975) señalaron que el proceso de diseño de cualquier pavimento para ser completamente racional, se deben considerar tres elementos primordiales, los cuales la Guía de Diseño considera:

- La teoría para predecir las fallas asumidas ó parámetros de deterioro.
- La evaluación de las propiedades de los materiales aplicables a la teoría seleccionada.
- La determinación entre la relación de la magnitud de los parámetros en cuestión al nivel de desarrollo deseado.

El método mecanicista se apoya en la teoría de la elasticidad lineal o no lineal. Es válido considerar la teoría elástica lineal en primera aproximación dado que las deformaciones que sufre el pavimento por las cargas de tránsito son prácticamente elásticas. Es debe considerar la teoría de la elasticidad dado que el tiempo de aplicación de la carga que ejercen las llantas al pavimento es muy pequeño.

### 1.1.4 DISEÑO EMPÍRICO vs. DISEÑO MECANICISTA.

Los procesos de diseño de pavimentos actuales (conocidos como procedimientos empíricos) son basados en experiencias ingenieriles y observaciones entre la relación y la realización del pavimento, cargas de tráfico y espesores de pavimentos para una región y clima en particular.



**Figura 1.1. Diseño Empírico vs. Diseño Mecanicista<sup>1</sup>**

El procedimiento del diseño mecánico está basado en la propiedad de los materiales y cómo estas propiedades se relacionan con la realización del pavimento. El procedimiento mecánico permite a los ingenieros adaptar el diseño del pavimento a materiales específicos, lugares de ejecución, cargas de tráfico.

<sup>1</sup> Fig. 1.1: Instructor Manual Module 1-1. Course Objectives and Organization. Pág. 1-1.5

El programa del Comportamiento del Pavimento de Largo Plazo en sus siglas en inglés (LTPP) fue diseñado e inicializado a finales de 1980 como un proceso sistemático de 20 años para la recolección de datos.

Entendiendo el por qué la realización de algunos pavimentos es mejor que otros, es la clave para la construcción y mantenimiento del sistema de carreteras de costos rentables. Eso es porque en 1987 el programa LTPP (un estudio exhaustivo de 20 años de servicio del pavimento) comenzó una serie de rigurosos monitoreos de campos experimentales a largo plazo de más de 2400 pavimentos de concreto hidráulico y de asfalto en secciones de prueba a través de Estados Unidos y Canadá.

La meta del programa LTPP es ayudar a los estados y provincias a hacer decisiones que guiarán a la realización de un mejor pavimento de costo rentable.

Los nuevos procesos del programa LTPP fueron desarrollados para usarlo con la actual Guía de Diseño AASHTO pero las agencias o empresas que utilizan los nuevos procesos estarán en una buena posición para implementar la Guía de Diseño AASHTO 2002 el cual usa un procedimiento mecanicista.

La nueva guía de diseño también ayudará al personal de agencias de transporte y carreteras de la región a la preparación para el cambio del proceso empírico de diseño de pavimentos a un proceso mecanicista de diseño más avanzado.



## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Actualmente se conoce en el país todo lo referente al diseño de estructuras de pavimentos de acuerdo a la Guía para el diseño de estructuras de pavimento AASHTO 1993 la cual sigue fundamentándose en los resultados del experimento vial AASHTO. En esta versión el diseño estructural se realiza utilizando un nomograma ó una ecuación obteniendo un espesor de la capa de rodadura de acuerdo a condiciones del lugar del proyecto. Esta metodología de diseño ha dado resultados muy buenos, sin embargo, nos encontramos en un período de optimización de recursos buscando dar seguridad, economía y comodidad de una manera más eficiente. Las diversas ediciones de las Guías de Diseño de Estructuras de Pavimento AASHTO han servido por mucho tiempo a nuestro país pero, sin embargo, las distintas versiones han tenido algunas deficiencias para caracterizar o ponderar los casos siguientes:

- Las cargas de tráfico.
- Rehabilitación.
- Efectos climáticos.
- La subrasante.
- Los materiales en la superficie.
- La caracterización del tráfico.
- La construcción y drenajes.
- El curso de la base.
- El período de vida de diseño.
- La ejecución.
- La seguridad vial.

La nueva Guía de Diseño AASHTO 2002 provee herramientas para la evaluación de los efectos de variación en los materiales en la ejecución del pavimento. Además provee una relación racional entre la construcción y la especificación de los materiales y el diseño estructural del pavimento.

## **1.3 OBJETIVOS.**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL:**

- Realizar una Guía para el uso del método de diseño de pavimentos flexibles y rígidos nuevos según AASHTO 2002.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Interpretar los parámetros nuevos y existentes para el diseño estructural de pavimentos según la versión AASHTO 2002.
- Realizar diseños de prueba utilizando la Guía de Diseño AASHTO 2002 para pavimentos flexibles y rígidos.
- Utilizar software el software de la Guía de diseño y documentación basados en el proceso de la Guía de Diseño.
- Analizar los resultados comparativos de las Guías AASHTO 1993 y AASHTO 2002 para verificar si son factibles de acuerdo a lo que se rige en el país para su uso en el diseño de pavimentos nuevos.

## **1.4 ALCANCES.**

En esta investigación se pretende realizar una Guía de Análisis del método de diseño de estructuras de pavimentos nuevos tanto flexibles como rígidos basados en la versión AASHTO 2002 con el fin de presentar una Guía de Diseño, la cual utiliza principios de tecnología empírica-mecanicista que comprende procesos de selección de espesores, drenaje de la superficie, estrategias de mejoramiento de la fundación y otras características de diseño.

Este proceso de diseño podría ser usado para el desarrollo alternativo de estructuras utilizando una variedad de materiales y procesos constructivos de acuerdo a la región de ejecución del proyecto.

El objetivo que se deja con la nueva guía de diseño AASHTO 2002 el cual se fundamenta de los resultados del programa LTPP, es establecer una fuerte aceleración en la búsqueda de innovación en las carreteras de América y sobre todo en las de nuestro país:

“Incrementar la vida del pavimento bajo la investigación de la realización a largo plazo de varios diseños de estructuras de pavimentos y la rehabilitación de estructuras de pavimento usando diferentes materiales y bajo diferentes cargas, ambientes, suelos de subrasantes y practicas de mantenimiento.”

## **1.5 LIMITACIONES.**

Debido al tiempo de realización de este trabajo de graduación, solo se presentará lo referente al diseño de pavimentos nuevos, tanto flexibles como rígidos. Para los ejemplos ilustrativos, se utilizará un pavimento flexible convencional y para el pavimento rígido un JPCP.

El trabajo de graduación no se enfocará a calibrar resultados de la Guía de Diseño AASHTO 2002 por ser un proceso que está fuera de los alcances y objetivos además de los recursos y el tiempo con los que se cuenta para la realización de este trabajo.

## 1.6 JUSTIFICACIONES.

Debemos actualizar la metodología de diseño que se utiliza por lo siguiente:

- La Guía contempla la versatilidad para considerar opciones de diseño local.
- Generalmente aplica validez a la tecnología del estado de la práctica.
- Promulga tres niveles jerárquicos de entradas de datos para el diseño que permite al diseñador coincidir al nivel de importancia del proyecto.
- Estipula un equitativo diseño base desde el punto de vista de la selección del tipo de pavimento.
- La Guía y el software asociado son de ambiente amigable.

Además, los beneficios que presenta la utilización del proceso mecanicista-empírico de la Guía de Diseño 2002 son los siguientes:

- El impacto en la reducción de fallas prematuras.
- El impacto de la longevidad del pavimento.
- Beneficios prácticos adicionales.
- Beneficios del futuro potencial del mejoramiento continuo.

La Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA), procedió a elaborar una serie de normas y manuales para: Planificar, construir, mejorar, mantener y fortalecer la red vial centroamericana, en el cual los métodos o técnicas más utilizados en el área se refieren siempre a la guía de diseño de la AASHTO edición 1993, para los pavimentos asfálticos e hidráulicos, por lo que recomienda sea revisada y comparada con la nueva Guía de Diseño AASHTO 2002, verificando si los cambios fueran de forma o de fondo, para así poder actualizar el nuevo manual.

## **CAPITULO 2**

# **INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE DISEÑO MECANICISTA- EMPÍRICO AASHTO 2002**

## **2.1 VISIÓN GENERAL DE LOS CONCEPTOS DEL DISEÑO MECANICISTA-EMPÍRICO**

### **2.1.1 DEFINICIONES.**

#### ***Diseño Empírico.***

- Esta basado en resultados de experimentos o experiencias. Requiere muchas observaciones para establecer conexiones entre variables de diseño y su funcionamiento.
- No es necesario establecer bases científicas de conexiones observadas en los experimentos.

#### ***Diseño Mecanicista.***

- Es una aproximación puramente científica.
- Confía en el comportamiento estructural mecánico al efectuar la carga de la estructura.
- Se deben conocer las características fundamentales de los materiales.
- También se necesitan conocer exactamente las características geométricas de la estructura.

#### ***Diseño Mecanicista-Empírico.***

- Combina aspectos mecanicistas y empíricos.
- Involucra componentes mecanicistas para determinar la respuesta del pavimento debido a cargas a través de modelos matemáticos.
- Los componentes empíricos relacionan las respuestas del pavimento con su funcionamiento.
- Cada tipo de deterioro se asocia a una respuesta crítica del pavimento.

## **2.1.2 PROCESOS DE DISEÑO MECANICISTA-EMPÍRICO PARA PAVIMENTOS.**

### ***Ejemplos de procesos de diseño de pavimentos de concreto asfálticos mecanicista-empírico.***

- Método Shell (1977).
- Instituto del Asfalto (1982).
- NCHRP Proyecto 1-26 (1992).
- Diseño Mecanicista-Empírico Surafricano (1992).
- Illinois, Kentucky, Washington, Minnesota.
- Guía de Diseño 2002.

### ***Ejemplos de procesos de diseño de pavimentos de concreto hidráulico mecanicista-empírico.***

- Ecuación de Westergaard (1926).
- Diseño de PCA basado en la fatiga (1933, 1966, 1984).
- RISC (1985).
- NCHRP Estudio 1-26 (1990, 1992).
- Suplemento de pavimentos rígidos de AASHTO (1998).
- Illinois, Kentucky.
- Guía de Diseño 2002.

### ***Factores que contribuyen al mejoramiento de los procesos de diseño.***

- Investigación experimental con pistas de prueba.
- Mejoramiento en procesos de análisis de pavimentos.
- Mejoramiento en la caracterización de materiales para pavimentos.
- Estudios nacionales y regionales de niveles de funcionamiento de pavimentos.



***Estudio LTPP.***

- La cantidad de datos para el funcionamiento del pavimento que están disponibles hoy en día para los investigadores es mucho mayor comparados con los datos obtenidos como resultados en la prueba de caminos de AASHO. Esto implica que se podrá crear con estos datos recolectados, mejores procesos de diseño que con los métodos anteriores.

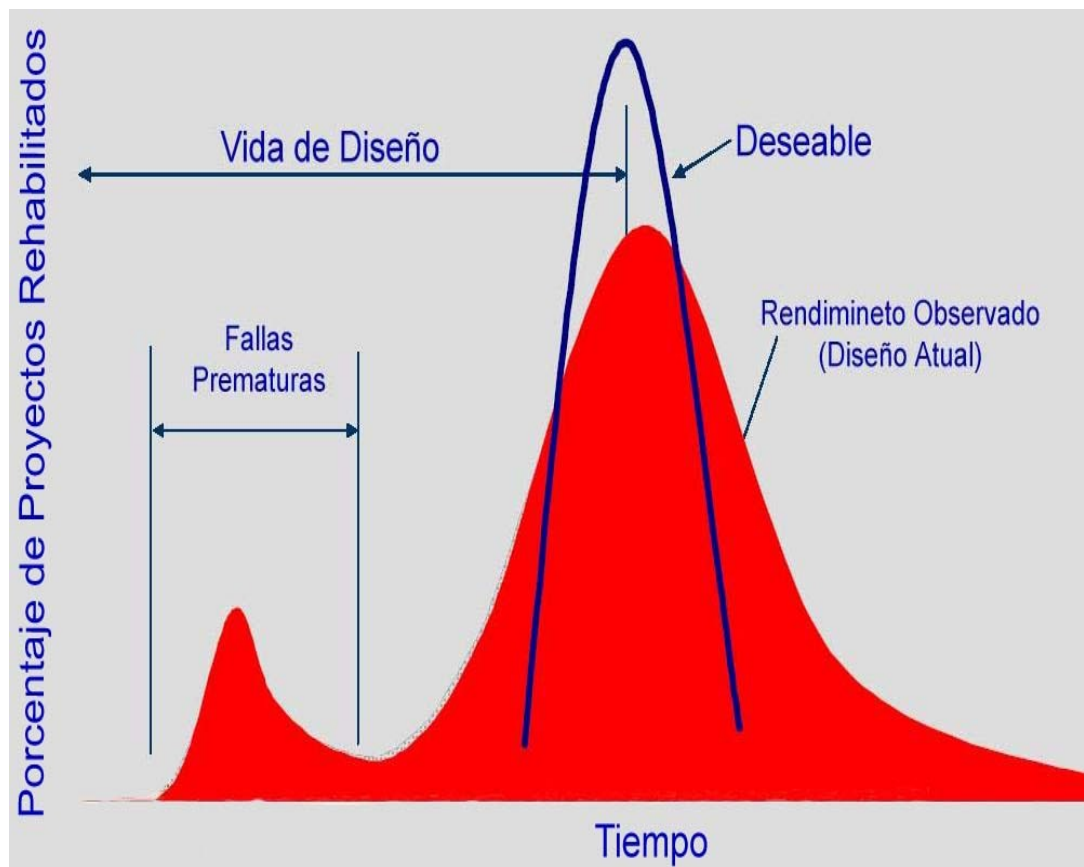
### **2.1.3 VENTAJAS Y CARACTERÍSTICAS DEL MÉTODO MECANICISTA-EMPÍRICO.**

***Beneficios del diseño Mecanicista-Empírico.***

- El diseño ya no es solo para el espesor de la estructura.
- Aproximación comprensiva incluyendo consideraciones estructurales y de los materiales.
- Guía mejorada para el diseño de rehabilitación de pavimentos (sobrecapas o recubrimientos).
- Manejo mejorado de efectos climáticos y diseños de seguridad.
- Nuevos Conceptos:
  - Funcionamiento basado en deterioros y calidad de la carretera.
  - Mejor caracterización de pavimentos existentes.
  - Consideraciones directas de drenaje y erosión de la subbase.
- Adaptabilidad:
  - Mejor habilidad para manejar las características cambiantes del tránsito.
  - Capacidad para incorporar materiales pavimentados disponibles.
  - Capacidad de extrapolar de los estudios de campo y laboratorio.
- A través de una consideración directa de indicadores críticos del funcionamiento pavimento, la metodología del diseño mecanicista-

empírico trata de prevenir la ocurrencia de fallas prematuras del pavimento. Tal vez este es el beneficio más grande del método mecanicista-empírico.

Como se muestra en Figura 2.1:



**Figura 2.1. Ahorro Potencial<sup>2</sup>**

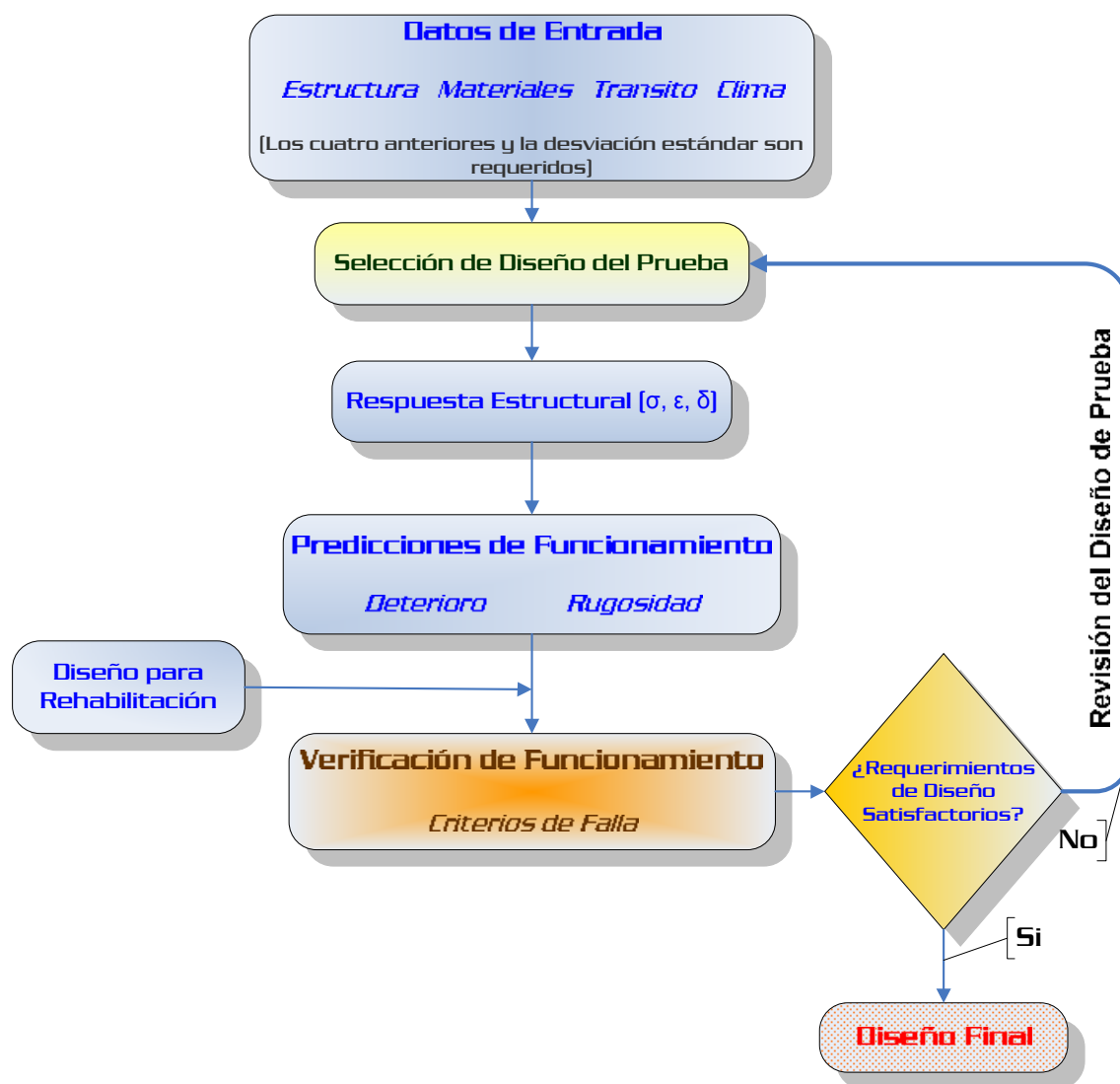
### ***Estructuras y Componentes del diseño Mecanicista-Empírico.***

El siguiente flujograma genérico, forma la base para la mayoría de diseños mecanicista-empírico (ver Esquema 2.1). No hay arreglos de los componentes que existen en el proceso. Se enfatiza que la naturaleza iterativa

<sup>2</sup> Fig. 2.1: Part 1- Introduction to 2002 Design Guide, Background. Página 1.1.6

del proceso de diseño es muy diferente de los procesos de diseño “paso a paso” basados en el cálculo de espesor de AASHTO.

También se acentúa que los criterios del funcionamiento contra los cuales el diseño será comprobado se incorporarán al flujograma como entradas de datos.



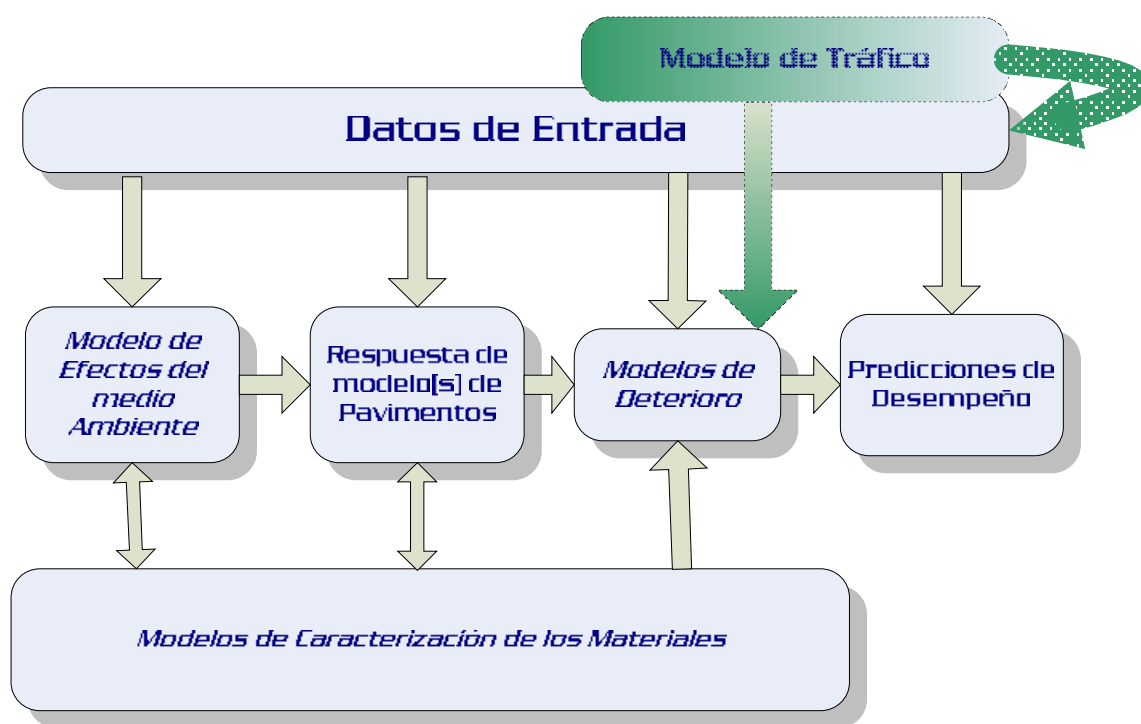
**Esquema 2.1 Estructura del diseño Mecanicista-Empírico<sup>3</sup>**

<sup>3</sup> Gráfica 2.1: Instructor's Manual. Module 1-2. Página 1-2.7.

**Proceso de diseño mecanicista-empírico.**

El siguiente diagrama (gráfica 2.2) ilustra la interacción entre todos los componentes considerados en el diseño mecanicista-empírico.

En el diagrama la definición de “Entrada de Datos” incluye todos los datos como tránsito, materiales y datos del clima. Esto podría incluir las capas del pavimento, juntas, número de carriles, etc.



**Esquema 2.2. Proceso del método mecanicista-empírico<sup>4</sup>**

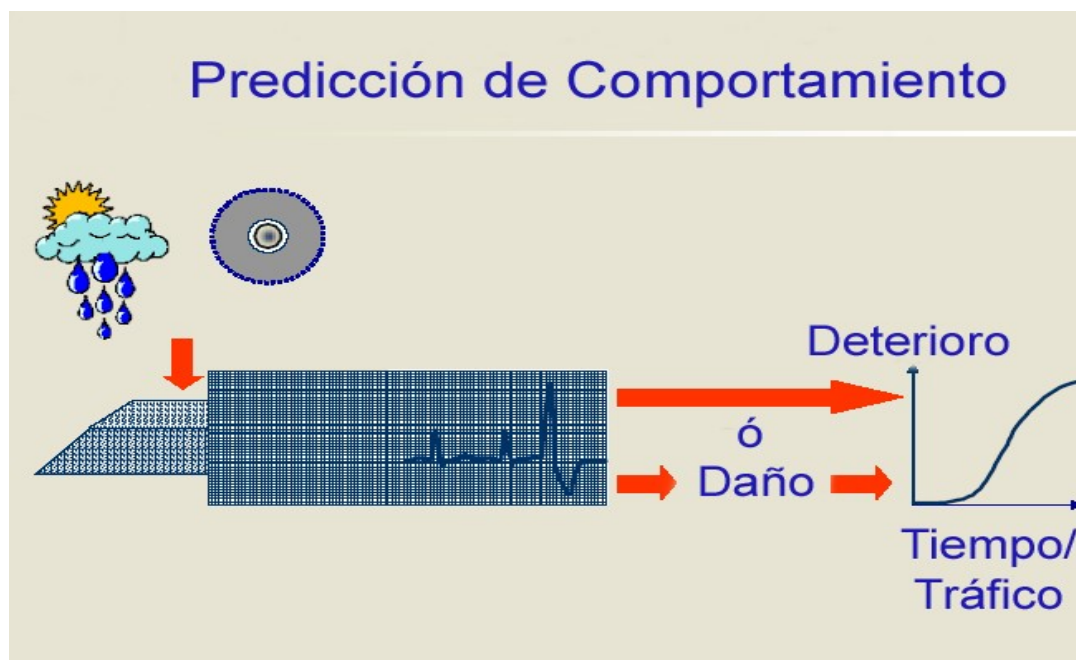
**Comportamiento del pavimento.**

El concepto del comportamiento del pavimento incluye consideraciones de comportamiento funcional, comportamiento estructural y seguridad. Esta guía de diseño se concierne primordialmente con el comportamiento funcional

<sup>4</sup> Gráfica 2.2: Instructor’s Manual. Module 1-2. Página 1-3.4.

y estructural. La información pertinente a la seguridad, puede ser encontrada en publicaciones de NCHRP, FHWA y AASHTO.

Un aspecto importante de la seguridad, es la resistencia friccionante provista por la relación pavimento/llanta.



**Figura 2.2. Comportamiento de la Estructura<sup>5</sup>**

El Comportamiento Estructural del pavimento se relaciona a su condición física (fracturas por fatiga y ahuellamiento en pavimentos flexibles), fallas en juntas y losas agrietadas para pavimentos rígidos con juntas u otras condiciones que afecten la capacidad de carga en la estructura del pavimento ó requerimientos de mantenimiento). Todos estos tipos de fallas pueden ser directamente pronosticadas usando conceptos mecanicistas.

El comportamiento funcional del pavimento concierne al buen estado del pavimento y al servicio que presta a los usuarios con esas características.

<sup>5</sup> Fig. 2.2: Instructor Manual Module 1-2. Página 1-2.16.

Se debe hacer notar que una geometría adecuada es asumida para la velocidad de diseño. La comodidad al manejar ó la calidad de la carretera es la característica dominante del comportamiento funcional.

En la nueva Guía de Diseño el indicador del comportamiento funcional escogido es la rugosidad del pavimento que es representado por el IRI.

El IRI fue adaptado como una medida estándar de la rugosidad por las siguientes razones:

- El IRI es constante en el tiempo y como estadística computada de perfiles de carreteras, puede ser fácilmente presentado por datos de elevación.
- La correlación entre el IRI y otras medidas de la rugosidad son constantemente altas a varias velocidades.
- El IRI ha sido demostrado para buenos correlativos con paneles de clasificación de serviciabilidad.

El concepto del comportamiento de la rugosidad esta basado en las siguientes presunciones:

- Las carreteras son para la conveniencia y comodidad de los usuarios en general y esto es posible solamente a través de pavimentos lisos.
- Comodidad y calidad de rodadura, aunque subjetivo, puede estar relacionado exactamente a los perfiles de pavimentos medidos.
- La rugosidad medida, es el factor dominante en el pronóstico de la serviciabilidad y en comportamientos basados en la serviciabilidad definidos en las pruebas AASHO.
- Determinados deterioros del pavimento pueden ser medidos objetivamente y relacionados a la rugosidad.

### **Caracterización del tráfico.**

Se consideran circulación de camiones cargados en términos de ejes de espectro de carga. Se consideran espectros de carga para ejes simples, tandem, tridem y cuadrangulares.

El enfoque de ESAL ya no es más utilizado como un dato de entrada directa en el diseño. En pocos casos, los espectros de carga serán convertidos en ESAL's internamente dentro del software como manera de hacer uso de modelos matemáticos previos que no los han convertido a una base de espectros de carga. El software usa el número de vehículos pesados como un indicador global de la magnitud de la carga del tráfico de vehículos FHWA clase 4 en adelante.



**Figura 2.3. Caracterización del tránsito.<sup>6</sup>**

Los niveles de jerarquía de los datos del tránsito son:

<sup>6</sup> Fig. 2.3: Instructor Manual Module 1-3. Página 1-3.5.

- *Nivel 1:* Aproximación recomendada para altos volúmenes de vías, requieren la reunión y análisis de datos de tráfico específicos del sitio incluyendo conteos vehiculares por clase, por dirección y carril. La distribución de los espectros de carga son desarrollados para cada clase de vehículo desde los datos colectados de los pesos por eje. Los volúmenes de tráfico por clase de vehículo, son pronósticos para el período de análisis de diseño y los espectros de carga desarrollados para cada clase son usados para estimar las cargas por ejes. Podrían ser usados también los datos de entrada de la presión de contacto de las llantas ó su valor por defecto, espaciamiento de las llantas y espaciamiento de ejes.
- *Nivel 2:* Es similar al nivel 1, se requieren sitios específicos de datos de volumen y clasificación. Sin embargo, la distribución de los espectros de carga para cada clase de vehículo por estado o región podrían ser usados para estimar cargas a través del período de análisis de diseño.
- *Nivel 3:* Proveería datos de espectros de carga por defecto para específicas clases de carreteras funcionales. El diseñador aplica estos valores por defecto para habilitar o estimar datos de volúmenes de vehículos.

### ***Caracterización de los materiales para pavimentos.***

Los parámetros necesarios para el proceso diseño de los materiales podrían ser clasificados en uno de los tres mayores grupos:

- Modelo de respuesta del pavimento de la entrada de datos de los materiales.
- Criterios de deterioro relacionados a los materiales del pavimento.
- Otras propiedades de los materiales.

El modelo de respuesta del pavimento de la entrada de datos de los materiales, se relaciona al módulo de Poisson, usado para caracterizar el comportamiento de las capas en el modelo específico.



Los parámetros de los materiales asociados con los criterios de deterioro del pavimento, normalmente son vinculados hacia algunas medidas de esfuerzo del material (esfuerzo de corte, esfuerzo de compresión, módulo de ruptura) ó hacia algunas manifestaciones de los efectos de deterioro real (deformación por repetición de cargas permanentes, falla por fatiga en materiales de concreto).

Y en otras propiedades de los materiales, se asocia a propiedades especiales requeridas para la solución de diseño. Ejemplos de esta categoría son la expansión térmica y el coeficiente de contracción para el concreto y mezclas asfálticas.

Todos los materiales para pavimentos han sido clasificados en las siguientes categorías:

- Granulometría densa, mezcla en caliente de concreto asfáltico (HMA).
- Granulometría abierta, materiales para bases permeables tratadas con asfalto (ATPB).
- Mezcla de asfalto en frío (CMA).
- Concreto de cemento Pórtland (PCC).
- Bases tratadas con cemento (CTB) y materiales para bases de concreto delgadas.
- Granulometría abierta, materiales para bases permeables tratadas con cemento (CTPB).
- Materiales para agregados de base (AB) no estabilizadas. También referido como agregados de base granular (GAB) ó materiales de agregado grueso (CA).
- Limos modificados ó capas de limos estabilizados.
- Suelo de subrasante.
- Lecho de rocas.

La caracterización de la entrada de datos de los materiales está definida en tres niveles:

- Nivel 1: Requerimientos de laboratorio ó Pruebas de campo.
- Nivel 2: Usando correlaciones con pruebas disponibles.
- Nivel 3: Valores Prefijados.

### ***Modelo estructural del pavimento.***

El adecuado modelo estructural para pavimentos nuevos y rehabilitados de estructuras flexibles y rígidos, es el corazón del proceso de diseño basado en el método mecanicista. Los modelos de respuesta de la estructura son usados para calcular esfuerzos críticos, tensión, desplazamientos por flexión, sistemas de pavimentos rígidos para cargas del tráfico y factores de clima (temperatura y humedad). Estas respuestas son utilizadas en modelos de daños para acumular daños mes a mes a través del período de diseño. El daño acumulado en el tiempo es relativo para deterioros específicos tales como agrietamiento por fatiga, ahuellamiento el cual es entonces pronosticado usando campos calibrados de modelos de grietas (este es la parte principal del método empírico de un proceso de diseño mecanicista-empírico).



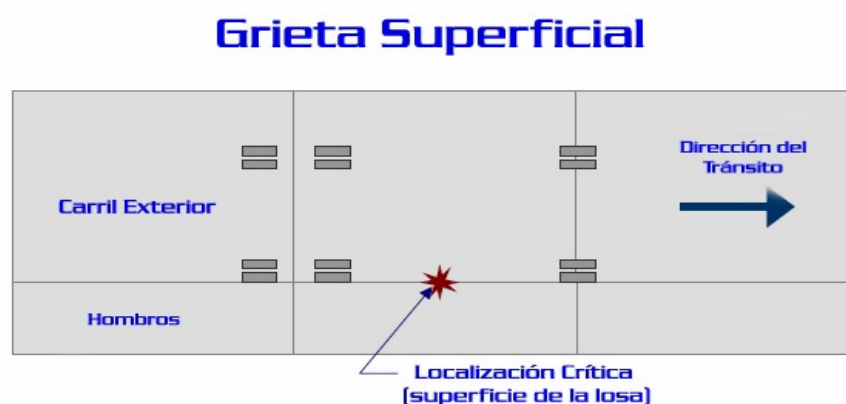
**Figura2.4. Modelo Estructural.<sup>7</sup>**

<sup>7</sup> Fig. 2.4: Instructor Manual Module 1-3. Página 1-3.6.

### *Acumulación del incremento del daño.*

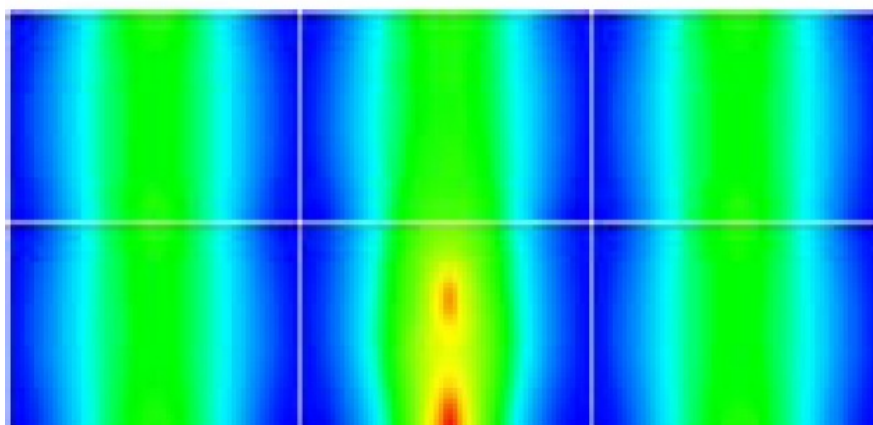
Este proceso de diseño es el primero en incluir la capacidad de incrementar daño con base en un mes (ó en medio mes dependiendo de las condiciones de congelamiento) a través del período de diseño. Esto aborda la intención para simular como el daño del pavimento ocurre en las disposiciones de su uso, incrementándole carga tras carga a través de períodos continuos de tiempo. La mejor ventaja de la acumulación de incremento de daños son los siguientes:

- El proceso de diseño de acumulación de daños es similar a como ocurre en el campo (en incremento).
- El incremento (típicamente mensual) son seleccionados para las combinaciones del clima (temperatura y humedad), cambios que podían causar modificaciones en las capas de materiales, cambios en juntas abiertas, cambios en cargas de tráfico, envejecimiento y cambios de propiedades de los materiales a través del tiempo.
- El efecto de las cargas de tráfico durante el período de día y de noche (diferencias entre el gradiente de temperatura) pueden ser considerados.



**Figura 2.5a. Grieta en la superficie de la losa<sup>8</sup>**

<sup>8</sup> Fig. 2.5a: Design Guide 2002. NCHRP. Rigid Paviment. Pag. 10.



### Tensiones críticas del fondo hacia arriba

**Figura 2.5b. Modelo de falla de una grieta en la superficie de la losa<sup>9</sup>**

#### *Análisis del Diseño de Prueba.*

El planteamiento es iterativo y comienza con la selección de un diseño de prueba, seleccionado con base en las experiencias de entidades de diseño de pavimentos ó a catálogos generales de diseño.

Cada diseño estratégicamente analizado incluye todos los detalles como espesor de capa inicial estimado, requerimientos de reparación para pavimentos existentes y características de los materiales. Las secciones de prueba son analizadas por el incremento acumulado de daño a través del tiempo usando la respuesta de la estructura de pavimento y modelos de comportamiento.

El resultado del análisis (esperado equivalente al daño a lo largo del tiempo) es usado para estimar el deterioro a lo largo del tiempo y el tráfico a través de modelos calibrados de deterioro.

<sup>9</sup> Fig. 2.5b: Design Guide 2002. NCHRP. Rigid Paviment. Pag. 10.

Las modificaciones son hechas para las estrategias de prueba y para fomentar iteraciones realizadas hasta un diseño satisfactorio que conozca los criterios de comportamiento y la obtención de un diseño de rehabilitación.

### ***Evaluación de pavimentos existentes para rehabilitación.***

La Guía de Diseño incluye procedimientos y orientación para la interpretación de la evaluación a nivel de proyecto de la estructura de pavimento para la identificación de las alternativas de rehabilitación y su diseño. También provee orientación para la determinación de los resultados que son considerados esenciales para los diferentes tipos de diseños de rehabilitación.

Algunos de los datos de entrada discutidos se incluyen:

- Las condiciones del pavimento por carril (deterioro, rugosidad, fricción de la superficie y deflexiones).
- Condiciones del punto de contacto del pavimento-hombros.
- Características del diseño del pavimento (espesor de la capa, características estructurales y requerimientos de construcción).
- Materiales y propiedades del suelo.
- Volúmenes de tráfico y cargas.
- Condiciones climáticas.
- Condiciones de drenaje.
- Factores geométricos (espacio para puentes).
- Aspectos de seguridad (consideración y localización de accidentes).
- Factores misceláneos (utilidades y espacios).

La categoría de la estructura se relaciona a estas propiedades y características que define la respuesta de las cargas de tráfico del pavimento.

La categoría de funcionalidad se relaciona a las características y propiedades de la superficie o revestimiento y la subrasante que definen la

rugosidad de la carretera ó a las características de la superficie que definen la resistencia friccional ó a otras características de seguridad de la superficie del pavimento.

El drenaje de la subrasante y materiales de durabilidad pueden afectar la condición funcional y estructural del pavimento. La condición de los hombros es muy importante en términos del tipo de selección de rehabilitación y en la influencia en el costo del proyecto.

Los factores misceláneos tales como condiciones de juntas de pavimentos de concreto y reflejo de grietas de la mezcla del pavimento son importantes condiciones generales del pavimento pero deben ser evaluadas solamente donde sean relevantes.

#### ***Identificación de las estrategias fiables de rehabilitación.***

Una estrategia fiable de rehabilitación es la única que dirige la causa del deterioro del pavimento y es efectivo en la reparación y prevención ó la minimización de recursos.

Una estrategia fiable de rehabilitación debe conocer restricciones tales como el control del tráfico. El tratamiento de las reparaciones son acciones tomadas para restaurar la integridad del pavimento tales como el relleno de un bache. Los tratamientos de prevención son acciones tomadas para detener ó demorar el proceso de deterioro, así por ejemplo una estructura de sobrecapa, reduce la deflexión crítica.

La estrategia de rehabilitación es definida como una combinación de reparación y tratamientos de prevención desarrollada sobre un período definido para restaurar la capacidad de un pavimento existente a transportar tráfico futuro esperado con un adecuado comportamiento funcional.

La siguiente es una lista de las opciones más comunes de rehabilitación que pueden ser aplicadas individualmente ó en combinación para obtener una estrategia efectiva de rehabilitación:

- Reconstrucción sin adiciones de carril.
- Reconstrucción con adiciones de carril.
- Sobrecapa estructural (puede incluir remoción y reemplazo de capas de pavimentos).
- Sobrecapa no estructural.
- Restauración sin sobrecapas (pavimentos de concreto hidráulico).

## 2.2 SISTEMA DE MANEJO DE INFORMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO A LARGO PLAZO (LTPP IMS)

### 2.2.1 INTRODUCCIÓN.

El Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP) en Estados Unidos hizo un programa de investigación de \$150 millones en 5 años.

#### El Estudio LTPP



**Fig. 2.6. Expansión del Estudio LTPP.<sup>10</sup>**

Este fue fundado a través de una ayuda de fondos de reservas repartidos por el Estado Federal de carreteras en Estados Unidos. El programa dirigió recomendaciones hechas por el Estado Oficial de Carreteras, representantes de la Industria e investigadores participantes en el Estudio Estratégico de Investigación de Transporte. El estudio fue hecho para

<sup>10</sup> Fig. 2.6: Instructor Manual Module 1-2. Página 1-2.5.



responder a varias tendencias que afectaban a la industria de las carreteras. El SHRP fue un programa estratégico porque se concentraba en una lista corta de actividades no saldadas donde aún pocos progresos se alcanzaban los cuales excedían de costos investigados.

Las actividades incluidas son: Asfalto, rendimiento del pavimento, concreto hidráulico y estructuras y operación de carreteras.

El programa LTPP fue diseñado como un programa de 20 años. Los primeros cinco años fueron completados bajo el programa SHRP, el programa LTPP pasó a ser manejado por los esfuerzos de La Administración Federal de Carreteras (FHWA) en Estados Unidos en julio de 1992. Al mismo tiempo la División de Realización del Pavimento de la Oficina de Investigación y Desarrollo asumió la responsabilidad para los restantes 15 años.

Los datos colectados están disponibles desde una base de datos conocido como el Sistema de Manejo de Información de la LTPP (LTPP IMS ó IMS). El programa LTPP recolectará datos de las secciones de pavimentos en estudio durante un período de 20 años. Los datos son colectados sobre formatos que se encuentran en la Guía de Colección de Datos para el Comportamiento del Pavimento a Largo Plazo y otros documentos ó en un formato de máquina lectora del equipo de monitoreo. El personal técnico calificado introduce los datos en el IMS e implementa un carácter de control de los procesos. La base de datos esta envuelta durante el programa LTPP para que coincidan los datos en la recolección y en las necesidades de los investigadores.

### **2.2.2 OBJETIVO DEL PROGRAMA LTPP.**

El objetivo que deja el programa LTPP fue establecer una fuerte aceleración en la búsqueda de innovación en las carreteras de América del

Norte: “Incrementar la vida del pavimento bajo la investigación del desempeño a largo plazo de varios diseños de estructuras de pavimentos y la rehabilitación de estructuras de pavimento usando diferentes materiales y bajo diferentes cargas, ambientes, suelos de subrasantes y practicas de mantenimiento.” (FHWA).

A partir de este amplio objetivo, se establecieron seis objetivos específicos para el programa LTPP:

- Evaluar los métodos de diseño existentes.
- Perfeccionar el desarrollo de la metodología de diseño y estrategias para la rehabilitación de pavimentos existentes.
- Perfeccionar el desarrollo de las ecuaciones para pavimentos nuevos y reconstruidos.
- Determinar los efectos de carga, medio ambiente, variabilidad y propiedad de los materiales, calidad en la construcción y nivel de mantenimiento sobre pavimentos agrietados y en ejecución.
- Determinar los efectos de las características de los diseños específicos en los pavimentos en ejecución.
- Establecer una base de datos a nivel norteamericano para pavimentos de largo plazo que apoye los objetivos de la SHRP para futuras necesidades.

### **2.2.3 LOS EXPERIMENTOS DE LA LTPP.**

El programa LTPP tiene dos experimentos complementarios para conocer los objetivos. El Estudio General del Pavimento (GPS) usa pavimentos existentes tanto pavimentos en uso ó después de la aplicación de la primera capa. El segundo estudio de los experimentos del programa LTPP es el Estudio Específico del Pavimento (SPS). Estos estudios son diseñados para conocer los objetivos que los experimentos del GPS no pueden conocer completamente.

Los experimentos de la SPS frecuentemente requieren de nuevos pavimentos construidos. El programa LTPP IMS ha sido diseñado para ayudar a los experimentos y proveer una manera uniforme para recolectar y distribuir los datos de la LTPP. Las secciones de prueba están en Estados Unidos y Canadá. Una variedad de información es recolectada para sección de pavimento incluyendo actividades de construcción y mantenimiento, propiedades de los materiales, estructuras y características de la superficie, cargas que soporta el pavimento e información climática.

#### **2.2.4 ESTUDIOS GENERALES DEL PAVIMENTO.**

Los Estudios Generales del Pavimento (GPS) usan secciones de pavimentos existentes nominados por el Estado y el provincial Departamento de Transporte (DOT) para conocer oficialmente los criterios experimentales. La SHRP y la División de Desarrollo del Pavimento de la FHWA eligieron las secciones existentes. Las secciones son pavimentos cuyos materiales y diseño estructural reflejan las prácticas estándar en los Estados Unidos y Canadá. Un ejemplo de diseño estadístico describe el criterio para cada experimento. Los ejemplos de diseño consisten de una combinación de estructuras de pavimentos, tráfico y factores que afectan la ejecución del pavimento. La Tabla 2.1 muestra la descripción de los diferentes estudios.

Al comienzo de los experimentos de los GPS, las secciones de prueba fueron asignadas para especificar celdas en los ejemplos de diseño basados en la estructura, materiales, tráfico, subrasante y a la zona donde esta la estructura. La actividad de la recolección de datos en el estudio LTPP fueron usados para confirmar las asignaciones. El plan GPS citados para aproximadamente 1100 secciones de pruebas de pavimentos a través de Norte América.

**Tabla 2.1. Definiciones de los Estudios Generales del Pavimento<sup>11</sup>**

<b>Experimento</b>	<b>Definición</b>
GPS-1	Concreto Asfáltico sobre base granular
GPS-2	Concreto Asfáltico sobre base confinada
GPS-3	Concreto con junta de refuerzo
GPS-4	Concreto con junta simple
GPS-5	Concreto con refuerzo continuo
GPS-6A	Capa existente de concreto asfáltico sobre pavimento de concreto asfáltico
GPS-6B	Nueva capa de concreto asfáltico sobre pavimento de concreto asfáltico
GPS-7A	Capa existente de concreto hidráulico sobre pavimentos de concreto de cemento Pórtland
GPS-7B	Nueva capa de concreto asfáltico sobre pavimentos de concreto de cemento Pórtland
GPS-9	pavimentos de concreto de cemento Pórtland sin confinar sobre pavimentos de concreto de cemento Pórtland

#### **2.2.4.1 ESTUDIO ESPECÍFICO DEL PAVIMENTO**

El Estudio Específico del Pavimento (SPS) está intentando recolectar datos confiables a través de un período fijo en la vida de la sección de pavimento para mejorar la predicción de la ejecución del pavimento y desarrollar un nuevo diseño de ecuaciones. El proyecto SPS suministra la comparación necesaria para investigar y cuantificar los factores que son importantes en la predicción de grietas y funcionamiento del pavimento. Un

<sup>11</sup> Tabla N° 2.1: Long-Term Pavement Performance Information Management System Data Users' Reference Manual. Pág. 4.

proyecto del SPS consiste de una serie de secciones en una localización sencilla.

Las secciones varían en estructuras o tratamientos de mantenimiento o estrategias de rehabilitación con otros factores que serían similares. Algunos factores importantes tales como métodos de drenaje no pueden ser propiamente estudiados usando secciones del GPS porque los métodos de rango deseados no pueden ser encontrados entre pavimentos existentes.

Estudios de mantenimiento preventivo y rehabilitación requieren duplicados de tratamientos variados sobre diversas secciones para comparar alternativas.

**Tabla 2.2. Definiciones del Estudio Específico del Pavimento<sup>12</sup>**

<b>Experimento</b>	<b>Definición</b>
SPS-1	Estudio estratégico de factores estructurales para pavimentos flexibles.
SPS-2	Estudio estratégico de factores estructurales para pavimentos rígidos.
SPS-3	Efectividad en el mantenimiento preventivo de pavimentos flexibles.
SPS-4	Efectividad en el mantenimiento preventivo de pavimentos flexibles.
SPS-5	Rehabilitación de pavimentos de concreto asfálticos.
SPS-6	Rehabilitación de pavimentos de concreto hidráulicos con juntas.
SPS-7	Capas de concreto hidráulico confinado sobre concreto hidráulico.
SPS-8	Estudio de Efectos ambientales en la ausencia de cargas pesadas
SPS-9	Validación de las especificaciones de asfalto del SHRP y diseño combinado (Superpave).

<sup>12</sup> Tabla N° 2.2: Long-Term Pavement Performance Information Management System Data Users' Reference Manual. Pág. 5.

En la Tabla 2.2 se enlistan los nueve Estudios Específicos del Pavimento. El diseño del experimento original nominado por aproximadamente 1600 secciones construidas en 200 localizaciones.

Una ventaja del programa es la habilidad para monitorear el funcionamiento y el tráfico desde la fecha inicial de construcción ó la apertura al tráfico. Esto establece un proyecto específico y determina una base de datos comprensiva. Los datos pueden ser usados para explicar el funcionamiento de cada sección de prueba de pavimento. Las agencias estatales y provinciales de carreteras nominaron los sitios por el programa SPS. El FHWA los aprobó cuando ellos introdujeron el estudio del ejemplo de diseño estadístico. Cada proyecto SPS requiere cooperación considerable entre las agencias estatales y provinciales de carreteras y el LTPP para garantizar que la construcción y mantenimiento se unan a los requerimientos de estudio.

Mientras que los estudios se han descrito separadamente para simplificar los experimentos, los resultados de las pruebas GPS y SPS son complementarios. Algunas secciones de pruebas de pavimentos son usadas para ambos experimentos. Esta recolección de datos aproximados ha sido para identificar los datos detallados para los experimentos GPS y SPS que son de alta prioridad para alcanzar la meta de los estudios LTPP.

#### **2.2.4.2 PROGRAMA DE MONITOREO ESTACIONAL**

El objetivo primario del Programa de Monitoreo Estacional (SMP) es para proporcionar información sobre las variaciones en la temperatura y el contenido de humedad en la estructura de pavimento. Los recursos limitados hacen imposible la obtención detallada del impacto climático sobre todas las secciones. Para obtener el máximo beneficio de los recursos disponibles de los

sesenta y cuatro sitios fueron seleccionados como el corazón del grupo. Los sitios GPS y SPS están incluidos. Los sitios están divididos en dos grupos. Cada grupo es intensamente monitoreado en años alternados. Los datos del clima son recolectados continuamente a lo largo del año. El monitoreo del esfuerzo del pavimento es conducido mensualmente durante el año. La medición de las características de la superficie es obtenida al menos por temporadas durante el año. Se ha supuesto un mínimo de tres ciclos de monitoreo alrededor de seis años.

Los datos del clima para el programa de LTPP se derivan a partir de dos fuentes: bases de datos públicas del clima y estaciones meteorológicas en sitio.

Los datos de las bases de datos públicas del clima, del Centro de Datos Climático Nacional (NCDC) y del Centro Climático Canadiense (CCC) se utilizan para crear una estación estadística meteorológica "virtual" para todos los sitios de prueba (incluso éstas con las estaciones meteorológicas en sitio). Esta estación meteorológica virtual consiste en la estadística promedio entre la carga-distancia del clima de hasta cinco estaciones meteorológicas próximas.

Además de la estación meteorológica virtual estadística, los datos de la estación meteorológica usados en los cómputos también se almacenan en el IMS.

La información del drenaje contenida en el IMS incluye la presencia y el tipo de características subsuperficies del drenaje, tales como capas permeables, de drenes transversales, y de drenes longitudinales (ver sección 2.4 de Drenajes). No hay actualmente medidas de la eficacia o del funcionamiento de las características del drenaje (la mejor fuente de la información sobre el efecto del drenaje en el pavimento, será la comparación de las secciones drenadas y no drenadas en proyectos del SPS).

Algunos proyectos del GPS contienen drenes del borde, pero éstos no fueron incluidos como factor experimental primario.

#### **2.2.4.3 DESARROLLO DE LA BASE DE DATOS DEL LTPP.**

Muchos factores fueron considerados durante el desarrollo de la base de datos y de la selección de los datos para ser guardados en el LTPP IMS. Los tipos de datos incluidos fueron basados en tecnología disponible, utilidad de los datos esperados, efectos anticipados sobre el funcionamiento del pavimento y los costos asociados a la recolección de datos contra los beneficios anticipados. Para la grabación y recolección de los datos en el LTPP IMS, la calidad de los datos y la “veracidad de la información” son extremadamente importantes. Los procesos claros y estándar fueron establecidos y son observados para la recolección y grabación de los datos. Estos procesos ayudan a garantizar la consistencia y la calidad de los datos recolectados. El chequeo extensivo de la calidad de los datos es desempeñado durante todo ese proceso. La información también está disponible mostrando la confiabilidad para el grupo de datos establecidos.

Durante toda la selección, acumulación y proceso de grabación, la filosofía básica del programa LTPP ha sido de proveer una alta calidad de los datos recolectados en una manera correcta y consistente estadísticamente.

#### **2.2.4.4 ESTRUCTURA DEL LTPP IMS**

El LTPP IMS es organizado en dos filas compuestas de cuatro oficinas regionales y un Contratista para Asistencia Técnica (TAC) en la supervisión de la central IMS.



Las oficinas regionales fueron establecidas para coordinar y comunicar las actividades relacionadas al LTPP en Estados Unidos y Canadá. Cada región es responsable de un grupo específico de estados y provincias.

*Las oficinas regionales se enfocan en:*

- La recolección de datos realizado directamente por el personal regional o suministrado a ellos desde los SHA u otro contratista.
- La entrada de datos en el IMS de datos son suministrados en papel o en forma electrónica.
- Control de la calidad de los datos.

*El Contratista para Asistencia Técnica es responsable de:*

- La recolección de datos, entrada y control de calidad de los datos climáticos.
- La confianza en la calidad de los datos del LTPP.
- Suministrar los datos al público.

#### **2.2.4.5 PARTICIPACIÓN INTERNACIONAL**

Treinta países participan en el estudio del LTPP. Australia, Austria, Finlandia (para los países nórdicos), Japón, Holanda y el Reino Unido tienen adoptado el LTPP IMS para la entrada y procesamiento de datos en sus propios estudios de LTPP. Cada país usando el LTPP IMS, tiene hecho a la medida su base de datos para el software, tipos de datos y métodos de prueba únicos para cada país. El LTPP tiene copias de algunos datos internacionales guardados separadamente de los del LTPP IMS.

#### **2.2.4.6 TIPOS DE DATOS COLECTADOS**

La sección de prueba LTPP esta clasificado en siete módulos:

- Inventario.
- Prueba de Materiales.
- Clima.
- Mantenimiento.
- Rehabilitación.
- Tráfico.
- Monitoreo.
  - ✓ Grietas automatizadas.
  - ✓ Grietas manuales.
  - ✓ Fricción
  - ✓ Perfil longitudinal
  - ✓ Perfil cruzado.
  - ✓ Deflexión.

## **2.3 DATOS DE ENTRADA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS NUEVOS**

### **2.3.1 TRAFICO**

#### **2.3.1.1 INTRODUCCIÓN**

En el método AASHTO vigente, los pavimentos se proyectan para que resistan un determinado número de cargas durante su vida útil. El tráfico está compuesto por vehículos de diferentes pesos y número de ejes, y para los efectos de cálculo, se les transforma en un número equivalente de ejes tipo, de 80 kN ó 18 kips el cual se les denomina Ejes Equivalentes ó ESAL (equivalent simple axial load).

Las diferentes cargas actuantes sobre un pavimento producen diferentes tensiones y deformaciones en el mismo. Además, diferentes espesores de pavimentos y diferentes materiales responden de diferente manera a una misma carga. Como las diferentes cargas producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, las fallas serán distintas. Para tener en cuenta estas diferencias, el tránsito es reducido a un número equivalente de ejes de una determinada carga que producirán el mismo daño que toda la composición del tránsito.

El enfoque de ESAL ya no es más usado como un dato de entrada directa en el diseño. En pocos casos, los espectros de carga serán convertidos en ESAL internamente dentro del software como manera de hacer uso de modelos matemáticos previos que no los han convertido a una base de espectros de carga. El software usa el número de vehículos pesados como un

indicador global de la magnitud de la carga del tráfico de vehículos FHWA de la clase 4 en adelante.

### 2.3.1.2 CLASIFICACIÓN Y DEFINICIÓN DE VEHÍCULOS SEGÚN FHWA.

El esquema de la clasificación de la FHWA (Administración Federal de Carreteras) es separado en categorías dependiendo si el vehículo lleva pasajeros o si es vehículo comercial. Los vehículos sin pasajeros son fundamentalmente subdivididos por el número de ejes y el número de unidades incluyendo unidades de remolque y maquinaria pesada.

La clasificación de los vehículos automáticos necesita un algoritmo para interpretar la información del espaciamento entre ejes y clasificarlos correctamente en estas categorías. El algoritmo más comúnmente utilizado esta basado en el “Esquema F” desarrollado por Maine DOT a mediados de 1980.

#### COMPOSICIÓN VEHICULAR SEGÚN FHWA.

- *CLASE 1. **Motocicletas***<sup>13</sup>: Vehículos motorizados de dos o tres ruedas. Los vehículos típicos en esta categoría tienen asientos tipo sillas de montar y son conducidos por barras manejables en vez de timón. Esta categoría incluye motocicletas, motocicletas de tres ruedas, bicicletas con motor, patinetas con motor.

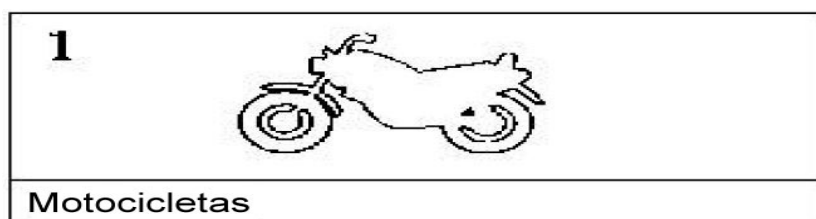


Fig. 2.7

<sup>13</sup> FHWA Vehicle Classification Scheme F Report

- **CLASE 2. Vehículos para pasajeros<sup>14</sup>:** Son todos los tipo sedan, cupés, carruajes manufacturadas primordialmente para el propósito de transportar pasajeros e incluye a los vehículos para pasajeros que funcionan para jalar remolques recreativos ó livianos.

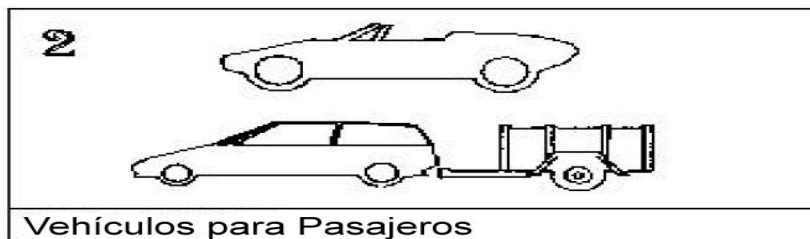


Fig. 2.8

- **CLASE 3. Unidades de vehículos simples, dos ejes, cuatro llantas<sup>15</sup>:** Son otros vehículos para pasajeros de dos ejes, cuatro llantas. En esta clasificación se incluyen los pickups, tipo panel, camionetas y otros vehículos tales como casas rodantes, ambulancias, coches fúnebres y microbuses. Otros vehículos de unidades simples de dos ejes y cuatro llantas que están incluidos en esta clasificación son los que jalan remolques livianos y recreativos.

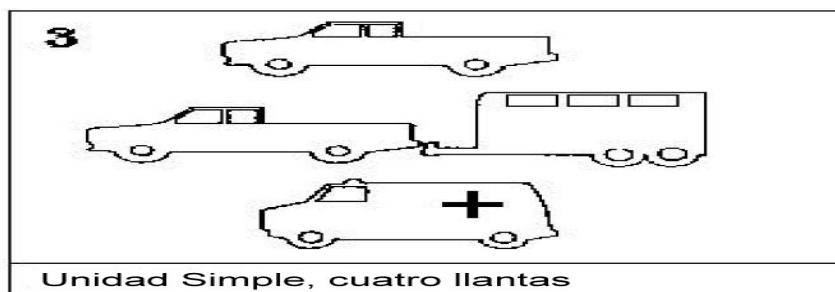


Fig. 2.9

- **CLASE 4. Buses<sup>16</sup>:** Son todos los buses manufacturados para el transporte de personas con dos ejes y seis llantas ó tres ejes ó más

<sup>14</sup> FHWA Vehicle Classification Scheme F Report

<sup>15</sup> FHWA Vehicle Classification Scheme F Report

<sup>16</sup> FHWA Vehicle Classification Scheme F Report

llantas. Esta categoría incluye solamente buses tradicionales (incluye buses escolares) funcionando como vehículos para transportar pasajeros. Los buses modificados podrían ser considerados para ser camiones y ser clasificados apropiadamente.

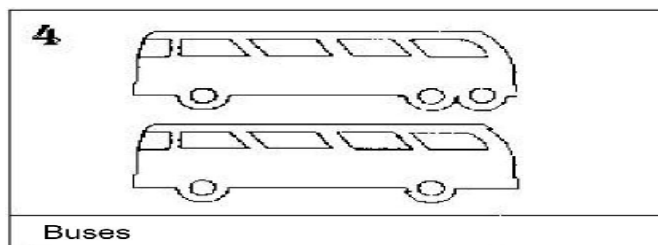


Fig. 2.10

- **CLASE 5. Unidades de camiones simples, dos ejes, seis llantas<sup>17</sup>:** Son todos los vehículos de una simple armazón incluyendo camiones, vehículos recreativos y para acampar, casas rodantes, etc. que tienen dos ejes y doble llantas posteriores.

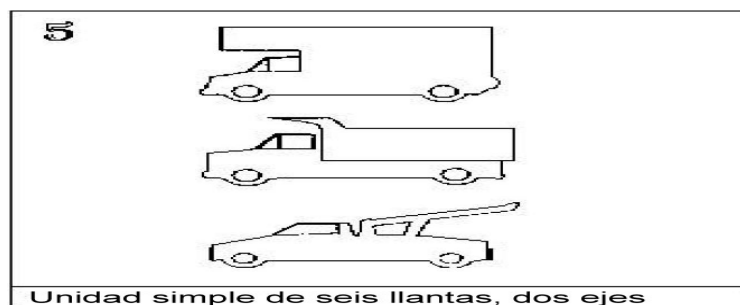


Fig. 2.11

- **CLASE 6. Unidades de camiones simples de tres ejes<sup>18</sup>:** Son todos los vehículos de una sola armazón incluyendo camiones, vehículos recreativos y para acampar, casas rodantes, etc. que tienen tres ejes.

<sup>17</sup> FHWA Vehicle Classification Scheme F Report

<sup>18</sup> FHWA Vehicle Classification Scheme F Report

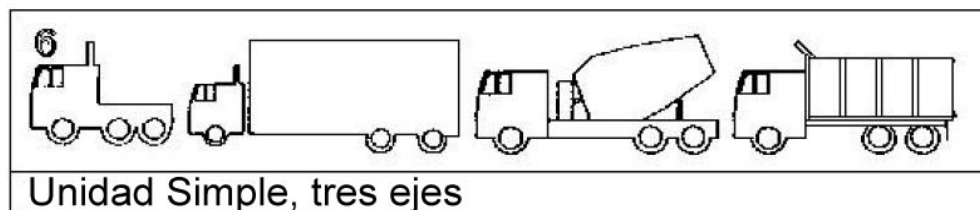


Fig. 2.12

- **CLASE 7. Unidades de camiones simples de cuatro ó más ejes:** Son todos los camiones de una sola armazón con cuatro ó más ejes.



Fig. 2.13

- **CLASE 8. Camiones de remolque simple de cuatro ó menos ejes<sup>19</sup>:** Son todos los vehículos con cuatro ó menos ejes que consiste de dos unidades, una de las cuales es un camión con remolque ó una unidad de camión ó directamente un camión de carga.



Fig. 2.14

- **CLASE 9. Camiones de remolques simples de cinco ejes<sup>20</sup>:** Son todos los vehículos que consisten de dos unidades, una de las cuales es un camión con remolque ó directamente un camión de carga.

<sup>19</sup> FHWA Vehicle Classification Scheme F Report

<sup>20</sup> FHWA Vehicle Classification Scheme F Report

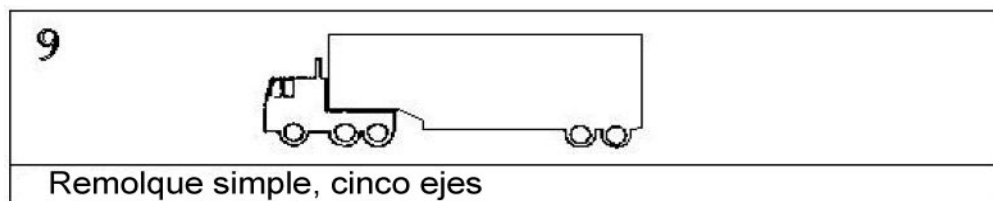


Fig. 2.15

- **CLASE 10. Camiones de remolque simple con seis ó más ejes<sup>21</sup>:** Son todos los vehículos con seis ó más ejes que consisten de dos unidades, una de las cuales es un camión con remolque ó directamente un camión de carga.

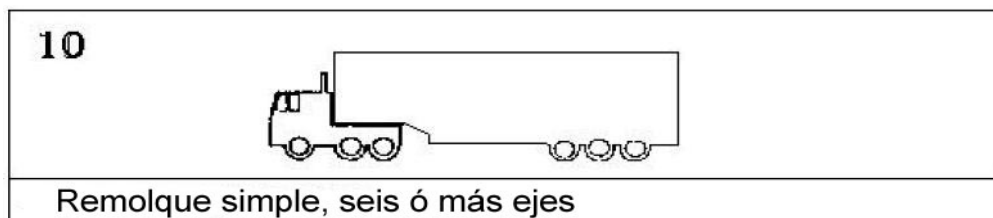


Fig. 2.16

- **CLASE 11. Camiones de remolque múltiple con cinco ó menos ejes<sup>22</sup>:** Son todos los vehículos con cinco ó menos ejes que consisten de tres ó más unidades, una de las cuales es un camión con remolque ó directamente un camión de carga.



Fig. 2.17

<sup>21</sup> FHWA Vehicle Classification Scheme F Report

<sup>22</sup> FHWA Vehicle Classification Scheme F Report



- **CLASE 12. Camiones de remolque múltiple de seis ejes<sup>23</sup>:** Son todos los vehículos que consisten de tres ó más unidades, una de las cuales es un camión con remolque ó directamente un camión de carga.

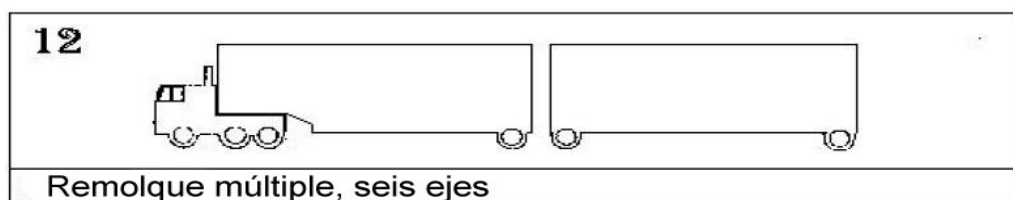


Fig. 2.18

- **CLASE 13. Camiones de remolque múltiple con siete ó más ejes<sup>24</sup>:** Son todos los vehículos con siete ó más ejes que consisten de tres ó más unidades, una de las cuales es un camión con remolque ó directamente un camión de carga.

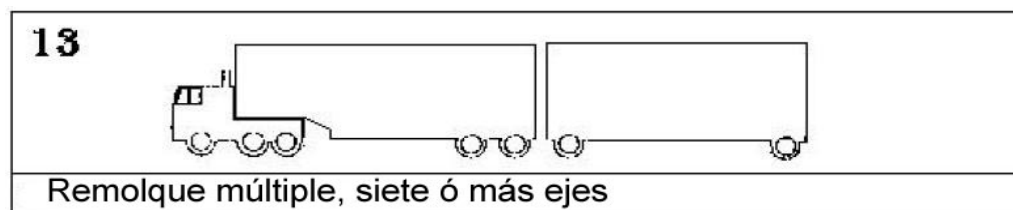


Fig. 2.19

Los vehículos en la clasificación de FHWA del 1 al 4 no contribuyen significativamente a los 80 kN (18 kips) de los ESAL y por lo tanto son generalmente ignorados en el proceso de cálculo simple de los ESAL.

<sup>23</sup> FHWA Vehicle Classification Scheme F Report

<sup>24</sup> FHWA Vehicle Classification Scheme F Report

### **2.3.1.3 DESCRIPCIÓN DE LA JERARQUÍA USADA EN LA CARACTERIZACIÓN DEL TRÁFICO.**

Los datos completos del espectro de eje-carga para cada tipo de eje son necesarios para la nueva Guía de Diseño en procedimientos de diseño de pavimentos nuevos y rehabilitación. Sin embargo, algunas instituciones no tienen los recursos necesarios para la recolección detallada de datos a través de los años sobre tránsito para caracterizarlo exactamente el a futuro para el diseño. Para facilitar el uso de la Guía a pesar del nivel de detalle disponible de estos datos, se adoptó una jerarquía para el desarrollo de la entrada de tráfico requerido para el diseño de pavimentos nuevos y rehabilitación.

La Guía define tres amplios niveles de datos de entrada para tráfico basado en la cantidad de datos disponible. Estos niveles representan cómo el diseñador correctamente puede estimar características de tráfico de vehículos a futuro para la vía que es diseñada. Los tres niveles pueden ser definidos así:

- Nivel 1: Hay muy buen conocimiento de las características pasadas y futuras del tráfico.
- Nivel 2: Hay un conocimiento modesto de las características pasadas y futuras del tráfico.
- Nivel 3: Hay un conocimiento pobre de las características pasadas y futuras del tráfico.

Los volúmenes y pesos de vehículos pueden variar considerablemente de vía en vía y aún de lugar en lugar a lo largo de la carretera. Así, puede ser obtenido un buen conocimiento de las cargas de tráfico en el lugar donde los volúmenes y cargas pasados han sido recolectados a lo largo o cerca del segmento de carretera que será diseñada. Los datos adquiridos por el monitoreo de tráfico, son utilizados para establecer las características futuras

del tráfico, proporcionando al diseñador un alto nivel de confianza en la exactitud del tráfico del vehículo usado en diseño.

**Nivel 1: Muy buen conocimiento de las características del tráfico.**

El nivel 1 requiere la reunión y el análisis histórico de datos de cargas y volúmenes de tráfico de sitios específicos. Los datos del tráfico medidos cerca ó en el sitio deben incluir el conteo y clasificación del número de los vehículos que viajan sobre la vía, junto con el análisis por carril y dirección, midiendo las cargas por eje para cada clase de vehículo y así determinar el tráfico de vehicular al primer año después de la construcción. El nivel 1 se considera el más exacto porque utiliza los pesos reales por eje y las distribuciones del volumen de tráfico del vehículo medidos sobre ó cerca al sitio del proyecto.

**Nivel 2: Conocimiento modesto de las características del tráfico.**

El nivel 2 requiere que el diseñador recolecte bastante información del volumen de vehículos en el sitio para medir volúmenes exactos. Esto incluye poder explicar cualquier variación de volumen los días de semana, fines de semana y cualquier tendencia estacional significativa en las cargas de los vehículos (en las áreas afectadas por los transportes pesados, agrícolas). Los pesos de los vehículos se toman de los resúmenes regionales de los pesos mantenidos por cada estado o sitio que se utilizan para distinguir las rutas con cargas pesadas (es decir, camiones cargados), contra los ligeros (es decir, los camiones descargados). Los análisis de los espectros de carga por eje regionales para cada clase de vehículo son completados en forma externa al módulo del tráfico.

**Nivel 3: Conocimiento pobre de las características del tráfico.**

Se utiliza el nivel 3 cuando el diseñador tiene poca información del volumen de vehículos de la vía en cuestión (por ejemplo, si solo está disponible un valor para el tráfico promedio diario anual [TPDA] y un porcentaje de vehículos). Este nivel comienza con un TPDA y el porcentaje de vehículos ó de

conteos de volúmenes simples de vehículos sin conocimiento específico del sitio (ó segmento específico) y con el conocimiento del tamaño de las cargas que están llevando. Esta carencia de conocimiento de cargas significa que se debe utilizar una distribución de carga regional promedio o estatal (u otra distribución de carga por defecto). Un estimado de entradas de tráfico basadas en experiencias locales, también es considera en el nivel 3.

#### **2.3.1.4 DATOS DE ENTRADA REQUERIDOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL TRÁFICO.**

Se requieren cuatro tipos básicos de datos de tráfico para el diseño estructural de pavimento:

- Volumen de tráfico - Información año base.
- Factores de ajuste del volumen de tráfico.
  - Ajuste mensual.
  - Distribución de la composición vehicular.
  - Distribución horaria de vehículos.
  - Factores de crecimiento de tráfico.
- Factores de distribución de carga por eje.
- Entradas generales de datos de tráfico.
  - Número de ejes/vehículos
  - Configuración de eje.
  - Distancia entre ejes.

##### ***Volumen de tráfico – Información año base.***

El año base para las entradas de datos del tráfico se define como el primer año que el segmento de carretera bajo diseño es abierto al tráfico. Es requerida la siguiente información del año base:

- Tráfico promedio diario anual para doble sentido (TPDA).

- Número de carriles en la dirección de diseño.
- Porcentaje de vehículos en la dirección de diseño.
- Porcentaje de vehículos en carril de diseño.
- Velocidad de diseño del vehículo.

*Tráfico Promedio Diario Anual para Doble Sentido.*

El TPDA para doble sentido es el volumen total del tráfico de vehículos (es decir, el número total de los vehículos pesados [clases 4 a 13] en el flujo vehicular) que pasa un punto o un segmento del camino que se diseñará en ambas direcciones durante un período de 24 horas. Se obtiene comúnmente de los conteos de tráfico, de modelos de pronóstico de tráfico y de modelos de generación de viajes durante un período dado (diversos conteos de 24 horas menores a un año). El TPDA es simplemente el número total de tráfico vehicular del período dado dividido por el número de días en ese período. Se define el año base TPDA como sigue:

- Nivel 1: El TPDA estimado de agencias en sitios específicos, datos de conteos de vehículos ó pronóstico de tráfico y los modelos calibrados de generación de viajes. Se recomienda que el promedio de tres los años más recientes con datos adecuados, sea utilizado como el año base del TPDA. Este valor medio puede necesitar ser ajustado para explicar el crecimiento del tráfico vehicular dependiendo de la cantidad de tiempo entre los tres años históricos y el año base.
- Nivel 2: El TPDA estimado regional ó datos de conteos de vehículos o de modelos regionalmente calibrados de pronósticos de tráfico y de modelos de generación de viajes. Se recomienda que el promedio de los tres años anteriores al año base, se utilice como el año base para el TPDA.
- Nivel 3: El TPDA es estimado del TPD (Tráfico Promedio Diario) obtenido sobre todo de conteos de tráfico y de una estimación del porcentaje de los vehículos esperados en el flujo vehicular. El TPDA y el porcentaje de

los vehículos (clases de vehículo 4-13) debería ser promediado sobre los tres años con datos más recientes con datos. Las estimaciones basadas en experiencias locales también se consideran en el nivel 3.

*Número de carriles en la dirección de diseño.*

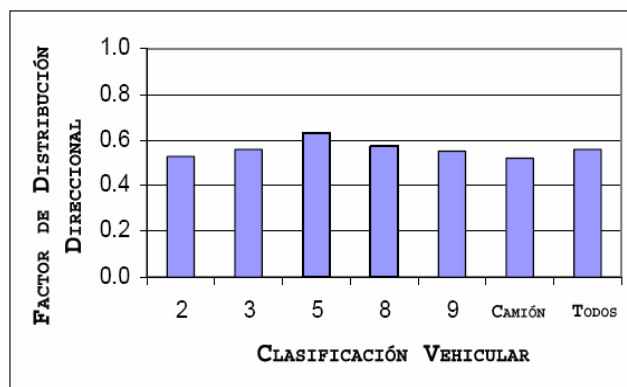
El número de carriles en la dirección de diseño es determinado de las especificaciones de diseño y de la representación del número de carriles en una dirección.

*Porcentaje de vehículos en la dirección de diseño.*

El porcentaje de vehículos en la dirección de diseño ó el Factor de Distribución Direccional (DDF) es usado para cuantificar alguna diferencia en el volumen total de vehículos en dos direcciones. El nivel de entrada de porcentajes de vehículos en la dirección de diseño es descrito a continuación:

- Nivel 1: Factor de distribución direccional en un sitio específico es determinado por programas de conteo, datos y conteo vehicular.
- Nivel 2: El DDF para un área regional es determinado de datos y conteo vehicular. Se puede utilizar las estimaciones de modelos de generación de viajes.
- Nivel 3: Un valor promedio nacional ó un estimado basado en la experiencia local.

El software de la guía de diseño provee un valor por defecto (Nivel 3) de 55% para facilitar el cálculo de tipo interestatal facilitando datos de tráfico de la base de datos del LTPP. La Figura 2.20 muestra el DDF principal para las clases vehiculares (2, 3, 5, 8 y 9), el total de tráfico de vehículos y todos los vehículos combinados (obtenidos de los datos del LTPP).



**Figura 2.20. Factores de distribución direccional calculados para diferentes clases de vehículos usando datos del LTPP.<sup>25</sup>**

Con la excepción de la clasificación vehicular 5, lo observado en los DDF los cuales encuentran en el rango de 0.5 a 0.6. Estos valores calculados usando datos de la base de datos de tráfico del LTPP se muestran a continuación:

- Vehículos clase 4, buses es de 0.50, excepto para rutas de buses locales o municipales. Para rutas locales, el DDF varía entre 0.8 a 1.0.
- Vehículos clases 5 a 7, camiones de unidades simples es de 0.62. Estos tipos de camiones consistentemente tienen factores de distribución direccional más grandes.
- Vehículos clases 8 a 10, remolques, camiones de remolque es de 0.55.
- Vehículos clases 11 a 15, camiones de multi-remolque es de 0.50.

Los valores por defecto ó nivel 3 para el DDF deben ser representados para el tipo predominante de vehículo usado en la carretera. Si el detallado de los datos de tráfico de vehículos no están disponibles en el sitio específico ó

<sup>25</sup> Parte 2, Capítulo 4: Traffic. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.4.9.

regional, se sugiere usar el DDF del vehículo más común (vehículo clase 9) como valor por defecto para todo el tráfico vehicular.

*Porcentaje de vehículos en el carril de diseño.*

El porcentaje de vehículos en el carril de diseño ó el factor de distribución por carril (LDF) es el informe para la distribución del tráfico de vehículos entre los carriles en una dirección. Para dos carriles, doble sentido en las autopistas (un carril en una dirección), el factor es de 1.0 debido a que todo el tráfico de vehículos en una dirección debe usar el mismo carril. Para múltiples carriles en una dirección, depende del TPDA y otras condiciones geométricas y específicas del sitio. El nivel de entrada de datos del LDF es descrito a continuación:

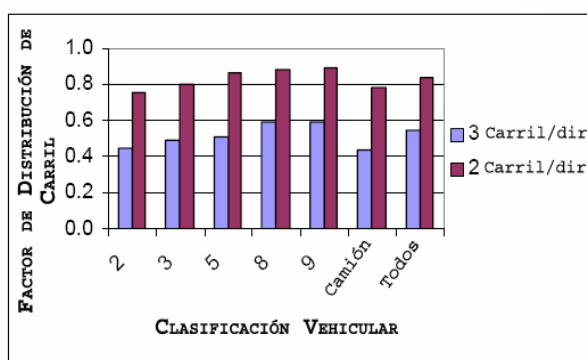
- Nivel 1: El factor de distribución por carril en un sitio específico es determinado por datos de programas de conteo ó datos de conteos vehiculares.
- Nivel 2: El factor de distribución por carril en una región es determinado por datos de programas de conteo ó datos de conteos vehiculares.
- Nivel 3: El valor promedio nacional ó estimado obtenido de pronósticos de tráfico y modelos de generación de viajes. También se consideran en el nivel 3 datos estimados basado en experiencias locales.

En la Figura 2.21 se muestran los factores de distribución por carril calculados para la clasificación vehicular 2, 3, 5, 8, 9, todos los camiones y todos los vehículos para carreteras de 2 y 3 carriles/direcciones usan datos del LTPP. En general, el LDF para carreteras de dos carriles/dirección es de 0.89 para camiones clase 9 y 0.78 para todos los demás camiones. Para carreteras de 3 carriles/direcciones, el LDF es de 0.59 para camiones clase 9 y 0.43 para todos los demás camiones. Los valores por defecto (Nivel 3) recomendados para



usarse basados en el LDF para los tipos más comunes de camiones (camiones clase 9) es el siguiente:

- Carreteras de carril simple en una dirección, LDF=1.00.
- Carreteras de carril doble en una dirección, LDF=0.90.
- Carreteras de carril triple en una dirección, LDF=0.60
- Carreteras de carril cuádruple en una dirección, LDF=0.45.



**Figura 2.21. Factores de distribución por carril para cuatro y seis carriles en carreteras.<sup>26</sup>**

#### Velocidad operacional del vehículo.

La velocidad operacional de vehículos ó la velocidad promedio de viaje generalmente depende de muchos factores incluyendo el tipo de funcionalidad de la carretera (primaria ó diferente), terreno, porcentaje de vehículos en el flujo de tráfico, etc. Una descripción detallada de la metodología usada para la determinación de la velocidad operacional, se puede encontrar en La Política de Diseño de Calles y Autopistas de AASHTO (denominado también como el Libro Verde). El software de la Guía de Diseño usa como velocidad operacional por defecto el valor de 60 mph, pero puede ser modificada para reflejar las condiciones locales del sitio.

<sup>26</sup> Parte 2, Capítulo 4: Traffic. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.4.11.

### ***Ajuste del volumen de tráfico.***

Los siguientes factores de ajustes de volumen de tráfico de vehículos son requeridos para la caracterización del tráfico:

- Factores de ajuste mensual.
- Factores de distribución para la composición vehicular.
- Factores de distribución vehicular horaria.
- Factores de crecimiento del tráfico.

### ***Factores de ajuste mensual.***

Los factores de ajuste mensual del tráfico de vehículos, simplemente representa la proporción anual del tráfico de vehículos para la composición vehicular dada, que ocurre en un mes específico. En otras palabras, esto es igual al tráfico de vehículos mensual para la composición vehicular dada en el mes, dividido por el total del tráfico de vehículos de la composición vehicular en un año. Los factores de ajuste mensual (MAF) del tráfico de vehículos dependen de factores tales como utilización del suelo adyacente, la localización de industrias en el área y la localización de la carretera (urbana o rural). En realidad, las diferencias mensuales de la distribución de tráfico vehicular podrían variar en el curso de varios años durante la vida del pavimento.

Las variaciones mensuales en los volúmenes de tráfico son específicas en el sitio y dependen también de la economía local. Se especifican los siguientes niveles de entradas a continuación:

- Nivel 1: **En el sitio ó en segmento específico** el MAF para cada clase de vehículo (clase 4 a 13) son obtenidos de conteos automatizados, de datos de conteos vehiculares particulares ó de modelos de generación de viajes.
- Nivel 2: **Regional**, el MAF para clase de vehículos (clase 4 a13) son obtenidos de conteos automatizados, de datos de conteos vehiculares particulares ó de modelos de generación de viajes.

- Nivel 3: Un MAF **nacional** que son obtenidos de conteos automatizados, de datos de conteos vehiculares particulares. Es considerado también el uso de estimaciones basadas en experiencias locales.

A pesar de las fuentes de los datos de tránsito, las instituciones pueden desarrollar los factores de ajuste mensual para diferentes tipos de vías así:

1. Para los datos de tráfico dados (24 horas de recolección de datos continuas), determinar el número total de vehículos (en una composición dada) para cada período de 24 horas. Si los datos no fueron obtenidos en un período entero de 24 horas, el tráfico de vehículos diarios medidos deberían ser ajustados para ser representativos de un período de 24 horas.
2. Usar datos representativos diarios recolectados en los diferentes meses en un año, determinar el tráfico promedio diario de vehículos para cada mes en el año.
3. Resumir el tráfico promedio diario de vehículos para cada mes durante todo el año.
4. Calcular los factores de ajuste mensual dividiendo el tráfico promedio diario de vehículos para cada mes entre la sumatoria del tráfico promedio diario de vehículos para el año entero y multiplicándolo por 12 como sigue a continuación:

$$MAF_i = \frac{AMDTT_i}{\sum_{i=1}^{12} AMDTT_i} \times 12 \quad (2.1)$$

Donde:

$MAF_i$ : Factor de ajuste mensual para el mes  $i$ .

$AMDTT_i$ : Tráfico promedio diario mensual para el mes  $i$ .

Nota: La sumatoria de los MAF de todos los meses debe ser igual a 12.

El diseño de pavimentos puede ser sensible a los MAF. Si la información no está disponible, se recomienda que el diseñador asuma un MAF uniforme ó una distribución equivalente (por ejemplo: 1.0 para todos los meses y para todas las clases de vehículos). El Software de diseño permite al diseñador colocar directamente los datos de MAF ó importarlos de un archivo ya preparado. Tomar nota que la sumatoria de todos los factores para una clase de vehículo/camión dado en el año debe ser igual a 12.

#### *Distribución de la composición vehicular.*

La clave de un programa exitoso para la recolección y clasificación de datos, no es el origen de ellos, sino la habilidad para obtenerlos rutinariamente, verificar su validez, resumirlos en formatos aplicables, reportarlos en una manera que sean útiles al diseñador y eficiencia en el proceso de manejo.

La clasificación vehicular estándar que ha de utilizarse para el diseño es la descrita en el apartado 2.3.1.2. La Tabla 2.3 muestra la clasificación vehicular de acuerdo a la clasificación nacional y de SIECA con respecto a la clasificación vehicular de la FWHA.

La distribución normalizada de la clasificación vehicular representa el porcentaje de cada clase de vehículo (clase 4 a 13) en el TPDA para el año base. La sumatoria de los porcentajes de TPDA de todas las clases de vehículos debería ser igual a 100. Las entradas de los diferentes niveles son los siguientes:

- Nivel 1: Datos obtenidos del sitio ó de segmentos específicos de conteos automatizados ó conteos vehiculares particulares.
- Nivel 2: Datos obtenidos de la región por programas de conteos automatizados ó conteos vehiculares particulares.
- Nivel 3: Datos obtenidos de programas de conteos nacionales ó conteos vehiculares particulares.

Los factores de distribución de las clases de vehículos determinados por defecto (nivel 3) usando los datos de tráfico del LTPP, son los datos provistos como parte del software de la Guía de Diseño. Los factores de distribución de la clasificación de los vehículos por defecto son escogidos basado en la función de la carretera y de la mejor combinación de los grupos de Clasificación de Tráfico de Vehículos (TTC) que describen el sentido del tráfico esperado sobre la carretera.

**Tabla 2.3. Clasificación vehicular nacional y de SIECA con respecto a la clasificación vehicular de la FHWA.<sup>27</sup>**

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Clasificación vehicular de acuerdo a FHWA</b>
Lp	Vehículo motorizado liviano ó motocicleta de dos, tres y cuatro llantas (tipo sedán consistente de un de un eje direccional y un eje simple de tracción).	1, 2
Lc	Vehículo livianos, consistente de un automotor con eje simple direccional y un eje simple de tracción.	3
C2	Camión ó autobús, consistente de un automotor con eje simple direccional y un eje simple de tracción.	5
C3	Camión ó autobús, consistente de un automotor con eje simple direccional y un eje de doble rueda de tracción.	4, 6
C4	Camión ó autobús, consistente de un automotor con eje simple direccional y un eje de triple rueda de tracción.	7
T2-S1	Vehículo articulado con eje simple direccional, un eje simple de tracción y un eje simple de arrastre (semiremolque).	8
T2-S2	Vehículo articulado con eje simple direccional, un eje simple de tracción y un eje de doble rueda de arrastre (semiremolque).	8
T2-S3	Vehículo articulado con eje simple direccional, un eje simple de tracción y un eje de triple rueda de arrastre (semiremolque).	-
T3-S1	Vehículo articulado con eje simple direccional, un eje de doble rueda de tracción y un eje simple de arrastre (semiremolque).	-
T3-S2	Vehículo articulado con eje simple direccional, un eje de doble rueda de tracción y un eje de doble rueda de arrastre (semiremolque).	9
T3-S3	Vehículo articulado con eje simple direccional, un eje de doble rueda de tracción y un eje de triple rueda de arrastre (semiremolque).	10
Otros	Vehículos articulados con otras combinaciones.	11, 12, 13

<sup>27</sup> Cuadro comparativo de la clasificación vehicular de acuerdo a SIECA y FHWA.

### Factores de distribución vehicular horaria.

Los factores de distribución horaria (HDF) representan el porcentaje de los TPDA en cada hora del día. Las entradas de los diferentes niveles son los siguientes:

- Nivel 1: Del sitio ó de segmentos específicos determinados de conteos automatizados ó conteos vehiculares particulares.
- Nivel 2: De la distribución de la región determinados por conteos automatizados ó conteos vehiculares particulares.
- Nivel 3: Los factores determinados de datos nacionales o experiencias locales.

Para las entradas de datos de los niveles 1 al 3, el HDF puede ser calculado usando el tráfico de vehículos medidos continuamente en un período de 24 horas. Los datos horarios son usados para determinar el porcentaje total de vehículos en cada hora así:

1. Determinar el número total contabilizado de vehículos en cada hora de datos de tráfico en la muestra.
2. El número de vehículos promedio para cada 24 horas del día en la muestra. Por ejemplo, si el dato incluye conteo de vehículos para la primera hora del día por 6 días, entonces el total de los 6 conteos será dividido por 6.
3. El promedio total de 24 horas del paso anterior.
4. Dividir cada promedio de 24 horas del paso por el total del paso 3 y multiplicarlo por 100.

La sumatoria de los porcentajes del tráfico diario de vehículos por tiempo debe completar el 100 por ciento.

### Factores de crecimiento vehicular.

Los factores de crecimiento en un segmento ó en un sitio en particular son estimados de una mejor manera cuando existe disponibilidad de datos de

conteo de tráfico continuo (asumiendo que es confiable y que las diferencias encontradas de año a año pueden ser atribuidas al crecimiento), puesto que es bien conocido que el volumen de tráfico en un solo sitio puede ser afectado por una variedad de factores externos, y de esta manera los factores de crecimiento calculados de datos recogidos en forma limitada de un restringido número de localizaciones, pueden ser parciales. Una estimación menos confiable de los factores de crecimiento se puede también calcular de los datos obtenidos de conteos de duración corta, puesto que las estimaciones individuales de TPDA de tales conteos no son exactas como los disponibles de conteos continuos.

Para los conteos de corta y continua duración, si los datos de las mismas localizaciones de los conteos recogidas por varios años se utilizan para calcular factores de crecimiento, los errores en una localización dada debido a la inexactitud del TPDA estimado, tienden a una autocorrección. Es decir, si el TPDA del año de conteo es muy alto, al hacer un estimado de crecimiento muy alto para este año, el valor correcto del próximo año del TDA causará un crecimiento estimado más bajo para ser computado, resultando un crecimiento con estimación más confiable a través de los años.

El software de la Guía de Diseño permite que los usuarios utilicen tres diversas funciones de crecimiento de tráfico para calcular el crecimiento o el decaimiento del tráfico de vehículos en un plazo de tiempo (pronóstico de tráfico de vehículos). Las tres funciones proporcionadas para estimar los volúmenes de tráfico de vehículos futuros se presentan en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5. Función usada en cálculo/pronóstico de tráfico vehicular a través del tiempo.**<sup>28</sup>

Descripción de Función	Modelo
Sin Crecimiento	$TPDA_X = 1.0 \times TPDA_{AB}$
Crecimiento Lineal	$TPDA_X = GR \times AGE + TPDA_{AB}$
Crecimiento Compuesto	$TPDA_X = TPDA_{AB} \times (GR)^{AGE}$

<sup>28</sup> Parte 2, Capítulo 4: Traffic. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.4.19.

Donde:

$TPDA_X$ : Es el Tráfico Promedio Diario Anual en el período  $X$ .

$GR$ : Es el índice de crecimiento del tráfico.

$TPDA_{AB}$ : Es el Tráfico Promedio Diario Anual en el Año Base.

El software de la Guía de Diseño permite que los usuarios ingresen una tasa de crecimiento y la función del crecimiento. Se puede elegir una función común de crecimiento para todas las clases de vehículo ó se pueden elegir diferentes funciones para las diversas clases de vehículo. De acuerdo con la función elegida, la fecha de apertura de la carretera al tráfico y la vida de diseño del pavimento, el TPDA se pronostica para la vida entera de diseño del pavimento.

### ***Factores de distribución de carga por eje.***

Los factores de distribución de carga por eje representan simplemente el porcentaje total de aplicaciones del eje dentro de cada intervalo de carga para un tipo específico de eje (simple, tandem, tridem, y cuádruple) y clase vehicular (clases 4 a 13). Una definición de los intervalos de carga para cada tipo de eje se proporciona a continuación:

- Ejes Simples: 3,000 a 40,000 lb. a intervalos de 1,000 lb.
- Ejes Tandem: 6,000 a 80,000 lb. a intervalos de 2,000 lb.
- Ejes Tridem y Cuádruples: 12,000 a 102,000 lb. a intervalos de 3,000 lb.

El software de la Guía de Diseño permite al usuario introducir las siguientes entradas para los niveles 1 al 3:

- Distribución de carga del eje para cada tipo de eje (simple, tandem, tridem, y cuádruple) para los intervalos siguientes de carga:
  - Ejes Simples: 3,000 a 40,000 lb. a intervalos de 1,000 lb.



- Ejes Tandem: 6,000 a 80,000 lb. a intervalos de 2,000 lb.
- Ejes Tridem y Cuádruples: 12,000 a 102,000 lb. a intervalos de 3,000 lb.
- Para cada tipo de eje, la distribución de carga se requiere para cada mes (de Enero a Diciembre) y la clase de vehículo (vehículo clase 4 a 13).

Para las entradas del nivel 1, los factores de distribución de carga por eje se pueden importar de archivos de texto ya preparados, mientras que para los valores por defecto de las entradas del nivel 3 se proporcionan usando la base de datos del LTPP.

En resumen, los espectros de carga de ejes para cada tipo de las diferentes clases de vehículos pueden ser perceptiblemente diferentes y se deben considerar por separado en el análisis.

### ***Entradas generales de tráfico.***

La mayoría de las entradas bajo esta categoría define la configuración de la carga por eje y de detalles de cargado para calcular las respuestas del pavimento. Las excepciones son "número de ejes por tipo de eje por clase de vehículo" y de la "distancia entre ejes", que se utilizan en los cálculos del volumen de tráfico.

### ***Localización promedio de la llanta.***

Es la distancia del borde externo de la rueda a la marca del pavimento. Las entradas en los diferentes niveles son los siguientes:

- Nivel 1: El valor determinado con mediciones directas en segmentos de sitios.
- Nivel 2: Un valor promedio regional determinado de mediciones sobre carreteras con características de tráfico similares y

condiciones de sitio (clase funcional, tipo de pavimento, nivel de servicio, etc.).

- Nivel 3: Valor promedio nacional ó estimaciones basadas en experiencias locales.

La localización de llanta de 18 pulg. se proporciona por defecto (nivel 3) en el software de la Guía de Diseño. Se recomienda esto si una información más exacta no está disponible.

*Desviación estándar de tráfico alejado de la trayectoria normal de la llanta en el pavimento (alejado de las roderas).*

Ésta es la desviación estándar del tráfico lateral alejado de las roderas. El alejamiento se utiliza para determinar las aplicaciones de carga de ejes un punto para predecir esfuerzos y funcionamiento. Los diversos niveles para el tráfico alejado son:

- Nivel 1: El valor determinado con mediciones directas en los segmentos de sitios específicos.
- Nivel 2: Un valor promedio regional determinado por mediciones en carreteras con características similares de tráfico y condiciones de sitio (clase funcional, tipo de pavimento, nivel de servicio de tráfico, etc.).
- Nivel 3: Valor promedio nacional ó estimaciones basadas en experiencias locales.

El valor promedio por defecto (nivel 3) de la desviación estándar del tráfico alejado de las roderas de 10 pulg. se proporciona en el software de la Guía de Diseño. Se recomienda esto si una información más exacta no está disponible.

### Ancho del carril de diseño.

Este parámetro refiere a la anchura del carril de tráfico real, según lo definido por la distancia entre las marcas del carril de cualquier lado del carril de diseño. Es un factor de diseño y puede o no igualar la anchura de la losa (en el caso de un pavimento rígido). El valor prefijado para los carriles de ancho estándar es 12 pies.

### Número de tipos de ejes para la clasificación vehicular.

Esta entrada representa el número promedio de ejes para cada clase de vehículo (clase 4 a 13) y para cada tipo de eje (simple, tandem, tridem y cuádruple). Las entradas para los diferentes niveles son los siguientes:

- Nivel 1: Los valores determinados de análisis directos de datos de tráfico de sitios específicos (programas de conteo ó conteos vehiculares).
- Nivel 2: Los valores determinados de análisis directos de datos de tráfico regional (programas de conteo ó conteos vehiculares).
- Nivel 3: Valores por defecto basados en análisis de datos nacionales (por ejemplo datos del LTPP).

Los valores por defecto (nivel 3) estimados para el número de tipos de ejes por clasificación vehicular provisto por el software de la Guía de Diseño son los usados por los datos del LTPP.

### Configuración del eje.

Una serie de elementos de datos son necesarios para describir las configuraciones típicas de la llanta y de las cargas por eje que serían aplicadas en la carretera ya que las respuestas calculadas del pavimento son generalmente sensibles a las localizaciones de la llanta y a la interacción entre varias llantas en un eje dado. Estos elementos de datos se pueden obtener directamente de bases de datos de los fabricantes o medidas directamente en

el campo. Los valores típicos se proporcionan para cada uno de los elementos siguientes, sin embargo, los valores específicos del sitio pueden ser utilizados, si están disponibles:

- Promedio ancho de eje: Es la distancia entre dos bordes exteriores de un eje. Para los vehículos típicos, se pueden asumir para el ancho del eje 8.5 pies.
- Espaciamiento de llanta doble: Es la distancia entre los centros de llantas dobles. El espaciamiento típico de llantas dobles para los vehículos es 12 pulg.
- Espaciamiento de eje: Es la distancia entre dos ejes consecutivos de un tandem, tridem ó cuádruple. El espaciamiento promedio de eje es 51.6 pulgadas para tandem y 49.2 pulgadas para los ejes tridem y del cuádruple.

#### Distancia entre ejes.

Son necesarios una serie de elementos de datos para describir los detalles de las distancias entre ejes de vehículos para uso en el cálculo de respuestas de pavimentos. Estos elementos de datos pueden ser obtenidos directamente de la base de datos de los fabricantes ó de mediciones en el campo. Los valores típicos son proporcionados para cada uno de los siguientes elementos, sin embargo, pueden ser usados valores de sitios específicos, si están disponibles.

Espacios promedios de ejes (en pies): Corto, mediano y largo. Los valores recomendados para espaciamiento de ejes son 12, 15 y 18 pies para corto, mediano y largo respectivamente. Porcentaje de vehículos de la clase 8 a la 13 con espaciamiento de ejes corto, mediano y largo: Utilizar la distribución uniforme o por lo menos una información más exacta si esta disponible.

Nótese que la distribución del espaciamiento del eje es aplicable solamente a los vehículos pesados de carga (clase 8 y superior). Si otros vehículos en el sentido del tráfico también tienen el espaciamiento del eje en la gama de los ejes cortos, medios, y largos definidos arriba, la frecuencia de esos vehículos se debe agregar a la distribución del espaciamiento de eje de los vehículos de pesados de carga. Por ejemplo, si el 10 por ciento de tráfico de vehículos es de múltiple remolque (clase 11 y superior), que tienen el espaciamiento entre eje de remolque a remolque en la gama "corta", el 10 por ciento se debería agregar al porcentaje de vehículos para los ejes "cortos". Así, la suma de porcentaje de vehículos en las categorías corta, media y larga pueden ser mayores de 100.

*Dimensiones de la llanta y presiones de inflado.*

Las dimensiones del neumático y las presiones de inflado son entradas importantes en los modelos de la predicción de comportamiento. Varios esfuerzos fueron emprendidos para verificar las presiones del neumático usadas en la industria de vehículos basada en la información recogida por la Asociación del Neumático y el Rim (TRA), la Asociación de Fabricantes de Llantas (RMA), la Asociación Americana de Vehículos (ATA) y de la Asociación de los Fabricantes de Vehículos de Remolques (TTMA).

La Tabla 2.5 muestra los anchos de sección para los neumáticos nuevos y los anchos totales para el crecimiento de neumáticos máximo así como el espaciamiento dual mínimo del anuario de TRA de 1999. El crecimiento de neumáticos máximo son los neumáticos que han alcanzado su aumento posible máximo en las dimensiones debido al desgaste.

Estas anchuras se utilizan para determinar el espaciamiento dual mínimo (espaciamiento entre los neumáticos en usos duales).

**Tabla 2.5. Ancho de llanta y mínimo espaciamento dual del anuario de TRA.<sup>29</sup>**

Tamaño RMA	Clasificación de Manipulación	Espaciamento Mínimo Dual, pulg.	Ancho de Neumático, pulgadas.	
			Sección (nueva)	Total (Crecimiento Máximo)
295/75R22.5	14	13.5	11.7	12.5
11R22.5	14	12.5	11.0	12.0
11R24.5	14	12.5	11.0	12.0
285/75R24.5	14	12.5	11.1	11.7
11R22.5	16	12.5	11.0	12.0
11R24.5	16	12.5	11.0	12.0
225/70R19.5	12	10.0	8.9	9.5
255/70R22.5	16	11.5	10.0	10.5

La Tabla 2.6 muestra las cargas máximas permitidas y las presiones de inflado en frío para diversos neumáticos. Las presiones de inflado en caliente deben utilizar en el software de la Guía de Diseño. La presión de inflado en caliente es típicamente cerca de 10 a 15 por ciento mayor que la presión de inflado en frío. Una presión de inflado en caliente por defecto que se utiliza en el software de la Guía de Diseño es de 120 psi.

**Tabla 2.6. Cargas Máximas y presiones de inflado en frío para diferentes llantas.<sup>30</sup>**

Tamaño RMA	Clasificación de Manipulación	Presión de Inflado de la Llanta, psi.		Máxima carga de la Llanta, lbs.	
		Uso Simple	Uso Dual	Uso Simple	Uso Dual
295/75R22.5	14	110	110	6,200	5,700
11R22.5	14	104	104	6,200	5,900
11R24.5	14	104	104	6,600	6,000
285/75R24.5	14	110	110	6,200	5,700
11R22.5	16	120	120	6,600	6,000
11R24.5	16	120	120	7,200	6,600
225/70R19.5	12	96	96	3,600	3,400
255/70R22.5	16	120	120	5,500	5,100

Cuando se inflan las llantas al haber recorrido un kilómetro ó menos, se habla de un inflado en frío y al inflarlas con un recorrido mayor, entonces se refiere a un inflado en caliente, ya que se necesita 0.3 kg más de aire para obtener la misma presión que se tiene en frío.

<sup>29</sup> Parte 2, Capítulo 4: Traffic. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.4.29.

<sup>30</sup> Parte 2, Capítulo 4: Traffic. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.4.29.

## 2.3.2 SUBRASANTES

### 2.3.2.1 INTRODUCCIÓN

Subrasante es el suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural. En la década de los 40, el concepto de diseño de pavimentos estaba basado en las propiedades ingenieriles de la Subrasante. Estas propiedades eran la clasificación de suelos, plasticidad, resistencia al corte, susceptibilidad al hielo y drenaje.

Desde finales de la década de los 50, se puso más énfasis en las propiedades fundamentales de la subrasante y se idearon ensayos para caracterizar mejor a estos suelos.

Ensayos usando cargas estáticas o de baja velocidad de deformación tales como el CBR, compresión simple son reemplazados por ensayos dinámicos y de repetición de cargas tales como el ensayo del módulo resiliente que representan mucho mejor lo que sucede bajo el pavimento en lo concerniente a tensiones y deformaciones.

Las propiedades de los suelos pueden dividirse en dos categorías:

- *Propiedades Físicas:* Son usadas para selección de materiales, especificaciones constructivas y control de calidad.
- *Propiedades Ingenieriles:* Dan una estimación de la calidad de los materiales para caminos. La calidad de los suelos para subrasantes se puede relacionar con el módulo resiliente, el módulo de Poisson, el valor soporte del suelo y el módulo de reacción de la subrasante.

### **2.3.2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS PARA SUBRASANTE**

#### **Propiedades iniciales de los suelos.**

Las propiedades de los suelos de subrasante es una de las variables de entrada más importantes en el diseño de un pavimento. Estas propiedades siempre estarán presentes aunque cambien mediante tratamientos especiales tales como estabilización, compactación, etc. Para conocer estas propiedades es necesario un muestreo muy amplio que abarque todo el trazo del proyecto.

Las probetas se llevan a laboratorio para ser ensayadas (granulometría, humedad, límites de Atterberg, contenido de humedad óptimo, CBR y clasificación). Todos estos datos se vuelcan en el perfil edafológico donde se indican los distintos tipos de suelo y su profundidad.

#### **Clasificación de los suelos.**

La clasificación de suelos es un indicador de las propiedades físicas de los suelos. La clasificación que mejor se adapta para reflejar las propiedades de un suelo como subrasante es la de AASHTO M 145 (ASTM D 3282). Sus variables de entrada son la granulometría y plasticidad.

En general, un suelo de acuerdo a su granulometría se divide en:

- Grava: Tamaño < 76.2mm (3") hasta tamiz N° 10 (2mm).
- Arena:
  - Arena gruesa: Tamaño < 2mm hasta tamiz N° 40 (0.425mm).
  - Arena fina: Tamaño < 0.425mm hasta tamiz N° 200 (0.075mm).
- Limos y arcillas: Tamaños menores de 0.075mm (N° 200). Con  $IP \leq 10.0$  ó menos para limos. Con  $IP > 1.1$  para arcillas.

Según AASHTO, un suelo con fino tiene más del 35% que pasa el tamiz N° 200 y se denominan A-4, A-5, A-6 ó A-7.



Dos suelos finos con granulometría muy similar pueden tener propiedades muy diferentes según su plasticidad, la cual se analiza sobre la fracción que pasa el tamiz N° 40. Esta propiedad se cuantifica con los Límites de Atterberg (ASTM D 4318) que son:

- Límite líquido  $\omega_L$  ó LL: Porcentaje de humedad máximo que puede tener un suelo para poder ser amasado.
- Límite plástico  $\omega_P$  ó LP: Porcentaje de humedad mínimo que puede tener un suelo para poder ser amasado.
- Límite de contracción  $\omega_S$  ó LS: Porcentaje de humedad por debajo del cual el suelo no pierde más volumen.

En ingeniería de carreteras sólo interesan el LL y el LP, cuya diferencia es el índice plástico que nos indica la plasticidad del material o sea el rango de humedades dentro del cual el suelo puede ser amasado. Además, para suelos gruesos la propiedad más importante es la granulometría, mientras que para suelos finos es la plasticidad.

En la Tabla 2.7 se ve la clasificación del suelo según AASHTO junto con el Modulo Efectivo de Reacción de la Subrasante (valor de k). Introducida en el Suplemento para la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 1993:

El modulo de reacción de la subrasante (valor k) es definido como la medida ó estimación que está sobre la capa de rodadura de suelo ó sobre el terraplén el cual la base de la vía y/o la losa de concreto será construida. El valor de k representa la subrasante (al terraplén si es representativo) y no representa el rumbo de la base. Este es considerado una capa estructural del pavimento con la losa de concreto, de esta manera, su modulo y espesor son importantes datos de entrada de diseño para determinar el espesor requerido de losa.

**Tabla 2.7. Clasificación del suelo según AASHTO y rangos de valores de k recomendados para los varios tipos de suelos.<sup>31</sup>**

Clasificación AASHTO	Descripción	Clasificación Unificada	Densidad Peso Seco (lbf/ft <sup>3</sup> )	CBR (porcentaje)	Valor k (psi/in)
Suelos de Grano Grueso:					
A-1-a, Bien Graduado	Grava	GW, GP	125 – 140	60 – 80	300 – 450
A-1-a, Pobrementado Graduado			120 – 130	35 – 60	300 – 400
A-1-b	Arena Gruesa	SW	110 – 130	20 – 40	200 – 400
A-3	Arena Fina	SP	105 - 120	15 – 25	150 – 300
Suelos A-2 (material granular con muchos finos):					
A-2-4, gravoso	Grava Limosa	GM	130 – 145	40 – 80	300 – 500
A-2-5, gravoso	Grava Arena-Limosa				
A-2-4, arenoso	Arena Limosa	SM	120 -135	20 – 40	300 – 400
A-2-5, arenoso	Arena Grava-Limosa				
A-2-6, gravoso	Grava Arcillosa	GC	120 – 140	20 – 40	200 – 450
A-2-7, gravoso	Grava Arena-Arcillosa				
A-2-6, arenoso	Arena Arcillosa	SC	105 - 130	10 – 20	150 – 350
A-2-7, arenoso	Arena Grava-Arcillosa				
Suelo de Grano Fino:					
A-4	Limo	ML, OL	90 – 105	4 – 8	25 – 165*
	Limo/Arena/Mezcla de Grava		100 – 125	5 – 15	40 – 220*
A-5	Limo pobrementado graduada	MH	80 – 100	4 – 8	25 – 190*
A-6	Arcilla Plástica	CL	100 – 125	5 – 15	25 – 255*
A-7-5	Arcilla elástica moderadamente plástica	CL, OL	90 – 125	4 – 15	25 – 215*
A-7-6	Arcilla elástica altamente plástica	CH, OH	80 – 110	3 – 5	40 – 220*

<sup>31</sup> Tabla 2.7: Supplemental Association of the AASHTO Guide 1998, Part II. Section 32. Pág. 6.

\* El valor de  $k$  de granos finos es altamente dependiente del grado de saturación.

Estos recomendados rangos de valores de  $k$  aplican a capas de suelos homogéneos de al menos 3m. (10 pies). Si es un de terraplén al menos 3m. (10 pies) de espesor existente sobre una subrasante más suave, el valor  $k$  para el suelo subyacente deberían ser estimados de la Tabla 2.3 y ajustadas para el tipo y espesor de material de terraplén usando el diagrama 1 que se encuentra en los Anexos. Si una capa de lecho de rocas existe a 3m. (10 pies) del suelo, el valor  $k$  debería ser ajustado usando el Diagrama 1 (ver Anexos).

#### **Relación entre humedad y densidad.**

La relación entre humedad y densidad para un suelo compactado juega un papel muy importante en las propiedades del mismo. Así se tienen los ensayos T-99 (estándar) y T-180 (modificado) que permiten determinar la humedad óptima, es decir, la humedad a la que el suelo alcanza su densidad máxima y por lo tanto presenta sus mejores propiedades mecánicas. El valor de esta humedad óptima depende de la energía de compactación brindada al suelo, y en caso de incrementos ésta, la humedad óptima será menor y la densidad seca máxima mayor.

#### **2.3.2.3 ENSAYOS DE RESISTENCIA PARA SUELOS DE SUBRASANTE.**

Los ensayos destinados a medir la resistencia de un suelo frente a cargas dinámicas de tránsito son muy variados, siendo los más comunes:

- Relación de Valor Soporte de California (CBR). (AASHTO T 193, ASTM D 1883).
- Ensayo de Plato de Carga. (AASHTO T 221 y T 222, ASTM D 1195 y ASTM D 1196).
- Ensayo de compresión Triaxial. (ASTM D 2850).
- Penetración Dinámica con Cono.

- Módulo de Resiliencia. (AASHTO T 292 y AASHTO T 307).

### **Valor soporte California.**

Mide la resistencia del suelo a la penetración de un pistón de 3 pulg<sup>2</sup> de área de una probeta de 6 pulg. (15 cm.) de diámetro y 5 pulg. (12.5 cm.) de altura, con una velocidad de 1.27 mm/min (0.05 pulg/min). La fuerza requerida para forzar el pistón dentro del suelo se mide a determinados intervalos de penetración. Estas fuerzas se comparan con las necesarias para producir iguales penetraciones en una muestra patrón.

El CBR es por definición:

$$CBR = \frac{\text{Carga que produce una penetración de 2.5 mm. en el suelo}}{\text{Carga que produce una penetración de 2.5 mm. en la muestra patrón}}$$

Y se mide en porcentaje, el cual es muy variable, 2 a 3% para arcillas plásticas a 70% o más para materiales granulares de buena calidad.

Los suelos finos son compactados a la humedad óptima antes de ser ensayados. Los suelos gruesos se compactan a diferentes contenidos de humedad por encima y por debajo del óptimo. Las muestras se sumergen en agua durante 96 horas antes del ensayo para simular las condiciones de saturación y tener así los CBR en las condiciones más críticas. Se agregan pesos a la superficie de la probeta para simular las sobrecargas debidas al peso del paquete estructural.

Dado que este ensayo es por naturaleza arbitrario, tiene bastantes limitaciones pero sus mayores ventajas son su limpieza y la gran cantidad de datos existentes y acumulados permiten una buena correlación.

El método CBR para el diseño de pavimentos se basa en que a menor valor de CBR de subrasantes, se requieren mayores espesores de pavimento para protegerlo de las solicitudes de tránsito.

**Módulo de reacción de subrasante o coeficiente de balasto (Método del plato de carga).**

Este valor se determina cargando un plato o placa de carga y midiendo la presión necesaria para producir una deformación.  $k$  es el coeficiente de presión aplicada y deflexión del plato de carga.

$$k = \frac{P}{\Delta} \quad (2.2)$$

Este ensayo se hace en el campo y requiere un equipo costoso.

Dado que es un ensayo realizado in situ, no puede ser hecho a diferentes densidades y contenidos de humedad para considerar las distintas condiciones de servicio, por lo que se recomienda que el valor  $k$  de campo sea ajustado para considerar las condiciones más desfavorables de la subrasante.

Este factor de corrección se obtiene como el cociente de la deformación a 10 psi (68.9 kPa ó 0.7 Kg/cm<sup>2</sup>) de presión para un suelo no saturado y saturado.

$$k_{\text{corregido}} = \frac{d}{d_{\text{saturado}}} \times k_{s/\text{corregir}} \quad (2.3)$$

El valor de  $k$  depende del tamaño del plato de carga. Los de 92 cm (36") de diámetro se usan para pavimentos rígidos, mientras que para pavimentos flexibles se usan de 30.5 a 45.7 cm (12 a 18 pulg).

**Ensayo de compresión triaxial.**

Se hacen ensayos triaxiales no consolidados no drenados sobre muestras no saturadas. Las muestras de suelos se compactan estática ó

dinámicamente con una humedad próxima a la óptima. Las probetas son cilíndricas con tamaños variables entre 1.4" (3.5 cm) de diámetro por 2.8" (7 cm) de altura hasta 6" (15 cm) de diámetro por 12" (30 cm) de altura.

La presión de confinamiento es del orden de la que va a sufrir el suelo in situ y la carga se aplica a una tasa de deformación uniforme de 0.05pulg/min.

Se trazan curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  para distintas presiones de confinamiento que permiten determinar la carga de rotura y representarlas luego en el conocido diagrama de M $\ddot{o}$ hr para conocer la cohesión y el ángulo de fricción interna.

Los diseños usando resultados del ensayo triaxial están basados en el principio de que materiales más débiles requieren espesores mayores para proteger la subrasante.

### **Ensayo de penetración dinámica con cono.**

El cono dinámico es un dispositivo para medir in situ la resistencia de los materiales de los pavimentos y de la subrasante.

Este ensayo se ejecuta hincando el cono dentro del pavimento o subrasante levantando y dejando caer un martillo. Se registra la penetración para cada caída y se la denomina tasa de penetración (penetration rate=PR) en mm/golpe.

El CBR está relacionado con PR por:

$$CBR = \frac{405.3}{PR^{1.259}} \text{ para conos a } 60^\circ \quad (2.4)$$

Según Livneh y Harrison :

$$CBR = 2.20 - 0.71 \log(DCP)^{1.5} \text{ para conos a } 30^\circ$$

Siendo:

PR=Tasa de penetración en mm/golpe.

DCP=tasa de penetración en pulg/golpe.

### **Ensayo de módulo resiliente.**

Este ensayo fue desarrollado a los efectos de estudiar una propiedad del material que describa mejor el comportamiento del suelo bajo cargas dinámicas de ruedas. Una rueda que se mueve imparte un pulso dinámico a todas las capas del pavimento y a la subrasante. Como respuesta a este pulso dinámico, cada capa de pavimento sufre una deflexión. El pulso de solicitudes varía desde un valor muy bajo hasta un máximo en un breve periodo, en función de la velocidad del vehículo.

Este no es un ensayo a rotura y las muestras no fallan durante la ejecución del mismo. Las muestras son cilíndricas y se confinan en una cámara triaxial que permite una gran variedad de presiones de confinamiento a aplicar a la probeta. Mediante un dispositivo especial se pueden aplicar cargas pulsantes de distinta magnitud y duración. En el ensayo se registra la deformación sufrida por la probeta.

El ensayo sigue las normativas de AASHTO T 294-921 y se divide en dos procedimientos: Uno es para materiales Tipo 1, es decir, materiales granulares no ligados y subrasantes con menos del 70% en tamiz N° 10 y menos del 20% en tamiz N° 200; y el otro es para materiales Tipo 2, o sea, subrasantes que no cumplen los requerimientos para materiales Tipo 1 y aquí se incluyen los suelos A-4, A-5, A-6, A-7 y en algunos casos los A-1-b, A-2 y A-3.

#### *Influencia de las propiedades de los suelos.*

El ensayo del módulo resiliente es mucho más sensible a las propiedades de los suelos que otros ensayos de resistencia. Una buena calidad

de este ensayo es que al no romper la probeta, se puede someter a ésta a diferentes niveles de tensiones, ahorrando tiempo en preparación de probetas y evitando errores. Las probetas pueden ser preparadas para contenidos de humedad variables y diferentes grados de compactación.

El contenido de humedad de un suelo tiene un tremendo impacto en el módulo resiliente. El módulo disminuye fuertemente cuando se incrementa el contenido de humedad. Esto obliga hacer ajustes de los valores del módulo cuando el pavimento se satura en determinados períodos.

Además de la humedad, la temperatura tiene una gran influencia especialmente en zonas sometidas a ciclos de congelación y deshielo.

Es muy difícil asignar valores típicos de módulo resiliente para cada tipo de suelo. El valor no sólo está afectado por variables de construcción, sino también por tipo de suelo, granulometría y contenido de humedad.

Thompson y Robnett (1979) encontraron relaciones entre el módulo resiliente y el contenido de humedad para tensiones desviantes  $\sigma_D=6$  psi (41.3 KPa.):

$$\text{Si } g_D < 1600 \text{ Kg} / m^3 \rightarrow M_R = 27.06 - 0.526w$$

$$\text{Si } g_D > 1600 \text{ Kg} / m^3 \rightarrow M_R = 18.18 - 0.404w$$

(2.5)

*Siendo :*

*w: Humedad volumétrica en %*

*M<sub>R</sub> : Módulo resiliente en ksi*

*El módulo resiliente en el diseño de pavimentos.*

Desde el método AASHTO 1986, el módulo resiliente reemplaza al CBR como variable para caracterizar la subrasante, subbase y base.



Cuando es de esperar que la subrasante tenga contenidos de humedad variables a lo largo del año, es necesario hacer un estudio de la variación de  $M_R$  con la humedad para determinar un  $M_R$  medio de diseño.

#### **2.3.2.4 CARACTERIZACIÓN DE LA FUNDACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO**

La fundación debe ser caracterizada, a pesar de que si el proceso de diseño es para ser aplicado a un pavimento existente o para un pavimento nuevo. El soporte para pavimentos nuevos ó existentes es la capa de agregado grueso del suelo ó terraplén.

La entrada de datos básica para la caracterización de la subrasante ó la fundación, es la misma para el diseño de pavimento flexible y rígido. Si los datos necesarios para el diseño no son disponibles para la caracterización de la fundación, el diseñador del pavimento puede usar los valores por defecto proporcionados en el software de la Guía de Diseño. Este suministro de datos, permite el uso de la jerarquía de la entrada de datos para el diseño.

Las diferentes alternativas de caracterización existentes para la subrasante ó fundación, incluyen:

- Pruebas de laboratorio de muestras de campo no alteradas ó alteradas recuperadas de procesos de exploración de subsuperficie.
- Pruebas no destructivas de pavimentos existentes encontradas para tener materiales de subrasante similares.
- Pruebas indiscretas tales como el Penetrómetro de cono dinámico (DCP).
- Confianza de instituciones con experiencias en los tipos de subrasante.

Las pruebas de laboratorio y las pruebas no destructivas (NDT) son recomendadas como métodos primarios de caracterización. La Síntesis NCHRP 278 (“Medición in situ de las propiedades del suelo de subrasante para pavimentos”) y la Síntesis NCHRP 247 (“Estabilización de subrasantes existentes para mejorar la construcción durante la reconstrucción del pavimento”), pueden ser utilizadas para suplementar la información de las pruebas necesarias para el diseño.

Las experiencias de las instituciones encargadas, también pueden ser utilizadas para seleccionar las técnicas de mejoramiento de la subrasante en los problemas que pueda presentar el suelo en cada región ó lugar donde se va a diseñar.

Para el diseño de pavimentos nuevos, particularmente los proyectos críticos, las pruebas del módulo resiliente de repetición de carga, son necesarios para evaluar el efecto de cambios de humedad en el módulo resiliente para un suelo en particular. La última versión de AASHTO T 307, “Módulo resiliente de materiales de base/subbase granular no ligada y suelos de subrasante”, deberían ser utilizados para la medición del módulo resiliente de un suelo en el laboratorio.

## **2.3.3 MATERIALES PARA PAVIMENTOS**

### **2.3.3.1 INTRODUCCIÓN.**

Es muy conocida la influencia de los materiales en la calidad del pavimento. Cada vez está tomando más consenso el uso de módulos elásticos para caracterizar los materiales. Este es uno de los parámetros más usados desde el método AASHTO 1986.

Los materiales para pavimentos que se describirán a continuación son:

- Concreto de cemento Pórtland.
- Concreto asfáltico.
- Bases granulares estabilizadas y no estabilizadas.

### **2.3.3.2 CONCRETO DE CEMENTO PÓRTLAND.**

El concreto es un material formado por materiales granulares (piedra partida o grava y arena) embebidos en una pasta de cemento que hace de ligante. Los materiales granulares son obtenidos de fuentes naturales y deben cumplir con determinadas condiciones de granulometría. El cemento se obtiene a partir de la cocción de piedra caliza y arcilla que forma el clinker, el cual es finamente molido agregándole un 5% de yeso para formar el cemento.

AASHTO reconoce ocho clases de cemento:

- Tipo I, Normal.
- Tipo I-a, es el mismo tipo I pero con aire incorporado.
- Tipo II, moderado calor de hidratación, moderada resistencia a la acción de los sulfatos.
- Tipo II-a, es el mismo tipo II pero con aire incorporado.
- Tipo III, de alta resistencia inicial.
- Tipo III-a, es el mismo tipo III pero con aire incorporado.

- Tipo IV, bajo calor de hidratación, lento incremento de resistencia.
- Tipo V, alta resistencia a los sulfatos.

### ***Aditivos.***

Son productos que agregados en pequeñas dosis en el hormigón fresco producen interesantes modificaciones de la calidad del concreto.

El más común es el aditivo incorporador de aire, que crea una estructura de burbujas microscópicas interconectadas que cortan el ascenso capilar, mejorando la durabilidad.

Otros tipos de aditivos son los aditivos químicos que reducen el contenido de agua, retardan el fraguado o lo aceleran.

### ***Curado.***

El curado involucra una reacción química (hidratación) entre el cemento y el agua. Para obtener las resistencias esperadas del concreto en el tiempo previsto son necesarios un suministro de humedad adecuado, una temperatura suficientemente alta y un período apropiado de curado.

El cemento no se hidrata y el incremento de resistencia del concreto se detiene cuando el nivel de humedad disminuye por debajo de cierto valor.

Cuanto mayor sea el período en que el concreto tiene acceso a la humedad luego del colado, mayor será la resistencia que se obtenga.

También influye la temperatura. A bajas temperaturas el incremento de resistencia es menor, factor que debe ser tenido en cuenta cuando se hacen colados en período de invierno, en lugares donde la temperatura llega a 0°C.

**Ensayos.**

Hay muchísimos ensayos de laboratorio para el concreto.

Estos pueden clasificarse en estas categorías, basándose en el uso de los resultados.

## a) Control de calidad y diseño de mezcla.

- Resistencia a la compresión simple. (ASTM C 39).
- Resistencia a la tracción por compresión diametral. (ASTM C 496, ASTM C 293).
- Consistencia. (ASTM C 143).
- Contenido de aire. (ASTM C 138, ASTM C 231, ASTM C 173, AASHTO T 199).

## b) Diseño.

- Módulo de rotura (tracción por flexión). (ASTM C 78).
- Módulo elástico. (ASTM C 469).

## c) Mecánico-empíricos.

- Módulo elástico y de Poisson. (ASTM C 469).
- Coeficiente de expansión térmica.
- Constantes de fatiga.
- Conductividad Térmica. (ASTM C 177).

**Modelos de fatiga.**

Los factores que afectan el módulo de rotura afectan también la fatiga. Hay diversos modelos de fatiga obtenidos a través de estudios en laboratorio correlacionados con pavimentos existentes. Estos modelos son:

## 1. PCA (Asociación del Cemento Pórtland):

$$\begin{aligned}
 \text{Si } \frac{S}{f_r} \geq 0.55 &\rightarrow \log N = 11.737 - 12.077 \left( \frac{S}{f_r} \right) \\
 \text{Si } 0.45 < \frac{S}{f_r} < 0.55 &\rightarrow N = \frac{(4.2577)^{3.268}}{\frac{S}{f_r} - 0.4325} \\
 \text{Si } \frac{S}{f_r} < 0.45 &\rightarrow N \text{ es ilimitado.}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

*El pavimento puede soportar un infinito número de cargas.*

## 2. Modelo del mantenimiento cero:

*Este modelo (Darter 1977) provee un 24% de fallas :*

$$\log N = 16.61 - 17.61 \left( \frac{S}{f_r} \right) \tag{2.7}$$

## 3. Modelo de AASHTO:

$$N = 234444 \times \left( \frac{f_r}{S} \right)^{3.21} \tag{2.8}$$

Donde

*N : Número de aplicaciones de carga*

*S : Tensión Aplicada*

*f<sub>r</sub> : Módulo de Rotura*

**Durabilidad del Concreto.**

En general, el concreto es un material muy durable. No obstante puede haber problemas si la combinación de agregados o agregados/cemento tiene algún efecto desfavorable. Las grietas tienen lugar cuando el agua se congela en los poros de agregados susceptibles lo cual provoca que se expandan y figuren. Aparecen fisuras que siguen las juntas u otro tipo de grietas ya

formadas donde la presencia de humedad es mayor. Si en una sección se encuentran fisuras, se debe realizar un muestreo para confirmarlo. En las juntas donde se toman las muestras se debe verificar si la muestra está intacta o se disgrega.

Hay ciertos tipos de agregados que contienen materiales que reaccionan con los álcalis del cemento (sodio y potasio). Estos agregados tienen sílice amorfa y la reacción produce un gel que absorbe agua y se expande fracturando la matriz de cemento y figurando el concreto. En este caso, las fisuras se manifiestan en todo el espesor de la losa. Aparecen como fisuras finas en una disposición de mapa como la piel de cocodrilo en pavimentos flexibles.

### **2.3.3.3 CONCRETO ASFÁLTICO.**

El concreto asfáltico es un material compuesto por agregados embebidos en un matriz de cemento asfáltico que llena el espacio dejado por éstos y los une. El cemento asfáltico se mantiene flexible y provee integridad estructural cubriendo los agregados y dándole a la mezcla propiedades cohesivas. Dado que el cemento asfáltico es semi-sólido a temperaturas corrientes, la calidad y granulometría de los agregados juega aquí un papel mucho más importante que en los pavimentos de concreto. Un concreto asfáltico debe tener una cantidad precisa de cemento asfáltico para proveer el porcentaje de vacíos deseado para la mezcla.

#### ***Cementos Asfálticos.***

Es un material de color marrón oscuro a negro que puede estar en estado sólido, semi-sólido o líquido, formado por betunes naturales u obtenidos por destilación del petróleo. Los grados del cemento asfáltico tienen una clasificación basada en la viscosidad del material (cuanto más fluido sea un cemento asfáltico, menos viscoso será).

La viscosidad se mide a temperaturas de 60°C. El grado de viscosidad se determina en el material que viene directamente del proceso de destilado y el grado de viscosidad del residuo es determinado a partir de la película fina resultante del ensayo de endurecimiento.

Para climas fríos se deben usar cementos asfálticos de bajo grado de viscosidad para resistir la figuración por baja temperatura. En climas cálidos se deben usar cementos asfálticos de alto grado de viscosidad para evitar ahuellamiento.

### ***Ensayos sobre muestras de concreto asfáltico.***

Los ensayos que se hacen sobre muestras de concreto asfálticos son:

- Para control de calidad y diseño de mezclas:
  1. Ensayo Marshall.
    - Estabilidad.
    - Flujo.
    - Vacíos.
    - Susceptibilidad a la humedad.
  2. Ensayo de Hveem.
    - Resistencia.
    - Cohesiómetro.
    - Vacíos.
    - Susceptibilidad a la humedad.
  
- Para Diseño:
  1. Ensayo de módulo resiliente.
  
- Mecánicos:
  1. Constantes de fatiga.
  2. Parámetros de ahuellamiento.



### 3. Ensayo de tracción indirecta.

#### ***Características térmicas y de humedad***

Las características térmicas de los pavimentos asfálticos no son las mismas que las de los pavimentos de concreto, por ejemplo no hay alabeos por gradiente de temperatura, pero una reducción de la misma produce fisuras. En climas fríos es común ver fisuras transversales en pavimentos de concreto asfálticos.

Los desprendimientos y peladuras consisten en la pérdida de agregados de la superficie y de la pérdida de asfalto en la superficie. Estos fenómenos indican que hay una adherencia asfalto-agregado insuficiente y traen como consecuencia una reducción de la estructura, resistencia a la tracción y capacidad de carga.

#### ***Coefficientes estructurales o de capa***

Estos coeficientes son una medida de la capacidad relativa de cada capa como componente estructural de un pavimento, aunque directamente no sean un índice de la resistencia del material. No obstante, estos coeficientes están correlacionados con distintos parámetros resistentes.

### **2.3.3.4 BASES**

Las características de los materiales para base o subbase varían si éstas son no ligadas como las bases granulares, ó si están ligadas con asfalto o con cemento.

#### ***Mezclas de agregados de suelos.***

Los parámetros de diseño para mezcla de agregados son: Resistencia, módulo resiliente y requerimientos de permeabilidad.

*Resistencia.*

La estabilidad de una mezcla de agregados depende de su granulometría, densidad relativa, fricción interna y cohesión. Una base granular o una subbase se diseñan para una máxima estabilidad y un alto ángulo de fricción interna. La granulometría y el contacto entre partículas proveen la resistencia al corte necesario. La resistencia de materiales no ligados está expresada en función de CBR, ensayos triaxiales o ensayos R (Hveem).

*Módulo Resiliente.*

Este parámetro depende de las tensiones aplicadas y responde a esta expresión:

$$M_R = K_1 (q_3)^{K_2} \quad (2.9)$$

Siendo:

$\theta$ : Expresión de confinamiento =  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ .

$K_1, K_2$ : Coeficientes de regresión.

Los valores más comunes de  $K_1$  y  $K_2$  son 9600 y 0.55 respectivamente. Para valores típicos de presión de confinamiento de 34 kPa (5 psi), el valor del módulo resiliente es de 23625 psi (163 MPa). Para valores de presiones de confinamiento de 345 kPa (50 psi), el módulo resiliente es de 82550 psi (580 MPa). El módulo de la base depende del soporte brindado por la subrasante.

***Bases tratadas con cemento.***

Pueden ser usadas bajo pavimentos de hormigón para proveer buen soporte estructural, resistir o minimizar el bombeo y reducir los efectos de humedad y ciclos de congelación y deshielo. Este tipo de base puede usarse para pavimentos de concreto asfáltico, pero las fisuras por retracción desarrolladas por las bases tratadas con cemento se pueden reflejar en superficie.

El diseño de una base tratada con cemento se hace a requerimientos de resistencia a las caras de tránsito y a ciclos de congelación y deshielo. El criterio de resistencia mecánica es expresado como la mínima resistencia a la compresión simple a los 7 días.

Estas bases son más rígidas que las bases granulares no tratadas y en consecuencia, resisten mejor las deformaciones de la losa del pavimento ya que resisten el alabeo térmico que incluso puede manifestarse en forma de fisuras transversales.

#### ***Bases tratadas con asfalto.***

Tienen aplicación en todo tipo de pavimentos. Estos materiales se diseñan para incrementar la resistencia estructural, mejorar la resistencia al bombeo y mejorar las condiciones de drenaje. Las bases permeables tratadas con asfalto dan excelentes propiedades drenantes. Los criterios para diseño de este tipo de materiales son los mismos que para concreto asfáltico.

Cuando se utilizan bajo un pavimento de concreto se deben hacer las mismas consideraciones que para una base tratada con cemento. La rigidez de la base tratada con asfalto puede incrementar las tensiones de alabeo en la losa, por lo que deben usarse juntas bien próximas. Además en casos de erosión de bases tratadas con asfalto pueden esperarse fallas en las juntas.

Las bases tratadas con asfaltos pueden hacerse con asfaltos emulsionados.

#### ***Coefficientes estructurales o de capa***

Son coeficientes que están relacionados con parámetros resistentes de bases y subbases granulares, bases tratadas con asfalto y cemento. En base a los mismos se puede proceder al diseño de un paquete estructural para un pavimento flexible. Estos no se usan para el diseño de pavimentos rígidos. En

este caso se obtiene un valor soporte combinado de subbase y subrasante para determinar el espesor necesario de losa de concreto.

### ***Bases permeables.***

Son bases con alto grado de permeabilidad (mayor de 0.35 cm/seg) que permiten que el agua que penetra en el pavimento pueda drenar rápidamente.

Estas bases pueden ser tratadas o no tratadas. En el caso de bases tratadas, estas pueden ser con cemento o con asfalto. Las bases tratadas deben tener suficiente ligante como para mantener el material y brindar estabilidad. En ambos casos debe usarse material de filtro para evitar que esta base drenante se contamine con material fino proveniente de la subrasante.

### **2.3.3.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES PARA PAVIMENTO.**

La interacción entre los materiales, el clima, el tráfico, la respuesta estructural y el comportamiento de los componentes de predicción es clara con otros componentes del marco Mecanicista-empírico de la Guía de Diseño. Para proporcionar una base común para entender los requerimientos de los materiales, han sido desarrolladas las siguientes subcategorías Mecanicistas-empíricas:

- Propiedades de los materiales requeridas para calcular respuestas del pavimento.
- Entrada de datos adicionales de los materiales para las funciones de deterioro/transferencia.
- Entrada de datos adicionales de los materiales requeridos para el modelo climático.

En la primera categoría, están las características requeridas de los materiales para predecir el estado de esfuerzo, tensión, y desplazamiento

dentro de la estructura de pavimento cuando están sujetas a una carga externa debido a las llantas. En el acercamiento Mecanicista-empírico seleccionado para la Guía de Diseño, estas propiedades incluye el módulo elástico ( $E$ ) y la relación de Poisson ( $\mu$ ) del material. Estas características son entrada de datos obligatorias para cada capa de pavimento en el sistema.

En la segunda categoría, están todas las entradas de datos de los materiales que ingresan a los modelos de deterioro ó de rugosidad directamente. La clave de los tipos de deterioro ó medidas de comportamiento considerados en el diseño del pavimento flexible, incluyen la fractura por fatiga relacionada a la carga (hacia abajo y hacia arriba), deformación permanente y la fractura transversal. Las medidas de funcionamiento primarias consideradas en diseño del pavimento rígido incluyen la fractura por fatiga relacionada a la carga del concreto hidráulico (hacia abajo y hacia arriba) en JPCP, fallas de juntas transversales en JPCP. Para cada uno de estos deterioros, la respuesta estructural crítica bajo una carga de llanta dada y condición climática, es afectada por las características de los materiales del pavimento tales como módulo y relación de Poisson. Además, los parámetros tales como resistencia, características de extensión-contracción, fricción entre la losa y la base, erosionabilidad de capas subyacentes, características de drenaje de las capas, plasticidad, granulometría, y otros atributos de los materiales, influyen directamente en cómo el material contribuye a un mecanismo de deterioro dado. Estas entradas de datos adicionales de los materiales son específicas al tipo de pavimento y al modelo de deterioro bajo consideración.

Finalmente, en la tercera categoría están las entradas de datos de los materiales que se ingresan en el módulo climático para ayudar a determinar los perfiles de temperatura y humedad a través de la sección transversal del pavimento. Éstos incluyen propiedades índices ingenieriles (índice de plasticidad), parámetros de granulometría (porosidad, tamaño de grano

efectivo, etc.) y las características térmicas (absorbencia, capacidad de calor, coeficiente de expansión térmica, etc.).

La Tabla 2.8 es un resumen de las entradas de datos de los materiales requeridos para el diseño Mecanicista-empírico disponibles por la mayoría de las categorías principales de materiales consideradas en la Guía de Diseño AASHTO 2002 incluyendo asfalto reciclado y capas de concreto hidráulico usados en diseño de rehabilitación y construcción.

#### **2.3.3.6 CATEGORÍAS DE LOS MATERIALES.**

Muchas combinaciones de tipos y calidad de materiales son usados en sistemas de pavimentos rígidos y flexibles. Debido a una agrupación no conveniente de los materiales, se categoriza lo mejor posible las propiedades típicas requeridas para el uso en el análisis Mecanicista-empírico y en la evaluación de los sistemas de pavimento, por tal motivo, una agrupación de la categoría de materiales se ha desarrollado para el uso en la Guía de Diseño.

Los principales sistemas categóricos desarrollados por la Guía de Diseño son presentados en la Tabla 2.9. Se han desarrollado seis grupos principales de materiales:

- Materiales para asfalto.
- Materiales para concreto hidráulico.
- Materiales para estabilizar químicamente.
- Materiales granulares no estabilizados.
- Suelos de subrasante.
- Lecho de rocas.

Categoría de materiales	Entrada de datos requerida de materiales		
	Entrada de datos requerida de materiales para cálculo de respuestas críticas	Adicional entrada de datos requerida de materiales para funciones de deterioro/transferencia	Adicionales entrada de datos requerida de materiales para modelo climático
Materiales de mezcla asfáltica en caliente (esto cubre los agregados de la superficie, carpeta, base y subbase).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Depende de la temperatura-tiempo del módulo dinámico (<math>E^*</math>) de la mezcla de HMA.</li> <li>Relación de Poisson.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistencia a la tensión, tolerancia de arrastre, coeficiente de expansión térmica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Absorbencia de la superficie de onda corta (requerido solamente para la trayectoria de la superficie), conductividad térmica y capacidad calorífica de HMA.</li> <li>Viscosidad de la carpeta asfáltica (rugosidad), caracterización para conteo por envejecimiento</li> </ul>
Materiales de concreto hidráulico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Módulo estático de elasticidad (<math>E</math>) ajustado con el tiempo.</li> <li>Relación de Poisson.</li> <li>Peso unitario.</li> <li>Coeficiente de expansión térmica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Módulo de ruptura, resistencia a la fractura por tensión, tipo de cemento, contenido de cemento, relación agua-cemento, contracción última, cantidad de contracción reversible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Absorbencia de la superficie de onda corta, conductividad térmica y capacidad calorífica del concreto hidráulico.</li> </ul>
Materiales estabilizados químicamente (esto cubre capas de concreto reciclado, tratadas con cemento, suelo-cemento, ceniza-limo-cemento, limo-ceniza y limo estabilizado).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Módulo elástico (<math>E</math>) para alta calidad de concreto reciclado, material tratado con cemento, suelo-cemento, limo-cemento-ceniza, módulo resiliente (<math>M_R</math>) para suelo estabilizado con limo.</li> <li>Relación de Poisson.</li> <li>Peso unitario.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Módulo resiliente mínimo (usado en el diseño de flexibles), módulo de ruptura (usado en el diseño de flexibles), base erosionable (para diseño de rígidos).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conductividad térmica y capacidad calorífica del concreto hidráulico.</li> </ul>
Base/subbase no ligada y materiales de subrasante	<ul style="list-style-type: none"> <li>Módulo resiliente ajustado estacionalmente.</li> <li>Relación de Poisson.</li> <li>Peso unitario.</li> <li>Coeficiente de presión lateral.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Parámetros de graduación y base erosionable (para diseño de rígidos).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Índice plástico, parámetros de graduación, tamaño de grano efectivo, gravedad específica, conductividad hidráulica saturada, contenido de humedad óptima, parámetros para definir la curva característica del suelo-agua.</li> </ul>
Materiales de concreto reciclado – losas de concreto hidráulico fracturadas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Módulo resiliente.</li> <li>Relación de Poisson.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Base erosionable (para diseño de rígidos).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conductividad térmica y capacidad calorífica.</li> </ul>
Mezcla asfáltica en caliente reciclada (procesado en la planta central).	Tratada igual como la mezcla asfáltica en caliente en la trayectoria de la superficie.		
Mezcla asfáltica en frío reciclada (procesado en la planta central o no graduada).	Tratada igual como la mezcla asfáltica en caliente en la trayectoria de la base.		
Pavimento asfáltico frío reciclado (usado como agregado).	Tratada igual como material granular sin sensibilidad a la humedad.		
Lecho de rocas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Módulo elástico (<math>E</math>).</li> <li>Relación de Poisson.</li> <li>Peso unitario.</li> </ul>	Ninguno	Ninguno

**Tabla 2.8. Entrada de datos de la mayoría de las consideraciones por grupo de material.<sup>32</sup>**

<sup>32</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.3.

Uno de los grupos más complicados es “Materiales para asfalto”, debido a la respuesta y comportamiento de estos materiales que son influenciados fuertemente por la temperatura, relación del tiempo de carga, método de mezcla, proceso de mezcla y el grado de daño del material (sistema de pavimento nuevo contra rehabilitado). En realidad, esta categoría puede incluir subgrupos para el cual está disponible una gran distribución de información histórica concerniente a módulos típicos, relación de Poisson, resistencia, propiedades de fractura y deformación permanente.

Los materiales del concreto hidráulico son agrupados en dos subgrupos principales: Losas intactas y losas fracturadas. El subgrupo de las losas fracturadas es generalmente aplicable al concreto hidráulico para rehabilitación que envuelve la reducción intencional de la longitud efectiva de la losa para minimizar la influencia de las grietas en las capas subsecuentes.

La categoría de los materiales químicamente estabilizados cubre un rango de materiales cementantes ó puzolánicos. Se extienden de los materiales que solamente modifican levemente las características de la plasticidad del material original a los materiales que tienen aumentos importantes en módulo, resistencia y otras propiedades ingenieriles clave que pueden aproximarse al comportamiento del material del concreto hidráulico. El limo, la ceniza y el cemento Pórtland son los principales tipos de material cementante en esta categoría.

Las principales características de los materiales asociada con los materiales no ligados esta relacionada al hecho de que el módulo de estos materiales puede ser altamente influenciado por el estado de esfuerzo (no lineal) y de los contenidos de humedad en el sitio. Como regla general, los materiales de agregado grueso tienen un módulo más alto cuando el estado de esfuerzo de confinamiento es incrementado. En contraste, los materiales arcillosos tienden a tener una reducción en el módulo cuando los componentes



del esfuerzo desviatorio u octaédrico es incrementado. Así, cuando ambas categorías de materiales no ligados son dependientes del esfuerzo (no lineal), cada uno se comporta en una dirección diferente cuando los estados de esfuerzos son incrementados.

**Tabla 2.9. Categorías principales de los materiales.<sup>33</sup>**

<p><u>Materiales para asfalto:</u>            Mezcla asfáltica en caliente (HMA) - densa graduada:                Producida en la planta central                Reciclada en el lugar.            Matriz de piedra asfáltica (SMA).            Mezcla asfáltica en caliente – asfalto con gradación abierta.            Mezcla asfáltica en caliente – asfalto con mezcla de arena.            Mezcla de asfalto en frío:                Producida en la planta central                Reciclada en el lugar.</p> <p><u>Materiales para concreto hidráulico:</u>            Losas intactas.            Losas fracturadas:                Grieta/fondo                Rotura/fondo.            Concreto utilizado como agregado para base (rubblized).</p> <p><u>Materiales para estabilizar químicamente:</u>            Agregados estabilizados con cemento.            Suelo cemento.            Lomo-cemento-ceniza.            Limo-ceniza.            Suelos estabilizados con limo.            Agregados estabilizados con cemento de graduación abierta.</p>	<p><u>Base/subbase granular no estabilizada:</u>            Base/subbase granular.            Subbase arenosa.            Asfalto reciclado en frío (usado como agregado):                RAP (incluye trituración).                Pulverizado en el lugar.            Pavimento asfáltico reciclado en frío (HMA más agregado de base/subbase).</p> <p><u>Suelos de subrasante:</u>            Suelos gravosos (A-1, A-2).            Suelos arenosos:                Arenas finas (A-3).                Arenas densas (A-3).                Arenas limosas (A-2-4, A-2-5).                Arenas arcillosas (A-2-6, A-2-7)            Suelos limosos (A-4, A-5).            Suelos arcillosos:                Arcillas de baja plasticidad (A-6):                    Seca-dura.                    Rígida húmeda.                    Mojada/asentado suavemente.                Arcillas de alta plasticidad (A-7):                    Seca-dura.                    Rígida húmeda.                    Mojada/asentado suavemente.</p> <p><u>Lecho de rocas:</u>            Sólido, masivo y continuo.            Altamente fracturadas, desgastado.</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Adicionalmente, la deformación permanente (repetitivo desplazamiento cortante) puede ser de suma preocupación en capas de materiales más débiles o en las capas que no estén bien protegidas. Mientras que esta categoría de materiales puede exponerse a fuertes comportamientos no lineales, el estado de habilidad que hay para la metodología del proceso de cálculo actual, no

<sup>33</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.6.

podrían estimar exactamente los coeficientes no lineales in situ, pero que pueden ser evaluados y obtenidos a través de programas de pruebas de laboratorio.

La categoría del lecho de roca es digno de mencionar también porque su presencia cerca de la estructura del pavimento puede requerir al diseñador explicar correctamente el módulo alto de la capa para obtener las predicciones exactas de esfuerzo, tensión y desplazamiento del pavimento. Mientras que es rara la medida exacta del módulo, si no es que siempre, garantizado, cualquier capa de lecho de roca se debe incorporar en el análisis si éste se encuentra cerca de la estructura del pavimento, particularmente si el proceso de cálculo es utilizado como parte de un análisis de la rehabilitación.

#### **2.3.3.7 CARACTERIZACIÓN DE LA ENTRADA DE DATOS PARA EL GRUPO DE MATERIALES DEL CONCRETO ASFÁLTICO.**

Esta categoría aplica a los materiales tratados con asfalto de acuerdo a las siguientes definiciones (ver Tabla 2.9):

- Mezcla asfáltica en caliente – densa graduada.
  - Producida en la planta central.
  - Reciclada en el lugar.
- Mezcla asfáltica en caliente – asfalto con graduación abierta.
- Mezcla asfáltica en caliente – mezclas asfálticas de arena.
- Pavimento de concreto asfáltico reciclado:
  - Mezcla reciclada en caliente (procesado en la planta central).
  - Mezcla reciclada en frío (procesado en la planta central ó procesado con graduación).

Estos materiales podrían ser utilizados en la construcción de la superficie, base y subbase en un sistema de pavimento.

## **MÓDULOS DE CAPAS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS NUEVOS.**

### *Estimación del módulo dinámico.*

La propiedad primaria de rigidez de interés para materiales asfálticos es la temperatura-tiempo que depende el módulo dinámico ( $E^*$ ). La Tabla 2.10 proporciona un resumen de varios procedimientos y los niveles de entradas de datos para obtener el valor de  $E^*$  para el diseño de pavimentos nuevos.

Las propiedades del módulo del concreto asfáltico son conocidas para ser una función de la temperatura, relación de cargas, envejecimiento y características de la mezcla tales como la rigidez de la carpeta, graduación de los agregados, contenido de la carpeta y relación de vacíos. Para considerar la temperatura y la relación de los efectos de las cargas, el módulo del concreto asfáltico para todos los niveles de entrada de datos serán determinados de una curva maestra construida con una temperatura de referencia de 70°F (21°C).

La curva maestra es construida usando el principio de superposición tiempo-temperatura. Lo primero, una referencia de temperatura estándar es seleccionada (en este caso 70°F), y luego los diferentes datos de temperaturas son cambiados con respecto al tiempo hasta que la curva se unifique en una función bien definida. La curva maestra de los módulos cuando una función del tiempo es formada de esta manera, describe el tiempo de dependencia del material. La cantidad de cambios en cada temperatura requerida para formar la curva maestra, describe la dependencia de temperatura del material. Así, ambas curvas maestras y el cambio de factores son necesarios para una descripción completa de los efectos de velocidad y temperatura.

**Tabla 2.10. Estimación del módulo dinámico ( $E^*$ ) del asfalto con los niveles de entrada de datos para el diseño de pavimentos nuevos.<sup>34</sup>**

Categoría del grupo de material	Nivel de entrada de datos	Descripción
Materiales de asfalto	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar la prueba de laboratorio (NCHRP 1-28A) de <math>E^*</math> a frecuencias de cargado y temperaturas de interés para la mezcla dada.</li> <li>• Realizar las pruebas de módulo complejo de cortante de la carpeta (<math>G^*</math>) y el ángulo de fase (<math>\delta</math>) en la carpeta asfáltica propuesta (AASHTO T 315) con <math>\omega=1.59</math> Hz (10 rad/s) a través de un rango de temperaturas.</li> <li>• De los datos de prueba de la carpeta estimar Ai-VTSi para la temperatura de compactación de la mezcla</li> <li>• Desarrollar la curva maestra para la mezcla asfáltica que exactamente defina la dependencia del tiempo-temperatura incluyendo el envejecimiento.</li> </ul>
	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No es requerida prueba de laboratorio para <math>E^*</math>.</li> <li>• Usar la ecuación para predecir <math>E^*</math>.</li> <li>• Realizar <math>G^*\text{-}\delta</math> en la carpeta asfáltica propuesta (AASHTO T 315) con <math>\omega=1.59</math> Hz (10 rad/s) a través de un rango de temperaturas. La viscosidad o la rigidez de la carpeta pueden ser estimados también usando los datos de prueba convencional del asfalto tales como Punto de ablandamiento del anillo y de la bola, viscosidad absoluta y cinemática ó usar el viscosímetro de Brookfield.</li> <li>• Desarrollar el Ai-VTSi para la temperatura de la mezcla.</li> <li>• Desarrollar la curva maestra para la mezcla de asfalto que exactamente define la dependencia del tiempo-temperatura incluyendo el envejecimiento.</li> </ul>
	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No es requerida prueba de laboratorio para <math>E^*</math>.</li> <li>• Usar la ecuación para predecir <math>E^*</math>.</li> <li>• Usar los valores típicos de Ai-VTSi provistos en el software de la Guía de Diseño basado en PG, viscosidad ó grado de penetración de la carpeta.</li> <li>• Desarrollar la curva maestra para la mezcla de asfalto que exactamente define la dependencia del tiempo-temperatura incluyendo el envejecimiento.</li> </ul>

La curva maestra del módulo dinámico puede ser representada por la función sigmoïdal descrita por la siguiente ecuación:

<sup>34</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.9.

$$\log(E^*) = d + \frac{a}{1 + e^{b+\delta(\log t_r)}} \quad (2.10)$$

Donde:

$E^*$ : Módulo dinámico.

$t_r$ : Tiempo de cargado a la temperatura de referencia.

$\delta, a$ : Parámetros de ajuste. Para datos dados,  $\delta$  representa el valor mínimo de  $E^*$  y  $\delta+a$  representa el valor máximo de  $E^*$ .

$\beta, \gamma$ : Parámetros que describen la forma de la función sigmoidea.

Los parámetros de ajuste  $\delta$  y  $a$  dependen de la graduación de los agregados, el contenido de la carpeta y la relación de vacíos. Los parámetros de ajuste  $\beta$  y  $\gamma$  dependen de las características de la carpeta asfáltica y de la magnitud de  $\delta$  y  $a$ . La función sigmoidea describe el tiempo de dependencia de los módulos a la temperatura de referencia. Los factores de cambio describe la dependencia de la temperatura y de los módulos. La ecuación 2.12 provee la forma general de los factores de cambio.

$$t_r = \frac{t}{a(T)} \quad (2.11)$$

$$\log(t_r) = \log(t) - \log[a(T)] \quad (2.12)$$

Donde:

$t_r$ : Tiempo de cargado a la temperatura de referencia.

$t$ : Tiempo de cargado a la temperatura de interés dada.

$a(T)$ : Factores de cambio como una función de la temperatura.

$T$ : Temperatura de interés.

Usando la ecuación anterior, el tiempo de cargado a la temperatura de referencia puede ser calculada para cualquier tiempo de cargado a cualquier temperatura. Así, los módulos apropiados pueden ser calculados de la ecuación 2.12 usando el tiempo de cargado a la temperatura de cargado.

Viscosidad de la carpeta.

La viscosidad de la carpeta asfáltica a la temperatura de interés es un crítico parámetro de entrada de datos para la ecuación del módulo dinámico y en la determinación de los factores de cambio. Para condiciones sin envejecimiento del asfalto, la viscosidad de la carpeta asfáltica a la temperatura de interés es determinada de la relación de la temperatura de la viscosidad de ASTM, definida por la ecuación 2.13:

$$\log \log h = A + VTS \log T_R \quad (2.13)$$

Donde:

$\eta$ : Viscosidad, cP (centipoise).

$T_R$ : Temperatura, Rankine.

$A$ : Regresión intercepto.

$VTS$ : Regresión pendiente de la temperatura de susceptible de la viscosidad.

En el nivel jerárquico 1 de la entrada de datos, los parámetros  $A$  y  $VTS$  de la ecuación anterior pueden ser estimados de los datos de la prueba reolómetro dinámico de corte de acuerdo a AASHTO T 315. En forma alterna, en todos los niveles de entrada, los parámetros  $A$  y  $VTS$  pueden ser obtenidos de una serie de pruebas convencionales incluyendo la viscosidad, punto de ablandamiento y penetración.

Efectos del envejecimiento del asfalto.

El efecto del envejecimiento es incorporado en la determinación del módulo dinámico utilizando el Sistema de Envejecimiento Global. Este sistema proporciona modelos que describen el cambio en la viscosidad que ocurren durante el mezclado y la compactación, así como también el envejecimiento en el sitio a largo plazo. El Sistema de Envejecimiento Global incluye cuatro modelos:

- Modelo original para mezclar/colocar.

- Modelo del envejecimiento de la superficie.
- Ajuste de la relación de vacíos.
- Modelo de la profundidad de la viscosidad.

El modelo original para mezclar/colocar considera el envejecimiento a largo plazo que ocurre durante el mezclado y la compactación de los materiales. El modelo de envejecimiento de la superficie predice la viscosidad de la carpeta en la superficie del pavimento después de algún período de tiempo usando la viscosidad al mezclar/colocar. Si es garantizado, la viscosidad de la superficie del modelo de envejecimiento de la superficie, puede ser ajustada para diferentes contenidos de relación de vacíos utilizando el modelo de ajuste de la relación de vacíos. Finalmente, la viscosidad como una función de profundidad es determinada usando la viscosidad del modelo de envejecimiento de la superficie ó del modelo de ajuste de la relación de vacíos, junto con el modelo de la profundidad de la viscosidad. La salida de datos del Sistema de Envejecimiento Global es una predicción de la viscosidad de la carpeta en cualquier tiempo y a cualquier profundidad en el sistema de pavimento. El Sistema de Envejecimiento Global es una parte integral del software de la Guía de Diseño.

La ecuación 2.14 presenta el Sistema de Envejecimiento Global del modelo de envejecimiento a largo plazo. El valor de *code* está vinculado a la relación de endurecimiento, definido como la relación del log-log de la viscosidad mezclar/colocación (RTFO) y el log-log de la viscosidad original. La tabla 2.11 resume los valores de *code* recomendados.

$$\begin{aligned}\log \log (h_{t=0}) &= a_0 + a_1 \log \log (h_{orig}) \\ a_0 &= 0.054405 + 0.004082 \times code \\ a_1 &= 0.972035 + 0.010886 \times code\end{aligned}\tag{2.14}$$

Donde:

$\eta_{t=0}$ : Viscosidad de mezclar/colocación, centipoise.

$\eta_{\text{orig}}$ : Viscosidad original, centipoise.

*code*: relación de endurecimiento (0 para el promedio).

**Tabla 2.11. Valores recomendados de *code*.<sup>35</sup>**

Resistencia del endurecimiento en mezclar/colocar	Valores de la relación de endurecimiento esperado	Valor de <i>code</i>
Excelente a bueno	$HR \leq 1.030$	-1
Promedio	$1.030 < HR \leq 1.075$	0
Bueno	$1.075 < HR \leq 1.100$	1
Pobre	$HR > 1.100$	2

La ecuación 2.15 presenta la viscosidad del modelo del envejecimiento de la superficie en servicio. El modelo es una función hiperbólica e incluye el efecto del envejecimiento en el medio ambiente a largo plazo. Las consideraciones del medio ambiente se ingresan a través del uso de la temperatura promedio anual del aire en el parámetro *A*.

$$\log \log (h_{\text{aged}}) = \frac{\log \log (h_{t=0}) + At}{1 + Bt} \quad (2.15)$$

Donde:

*A*:  $-0.004166 + 1.41213(C) + (C) \log (Maat) + (D) \log \log (\eta_{t=0})$ .

*B*:  $0.197725 + 0.068384 \log (C)$ .

*C*:  $10^{274.4946 - 193.831 \cdot \log(T_R) + 33.9366 \cdot \log(T_R)^2}$ .

*D*:  $-14.5521 + 10.47662 \log (T_R) - 1.88161 \log (T_R)^2$ .

$\eta_{\text{aged}}$ : Viscosidad de envejecimiento, centipoise.

$\eta_{t=0}$ : Viscosidad de mezclar/colocación, centipoise.

*Maat*: Temperatura promedio anual del aire, °F.

*T<sub>R</sub>*: Temperatura en Rankine.

*t*: Tiempo en meses.

El factor de modificación para la relación de vacíos, ajusta la viscosidad del modelo de envejecimiento de la superficie para efectos de la relación de

<sup>35</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.14.



vacíos. La ecuación 2.16 presenta la ecuación para ajustar el envejecimiento de la viscosidad para la relación de vacíos. El factor de ajuste de la relación de vacíos,  $F_V$ , es una función de la relación de vacíos en el tiempo de interés como es mostrado en la ecuación 2.17. La relación de vacíos en el tiempo de interés puede alternadamente ser estimado de la relación de vacíos inicial usando la ecuación 2.18.

$$\log \log (h_{aged})' = F_V \log \log (h_{aged}) \quad (2.16)$$

$$F_V = \frac{1 + 1.0367 \times 10^{-4} (VA)(t)}{1 + 6.1798 \times 10^{-4} (t)} \quad (2.17)$$

$$VA = \frac{VA_{orig} + 0.011(t) - 2}{1 + 4.24 \times 10^{-4} (t)(Maat) + 1.169 \times 10^{-3} \left( \frac{t}{h_{orig,77}} \right)} + 2 \quad (2.18)$$

Donde:

$VA_{orig}$ : Relación de vacíos inicial.

$t$ : Tiempo en meses.

$Maat$ : Temperatura promedio anual del aire, °F.

$\eta_{orig,77}$ : Viscosidad de mezclar/colocación, centipoise.

Finalmente, el modelo de profundidad describe el envejecimiento de la viscosidad como una función de la profundidad basado del modelo del envejecimiento de la viscosidad de la superficie y de la viscosidad de mezclar/colocación. La ecuación 2.19 presenta la relación de la profundidad de la viscosidad:

$$h_{t,z} = \frac{n_t (4 + E) - E(h_{t=0})(1 - 4z)}{4(1 + Ez)} \quad (2.19)$$

Donde:

$\eta_{t,z}$ : Envejecimiento de la viscosidad en el tiempo  $t$  y profundidad  $z$ ,  
MPoise.

$\eta$ : Envejecimiento de la viscosidad en la superficie, MPoise.

$z$ : Profundidad, pulg.

$E$ :  $23.83e^{(-0.0308 \text{ Maat})}$ .

$Maat$ : Temperatura promedio anual del aire, °F.

En resumen, la curva maestra del módulo dinámico en la forma de una función sigmoideal, puede ser desarrollada para cada cambio de dato de prueba de laboratorio usando la ecuación del módulo dinámico. En ambos casos, el resultado del cambio de factores puede ser expresado como una función de la viscosidad de la carpeta. Esto permite la consideración del envejecimiento de la carpeta usando el Sistema de Envejecimiento Global. Este sistema proporciona una serie de modelos para ajustar la viscosidad de la carpeta original para el envejecimiento a corto plazo el cual ocurra durante el mezclado y las operaciones de colocación y el envejecimiento a largo plazo durante el servicio.

#### Implementación de los diferentes niveles jerárquicos.

Esta guía presenta una aproximación unificada de la caracterización de las propiedades de la rigidez del concreto asfáltico. Las mismas aproximaciones básicas y modelos son usados en todos los niveles de entrada de datos. La diferencia primordial es la cantidad de datos de pruebas de laboratorio requeridas. El esquema 2.3 presenta un diagrama para determinar el módulo dinámico, la relación de Poisson para algún índice de cargado, temperatura y edad.

**Nivel I: Datos de Pruebas de Laboratorio**

$$\log(E^*) = d + \frac{a}{1 + e^{b+g\{\log(t)-c[\log(h)-\log(h_r)]\]}}$$

$$\log(t_r) = \log(t) - c [\log(h) - \log(h_r)]$$

Determinar: a, d, b, g y c por la optimización no lineal.

$$\log(t_r) = \log(t) - c [\log(h) - \log(h_r)]$$

c es determinado en el paso 1 en forma experimental.

$$\log(E^*) = d + \frac{a}{1 + e^{b+g[\log(t)]}}$$

**Nivel II y III: Ecuación del Módulo Dinámico**

$$\log(E^*) = d + \frac{a}{1 + e^{b+g_1 \log(f) + g_2 [\log(h)]}}$$

$$\log(t_r) = \log(t) - \frac{g_2}{g_1} [\log(h) - \log(h_r)]$$

a, b, d, g<sub>1</sub> y g<sub>2</sub> son conocidos de la ecuación del módulo dinámico.

$$\log(t_r) = \log(t) - \frac{g_2}{g_1} [\log(h) - \log(h_r)]$$

$$\log(E^*) = d + \frac{a}{1 + e^{b+g_1 \log(f) + g_2 [\log(h)]}}$$

**Paso 1:**

Desarrollar la curva maestra y cambiar los factores a 70°F para la condición original

**Paso 2:**

Calcular el envejecimiento de la viscosidad del Modelo de Envejecimiento Global:

- Mezcla/colocación.
- Largo plazo.
- Profundidad.

**Paso 3:**

Calcular los factores de cambio utilizando la viscosidad apropiada.

**Paso 4:**

Calcular el módulo dinámico

**Paso 5:**

Calcular la relación de Poisson:

$$m = 0.15 + \frac{0.35}{1 + e^{[-12.452 + 2.291 \log(E^*)]}}$$

**Esquema 2.3. Organigrama de la caracterización de los materiales de concreto asfáltico<sup>36</sup>**

<sup>36</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.17.

### **OTRAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE HMA.**

Las propiedades de los materiales adicionales a HMA son requeridos para usarlos en el pronóstico de las grietas por temperatura del HMA. Nótese que las grietas por temperatura están relacionadas con los materiales, por lo tanto, su progreso y desarrollo son determinados por las propiedades del HMA junto con las condiciones climáticas. Las propiedades del HMA que son usadas para predecir las grietas termales son:

- Resistencia a la tensión.
- Tolerancia de arrastre.
- Coeficiente de contracción térmica.
- Absorbencia de la superficie de onda corta.
- Conductividad térmica y capacidad calorífica.

#### *Resistencia a la tensión.*

##### *Nivel 1: Datos de prueba requeridos.*

En el nivel 1 es requerido los datos reales de las pruebas de laboratorio para la resistencia de tensión del HMA a 14° F. Las pruebas deberían ser hechas de acuerdo con AASHTO T 332, “Determinar la tolerancia de arrastre y la resistencia de tensión de la Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA) utilizando el dispositivo de prueba indirecta”.

##### *Nivel 2: Datos de pruebas.*

En el nivel 1 es requerido los datos reales de las pruebas de laboratorio para la resistencia de tensión del HMA a 14° F. Las pruebas deberían ser hechas de acuerdo con AASHTO T 332.

##### *Nivel 3: Correlaciones con otras propiedades de HMA.*

La resistencia de tensión en el nivel 3 esta basado en la ecuación de regresión desarrollada por NCHRP 1-37A. La ecuación de la resistencia de tensión está dada por la ecuación 2.20:

$$\begin{aligned}
 TS(\text{psi}) = & 7416.712 - 114.016 \times Va - 0.304 \times Va^2 \\
 & - 122.592 \times VFA + 0.704 \times VFA^2 \\
 & + 405.71 \times \log_{10}(Pen77) - 2039.296 \times \log_{10}(A)
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

Donde:

TS: Resistencia indirecta de tensión a 14° F.

$V_a$ : Relación de vacío en la construcción de HMA, %.

VFA: Vacíos rellenos con asfalto en la construcción, %.

Pen77: Penetración de la carpeta a 77° F, mm/10.

A: Intercepto susceptible viscosidad-temperatura.

### Tolerancia de arrastre.

#### *Nivel 1: Datos de prueba requeridos.*

En el nivel 1 es requerido los datos reales de las pruebas de laboratorio para la tolerancia de arrastre del HMA. Las pruebas deberían ser hechas de acuerdo con AASHTO T 322.

#### *Nivel 2: Datos de pruebas.*

En el nivel 2 es requerido los datos reales de las pruebas de laboratorio para la tolerancia de arrastre del HMA solamente para la temperatura intermedia de 14° F. Las pruebas deberían ser hechas de acuerdo con AASHTO T 322.

#### *Nivel 3: Correlaciones con otras propiedades de HMA.*

La tolerancia de arrastre en el nivel 3 esta basado en la ecuación de regresión desarrollada por NCHRP 1-37A. La ecuación de la tolerancia de arrastre está dada por la ecuación 2.21, 2.22 y 2.23:

$$D(t) = D_1 \times t^m \tag{2.21}$$

$$\begin{aligned}
 \log(D_1) = & -8.524 + 0.01306 \times Temp + 0.7957 \times \log_{10}(Va) \\
 & + 2.0103 \times \log_{10}(VFA) - 1.293 \times \log_{10}(A)
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

$$m = 1.1628 - 0.00185 \times Temp - 0.04596 \times Va - 0.01126 \times VFA + 0.00247 \times Pen77 + 0.001683 \times Temp \times Pen77^{0.4605} \quad (2.23)$$

Donde:

*Temp*: Temperatura a la cual la tolerancia de arrastre es medida, °F.

*V<sub>a</sub>*: Relación de vacío en la construcción de HMA, %.

*VFA*: Vacíos rellenos con asfalto en la construcción, %.

*Pen77*: Penetración de la carpeta a 77° F, mm/10.

*Coficiente de contracción térmica.*

No hay pruebas estándar AASHTO ó ASTM para determinar el coeficiente de contracción térmica (CTC) de materiales de HMA. El software de la Guía de Diseño calcula el CTC internamente utilizando las propiedades volumétricas de HMA tales como VMA (Vacíos del Agregado Mineral) y del coeficiente de contracción térmica para los agregados. El modelo usado para estimar CTC para la mezcla de concreto asfáltico es mostrada en la ecuación 2.24. Nótese que este modelo es apropiado para los rangos de temperatura más bajos y es una versión modificada de la relación propuesta por Jones.

$$L_{MIX} = \frac{VMA \times B_{ac} + V_{AGG} \times B_{AGG}}{3 \times V_{TOTAL}} \quad (2.24)$$

Donde:

*L<sub>MIX</sub>*: Coeficiente lineal de contracción térmica de la mezcla de concreto asfáltico (1/°C).

*B<sub>ac</sub>*: Coeficiente volumétrico de contracción térmica del cemento asfáltico en estado sólido.

*B<sub>AGG</sub>*: Coeficiente volumétrico de contracción térmica del agregado.

*VMA*: Porcentaje de volumen de vacíos en el agregado mineral (porcentaje equivalente al volumen de aire más el porcentaje del

volumen de asfalto menos el porcentaje del volumen de cemento asfáltico absorbido).

$V_{AGG}$ : Porcentaje del volumen de agregado en la mezcla.

$V_{TOTAL}$ : 100 porciento.

Los valores típicos para el coeficiente de expansión térmica lineal, volumétrica, coeficiente de expansión térmico del cemento asfáltico en estado sólido y el coeficiente volumétrico de contracción térmica de agregados son medidos de varios estudios investigativos de acuerdo a lo siguiente:

- $L_{MX}$ : 2.2 a  $3.4 \times 10^{-5}/^{\circ}F$  (lineal).
- $B_{ac}$ : 3.5 a  $4.3 \times 10^{-4}/^{\circ}C$  (cúbica).
- $B_{AGG}$ : 21 a  $37 \times 10^{-6}/^{\circ}C$  (cúbica).

#### Absorbencia de la superficie de onda corta.

La absorbencia de la superficie de onda corta de una capa depende de su composición, color y textura. Esta cantidad directamente correlaciona con la cantidad de energía solar disponible que es absorbida por la superficie del pavimento. En general, en superficies más reflexivas y más ligeras tienden a tener absorbencias más bajas y viceversa. Las recomendaciones siguientes son las formas para estimar este parámetro en cada nivel jerárquico de entrada de datos:

- Nivel 1: En el nivel 1 es recomendado que este parámetro sea estimado a través de pruebas de laboratorio. No hay un certificado estándar AASHTO actualmente para estimar la absorbencia de onda corta en los materiales para pavimento.
- Nivel 2: No hay correlaciones disponibles. Utilizar los valores por defecto del nivel 3.
- Nivel 3: En el nivel 3, los valores por defecto pueden ser asumidos para varios materiales de pavimento de la siguiente manera:
  - Asfalto desgastado (gris): 0.80-0.90.
  - Asfalto fresco (negro): 0.90-0.98.

Conductividad térmica y capacidad calorífica.

La conductividad térmica,  $K$ , es la cantidad de calor que fluye normalmente a través de un gradiente de unidad de área por unidad de tiempo y por unidad de temperatura. El contenido de unidad tiene una influencia sobre la conductividad térmica del concreto asfáltico.

La capacidad de calor ó térmica es la cantidad real de energía calorífica,  $Q$ , necesaria para cambiar la temperatura de una unidad de masa en un grado. La Tabla 2.12 resume las recomendaciones aproximadas para caracterizar  $K$  y  $Q$  en los diferentes niveles jerárquicos de niveles de entradas:

**Tabla 2.12. Caracterización de las entradas de datos de los materiales del concreto asfáltico para ser calculados por la EICM.<sup>37</sup>**

Propiedades de los materiales	Nivel de entrada de datos	Descripción
Conductividad térmica, $K$ .	1	Es recomendable una medición directa en este nivel (ASTM E 1952: "Prueba del método estándar para conductividad térmica y difusión térmica por exploración calorimétrica diferenciada de la temperatura modulada").
	2	No hay disponibilidad de correlaciones. Utilizar los valores por defecto del nivel 3.
	3	Utilizar valores de diseño selectos basado en datos históricos de Instituciones o de valores típicos mostrados a continuación: <ul style="list-style-type: none"> <li>Rango de valores típicos para el concreto asfáltico que va desde 0.44 a 0.81 BTU/(pie-h-°F).</li> </ul>
Capacidad calorífica, $Q$ .	1	Es recomendable una medición directa en este nivel (ASTM D 2766: "Calor específico de líquidos y sólidos").
	2	No hay disponibilidad de correlaciones. Utilizar los valores por defecto del nivel 3.
	3	Utilizar valores de diseño selectos basado en datos históricos de Instituciones o de valores típicos mostrados a continuación: <ul style="list-style-type: none"> <li>Rango de valores típicos para el concreto asfáltico que va desde 0.22 a 0.40 BTU/(lb-°F).</li> </ul>

<sup>37</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.34.



### **2.3.3.8 CARACTERIZACIÓN DE LA ENTRADA DE DATOS PARA EL GRUPO DE MATERIALES DEL CONCRETO HIDRÁULICO.**

#### ***Módulos de elasticidad para materiales de concreto hidráulico.***

El módulo elástico del concreto hidráulico es un parámetro complejo que es influenciado significativamente por los parámetros de diseño de la mezcla y los modos de prueba. Los parámetros de mezclado que influyen con mayor fuerza en el módulo elástico incluyen:

- Relación del agua con materiales cementantes.
- Proporción relativa de pasta y agregado.
- Tipo de agregado.

Es importante la relación del agua con materiales cementantes para determinar la porosidad de la pasta. En general, si esta relación incrementa, incrementa la porosidad y decrece el módulo elástico. El grado de hidratación de la pasta de cemento también afecta a la porosidad de la pasta; al incrementar la hidratación (curados de períodos largos, altas temperaturas) y la edad, resulta un decrecimiento en la porosidad y un aumento en el módulo elástico.

Las características de los agregados son importantes para determinar el módulo elástico del concreto hidráulico debido a sus altos módulos elásticos relativos (comparados con la pasta de cemento) y su control de estabilidad volumétrica. Los altos contenidos y el uso de módulos altos de agregados, generalmente son asociados con valores altos de módulos del concreto hidráulico. La resistencia, la oblicuidad y la textura de la superficie de los agregados también afecta el modo y la tasa de desarrollo y prolongación de las grietas en el concreto hidráulico.

Los parámetros de prueba también afecta la elasticidad indicada ó medida en el concreto hidráulico. Estos factores de prueba incluyen tamaño del espécimen, método de prueba o de cálculo, velocidad de aplicación de la carga, grado de saturación del concreto hidráulico y la temperatura del concreto hidráulico cuando son sometidos a las pruebas respectivas. Para el caso, el módulo elástico del concreto hidráulico incrementa cuando el grado de saturación y la velocidad de cargado incrementan. Estos efectos implican también que el concreto hidráulico responde a diferentes condiciones de servicio.

El pavimento en el análisis de respuesta mecanicista, el módulo elástico del concreto rígido ( $E_c$ ) tiene un efecto muy fuerte en la deflexión y en los esfuerzos a través de la estructura de pavimento y debe ser considerada apropiadamente. Los módulos de los materiales en el concreto hidráulico caen en los siguientes tres grupos de discusión:

- Caracterización de los módulos del concreto hidráulico para pavimentos nuevos ó reconstruidos de JPCP, proyectos de CRCP y sobrecapas de concreto hidráulico.
- Caracterización de módulos de concreto hidráulico para capas de pavimentos existentes siendo considerados para rehabilitación con otras sobrecapas ó para restauración (aplicado solamente para JPCP).
- Caracterización de módulos de capas de concreto hidráulico fracturadas (grietas y fondos, roturas y fondos ó reciclado de losas fracturadas).

Los últimos dos grupos no serán discutidos en este documento por no encontrarse dentro de los objetivos del presente trabajo.

Caracterización del módulo del concreto hidráulico para JPCP nuevos.

La Tabla 2.13 resume los procesos para estimar el módulo elástico del concreto hidráulico en los diferentes niveles de entrada para materiales de concretos de baja resistencia recientes.

**Tabla 2.13. Estimación del módulo elástico del concreto hidráulico para el diseño de pavimentos nuevos, reconstruidos ó sobrecapas.<sup>38</sup>**

Grupo de material	Tipo de diseño	Nivel de entrada de datos	Descripción
Concreto hidráulico (losas)	Nuevo	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>El módulo de elasticidad, <math>E_c</math>, será determinado directamente por pruebas de laboratorio. Esto es un módulo de un arreglo obtenido de ASTM C 469 a varias edades (7, 14, 28, 90 días).</li> <li>Estimar la relación la relación del módulo elástico de 20 años a 28 días (a largo plazo).</li> <li>Desarrollar curvas de aumento de módulos usando los datos de pruebas y la relación de módulos a largo plazo para predecir <math>E_c</math> en cualquier momento en toda la vida de diseño.</li> </ul>
		2	<ul style="list-style-type: none"> <li>El módulo de elasticidad, <math>E_c</math>, será determinado indirectamente por pruebas de resistencia a la compresión a varias edades (7, 14, 28, 90 días). La prueba recomendada para determinar <math>f'_c</math> es AASHTO T 22. el valor de <math>E_c</math> puede ser también ingresado directamente si es deseado.</li> <li>Estimar la relación de esfuerzo de compresión de 20 años a 28 días.</li> <li>Convertir <math>f'_c</math> a <math>E_c</math> usando la siguiente relación:  <math display="block">E_c = 33r^{3/2} (f'_c)^{1/2} \text{ psi}</math> </li> <li>Desarrollar curvas de aumento de módulos usando los datos de pruebas y la relación de módulos a largo plazo para predecir <math>E_c</math> en cualquier momento en toda la vida de diseño</li> </ul>
		3	<ul style="list-style-type: none"> <li>El módulo de elasticidad del concreto hidráulico, <math>E_c</math>, será determinado indirectamente de la estimación de la resistencia a la flexión (<math>MR</math>) ó <math>f'_c</math> a los 28 días. <math>MR</math> puede ser determinado de pruebas (AASHTO T 97) ó de datos históricos. Asimismo, <math>f'_c</math> puede ser estimado de pruebas (AASHTO T 22) ó de datos históricos. El valor de <math>E_c</math> también puede ser ingresado directamente.</li> <li>Si <math>MR</math> es estimado a los 28 días, su valor en cualquier tiempo dado, <math>t</math>, es determinado usando:  <math display="block">MR(t) = 1 + \log_{10} \left( \frac{t}{0.0767} \right) - 0.01566 \times \log_{10} \left( \left( \frac{t}{0.0767} \right)^2 \right) \times MR_{28 \text{ días}}</math> </li> <li>Estimar <math>E_c(t)</math> para estimar primero <math>f'_c(t)</math> de <math>MR(t)</math> y luego convertir <math>f'_c(t)</math> a <math>E_c(t)</math> utilizando la siguiente relación:  <math display="block">f'_c = \left( \frac{MR}{9.5} \right)^2 \text{ psi}</math> <math display="block">E_c = 33r^{3/2} (f'_c)^{1/2} \text{ psi}</math> </li> <li>Si <math>f'_c</math> es estimado a los 28 días, convertirlo primero a un valor de <math>MR</math> utilizando la ecuación de arriba y luego proyectar <math>MR(t)</math>.</li> </ul>

<sup>38</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.36.

### ***Relación de Poisson para materiales de concreto hidráulico.***

La relación de Poisson es requerida como entrada de dato para el cálculo del modelo de respuesta estructural, aunque su efecto en el cálculo de la respuesta del pavimento no es grande. Consecuentemente, este parámetro es raramente medido y es a menudo asumido con consideraciones mínimas para el diseño de mezcla específico del concreto hidráulico.

En el nivel 1 de la entrada de datos, la relación de Poisson puede ser determinada simultáneamente con la determinación del módulo elástico, de acuerdo a ASTM C 469. En el nivel 2, no es aplicable debido a que no hay correlaciones o alguna relación que pueda ser usada para estimar la relación de Poisson de las características de los componentes de los materiales ó de otras pruebas. Y finalmente, en la entrada de datos del nivel 3, pueden ser utilizados los valores típicos mostrados en la Tabla 2.14. Los rangos de valores de la relación de Poisson para concreto normal es de 0.11 a 0.21, y los valores entre 0.15 y 0.18 son típicamente asumidos para el diseño de concreto hidráulico.

**Tabla 2.14. Valores típicos de la relación de Poisson para materiales de concreto hidráulico.<sup>39</sup>**

<b>Materiales de concreto hidráulico</b>	<b>Nivel 3 <math>\mu</math>rango</b>	<b>Nivel 3 <math>\mu</math>típica</b>
Losas de concreto hidráulico (nuevas, construidas ó existentes)	0.15-0.25	0.20
Losa Fracturada:		
Grieta/fondo	0.15-0.25	0.20
Rotura/Fondo	0.15-0.25	0.20
Losas utilizadas para agregado	0.25-0.40	0.30

### ***Resistencia a la flexión de materiales de concreto hidráulico.***

La resistencia a la flexión ( $MR$ ) puede ser definido como el esfuerzo de tensión máximo a la ruptura en el fondo de una viga de concreto simplemente apoyada durante una prueba de flexión con tres puntos de carga. Como en

<sup>39</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.43.

todas las medidas de la resistencia del concreto hidráulico,  $MR$  es fuertemente influenciado por los parámetros de la mezcla. Esto incluye:

- Componentes de la mezcla:
  - Tipo de cemento.
  - Contenido de cemento.
  - Presencia y tipo de adiciones químicas ó minerales.
  - Relación del agua con materiales cementantes (cemento y puzolana).
  - Propiedades de agregados (incluye el tipo de agregado, tamaño máximo de la partícula, graduación, forma de la partícula y textura de la superficie).
- Curado.
- Edad.
- Pruebas de condición, método y equipo.

El valor de  $MR$  tiene un efecto significativo en las grietas por fatiga de las losas de concreto hidráulico para cualquier magnitud dada de repeticiones de esfuerzos de flexión. Por lo tanto, este parámetro necesita ser caracterizado con cuidado en el diseño de pavimentos rígidos. La discusión de la resistencia de flexión del concreto hidráulico cae en los siguientes dos grupos de discusión:

- Caracterización de la resistencia a la flexión de los materiales de concreto hidráulico usados en JPCP nuevos ó reconstruidos.
- Caracterización de la resistencia a la flexión de capas de pavimentos de concreto hidráulico siendo considerados para rehabilitación con sobrecapas ó para restauración (aplicable solamente para JPCP).

El último grupo no será discutido en este documento por no encontrarse dentro de los objetivos del presente trabajo.

Caracterización de la resistencia a la flexión para JPCP nuevos.

La Tabla 2.15 resume los procesos para estimar  $MR$  del concreto hidráulico para los diferentes niveles de entrada de datos para materiales de concreto de baja resistencia reciente.

**Tabla 2.15. Estimación del  $MR$  del concreto hidráulico para diseños nuevos ó reconstruidos y para diseño de sobrecapas.<sup>40</sup>**

Categoría del grupo de material	Tipo de diseño	Nivel de entrada de datos	Descripción
Concreto hidráulico (losas).	Nuevos	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>La <math>MR</math> del concreto hidráulico será determinado directamente por pruebas de laboratorio usando el protocolo AASHTO T 97 a diferentes edades (7, 14, 28, 90 días).</li> <li>Estimar la relación de <math>MR</math> de 20 años a 28 días (largo plazo).</li> <li>Desarrollar las curvas de aumento de resistencia utilizando los datos de prueba y la relación de resistencia a largo plazo para predecir <math>MR</math> en cualquier momento a lo largo de la vida de diseño.</li> </ul>
		2	<ul style="list-style-type: none"> <li>El <math>MR</math> será determinado indirectamente de las pruebas de resistencia a la compresión a diferentes edades (7, 14, 28, 90 días). La prueba recomendada para determinar <math>f'c</math> es AASHTO T 22.</li> <li>Estimar la relación de resistencia de compresión de 20 años a 28 días.</li> <li>Desarrollar las curvas de aumento de resistencia a la compresión utilizando los datos de prueba y la relación de resistencia a largo plazo para predecir <math>f'c</math> en cualquier momento a lo largo de la vida de diseño.</li> <li>Estimar <math>MR</math> de <math>f'c</math> en cualquier tiempo dado usando la siguiente relación: <math>MR = 9.5 \times (f'c)^{1/2}</math> psi.</li> </ul>
		3	<ul style="list-style-type: none"> <li>El aumento de la resistencia a la flexión a través del tiempo será determinado de estimaciones de <math>MR</math> y <math>f'c</math> a 28 días.</li> <li>Si <math>MR</math> es estimado, usar la ecuación de abajo para determinar la relación de esfuerzos a través de la vida de diseño del pavimento. Los valores reales de resistencia pueden ser determinados multiplicando la relación de resistencia con valor estimado de <math>MR</math> a los 28 días. <math display="block">F_{STRRATIO} = 1.0 + 0.12 \log_{10} \left( \frac{AGE}{0.0767} \right) - 0.01566 \left[ \log_{10} \left( \frac{AGE}{0.0767} \right) \right]^2</math> </li> <li>Si <math>f'c</math> es estimado, convertir <math>f'c</math> a <math>MR</math> usando la ecuación del nivel 2 y luego usar la ecuación de arriba para estimar la resistencia a la flexión en cualquier edad de interés del pavimento.</li> </ul>

<sup>40</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.45.

**Resistencia a la compresión de materiales del concreto hidráulico.**

La resistencia a la compresión de los materiales del concreto hidráulico es requerida solamente para estimar el módulo elástico, la resistencia a la flexión en los niveles jerárquicos de entrada de datos 2 y 3.

**Peso unitario de los materiales del concreto hidráulico.**

La tabla 2.16 presenta las recomendaciones aproximadas para determinar el peso unitario de los materiales del concreto hidráulico usados en las capas de la superficie en JPCP en los diferentes niveles jerárquicos de entrada de datos.

**Tabla 2.16. Estimación del peso unitario de los materiales del concreto hidráulico.<sup>41</sup>**

Categoría de los grupos de materiales	Tipo de diseño	Niveles de entrada	Descripción
Concreto hidráulico	Nuevos	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estimar el valor de pruebas desarrolladas de acuerdo con AASHTO T 121, “Masa por metro cúbico, producción y contenido de aire (gravimétrico) del concreto”.</li> </ul>
		2	<ul style="list-style-type: none"> <li>No aplicable.</li> </ul>
		3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Usar valores de diseño selectos basados en datos históricos de instituciones ó de valores típicos mostrado a continuación:               <ul style="list-style-type: none"> <li>Rango típico para el peso normal del concreto: 140 a 160 lb/ft<sup>3</sup>.</li> </ul> </li> </ul>

**Coefficiente de expansión térmica del concreto hidráulico.**

El coeficiente de expansión térmica ( $\alpha_{PCC}$ ) es definido como el cambio de unidad de longitud por el cambio de un grado de temperatura. Cuando el  $\alpha_{PCC}$  es conocido, el libre cambio en la longitud producido por un cambio dado en la temperatura puede ser calculado así:

$$\Delta L = \alpha_{PCC} \Delta T L \quad (2.25)$$

Donde:

<sup>41</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.52.

$\Delta L$ : Cambio en la unidad de longitud del concreto hidráulico debido al cambio de temperatura de  $\Delta T$ .

$\alpha_{PCC}$ : Coeficiente de expansión lineal del concreto hidráulico, tensión por  $^{\circ}F$ .

$\Delta T$ : Cambio de temperatura ( $T_2 - T_1$ ),  $^{\circ}F$ .

$L$ : Longitud del espécimen (espaciamiento entre juntas).

El  $\alpha_{PCC}$  es fuertemente influenciado por el tipo de agregado pero es afectado también por la dureza de la pasta y otros factores de mezcla del concreto hidráulico. Debido a que  $\alpha_{PCC}$  puede ser estimado de los promedios de los componentes pesados de la mezcla del concreto hidráulico, los agregados tienen los efectos más marcados debido a que típicamente abarcan entre el 70 al 80 por ciento del volumen del concreto. Sin embargo, el coeficiente es también una función del volumen de la pasta del cemento, contenido de humedad, porosidad y el grado de hidratación (edad) de la pasta.

El hecho es que esta característica del concreto no ha sido usada en previos procesos de diseño de pavimento, tiene un amplio rango de posibles valores y no es tan familiar para los diseñadores de pavimento, esto lo hace más importante para obtener valores apropiados para el diseño. Han sido estimados los tres niveles de entrada de datos provistos para  $\alpha_{PCC}$ .

#### Estimación de $\alpha_{PCC}$ para la entrada de datos en el nivel 1.

El método para determinar  $\alpha_{PCC}$  en el nivel 1, envuelve mediciones directas de los cambios en la longitud de especímenes de laboratorio expuestos a cambios de temperatura, utilizando AASHTO TP 60, "Prueba de método estándar para el coeficiente de expansión térmica del concreto hidráulico".

#### Estimación de $\alpha_{PCC}$ para la entrada de datos en el nivel 2.

El método para determinar  $\alpha_{PCC}$ , utiliza un método lineal, promedio de los pesos de los componentes de la expansión térmica (agregado y pasta),



valores basados en los volúmenes relativos de los componentes (ver ecuación 2.26). La tabla 2.17 proporciona coeficientes de expansión térmica típicos, para varios componentes comunes de concreto hidráulico y mezclas compiladas de varias fuentes.

$$a_{PCC} = a_{agg} \times V_{agg} + a_{pasta} \times V_{pasta} \quad (2.26)$$

Donde:

$a_{agg}$ : Coeficiente de expansión térmica del agregado.

$V_{agg}$ : Porción volumétrica de los agregados en la mezcla de concreto hidráulico.

$a_{pasta}$ : Coeficiente de expansión térmica de la pasta de cemento.

$V_{pasta}$ : Porción volumétrica de la pasta en la mezcla de concreto hidráulico.

**Tabla 2.17. Rangos típicos de valores de  $\alpha$  para componentes comunes y concretos.<sup>42</sup>**

Tipo de material	Coeficiente de expansión térmica, $10^{-6}/^{\circ}\text{F}$	Coeficiente de expansión térmica del concreto (hecha de este material, $10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ )
<b>Agregados</b>		
Mármol	2.2-3.9	2.3
Piedras calizas	2.0-3.6	3.4-5.1
Granitos	3.2-5.3	3.8-5.3
Sienitas, domitas, andesitas, basalto, gabros, diabasa	3.0-4.5	4.4-5.3
Dolomitas	3.9-5.5	5.1-6.4
Escoria de altos hornos	-	5.1-5.9
piedras areniscas	5.6-6.7	5.6-6.5
Arena de cuarzo y gravas	5.5-7.1	6.0-8.7
Cuarcita	6.1-7.0	6.6-7.1
<b>Pasta de cemento (saturada)</b>		
Relación agua-cemento=0.4 a 0.6.	10-11	-

### Estimación de $a_{PCC}$ para la entrada de datos en el nivel 3.

El método para determinar  $a_{PCC}$  lineal, está basado en el promedio global histórico. El mayor potencial de error esta asociada con esta opción debido a

<sup>42</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.54.

que los materiales del concreto hidráulico varían considerablemente. Si no es conocido la fuente ó el tipo de agregado utilizado en el concreto, podría ser utilizado un promedio total de muchas mezclas de concreto hidráulico.

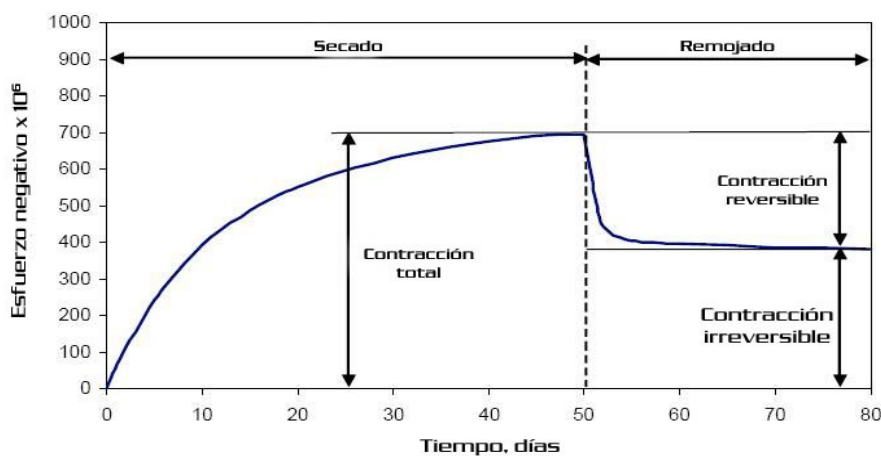
### ***Contracción del concreto hidráulico.***

La contracción por secado del concreto endurecido es un factor importante que afecta el comportamiento de los pavimentos de concreto hidráulico. Para JPCP, el principal efecto de la contracción por secado es la curvatura de la losa causado por el diferencial de contracción debido a la variación por el espesor en las condiciones de humedad que conducen al incremento de grietas susceptiblemente. Para el comportamiento de las fallas en JPCP, la curvatura de la losa y la magnitud del esfuerzo por tensión de la contracción, son importantes para la abertura de juntas.

La magnitud de la contracción por secado depende de numerosos factores, incluyendo el agua por unidad de volumen, el tipo y contenido de agregado, tipo de cemento, humedad relativa del ambiente, temperatura, curado y espesor del concreto hidráulico.

La contracción por secado se desarrolla a través del tiempo cuando el concreto hidráulico es sujeto a sequía. A través del remojo, el concreto hidráulico se expande para revertir una porción de la contracción por secado, pero algunas de las contracciones que ocurren en la primera sequía, son irreversibles. El factor principal que afecta la porción reversible de la contracción es la humedad relativa del ambiente.

La Figura 2.22 ilustra el comportamiento típico del concreto hidráulico en sequía y remojo.



**Figura 2.22. Comportamiento típico del concreto hidráulico en el secado y remojado.**<sup>43</sup>

Las entradas de datos relacionadas a la contracción en esta Guía de Diseño incluyen lo siguiente:

- Esfuerzo de contracción última, unidades de microesfuerzos.
- Tiempo requerido para desarrollar el 50 por ciento del esfuerzo de contracción última, días.
- Cantidad anticipada de contracción reversible, porcentaje.
- Humedad relativa promedio mensual para el sitio del proyecto (proporcionado por el modelo EICM).

#### Esfuerzo de contracción última.

El esfuerzo de contracción última es el esfuerzo de contracción que el concreto hidráulico desarrollará en prolongadas exposiciones para condiciones de sequía, el cual por definición es al 40% de la humedad relativa. Debido a que la humedad relativa del ambiente es un factor significativo que afecta a la contracción del concreto, las condiciones de humedad deben ser especificadas para la contracción última. Para la guía de diseño, el 40% de la humedad relativa es especificada como la condición estándar.

<sup>43</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.55.

*Estimación del esfuerzo de contracción última en el nivel 1 de la entrada de datos.*

Idealmente, en nivel de datos de entrada, el valor de la contracción última de una mezcla de concreto en particular debería ser establecido en laboratorio. Sin embargo, esta no es una aproximación práctica debido a que podría tomar varios años para realizar el esfuerzo de contracción última (para lograr un valor que es establecido por el tiempo).

Los estudios en el campo han mostrado que podría tomarse de al menos 5 años para alcanzar el valor máximo de la contracción por secado. Además, no hay un método establecido actual disponible para proyectar ó extrapolar a corto plazo la medición de la contracción para los valores de la contracción última por secado.

De esta manera, las pruebas de laboratorio actuales no proporcionan un promedio factible para establecer el nivel 1 de la entrada de datos.

El software de la Guía de Diseño permite la entrada directa de datos para la contracción última por secado, así cuando el proceso está disponible, el usuario podría entrar el valor.

Sin embargo, algunas agencias en Estados Unidos promueven el uso del protocolo AASHTO T 160, para medir a corto plazo el esfuerzo de contracción al 40 por ciento de humedad relativa en el laboratorio (a 180 días ó más), para desarrollar confianza en el esfuerzo de contracción última estimado, usando aproximaciones de los niveles 2 y 3.

*Estimación del esfuerzo de contracción última en el nivel 2 de la entrada de datos.*

En el nivel 2 de la entrada de datos, la contracción última puede ser estimada de una correlación estándar basada en los parámetros de mezcla del

concreto hidráulico (tipo de cemento, contenido de cemento y la relación agua cemento), la resistencia a la compresión a los 28 días y de las condiciones de curado. La correlación para estimar la contracción última es dada en la ecuación 2.27:

$$e_{su} = C_1 \cdot C_2 \cdot \left[ 26w^{2.1} (f'c)^{-0.28} + 270 \right] \quad (2.27)$$

Donde:

$\varepsilon_{su}$ : Esfuerzo de contracción última,  $\times 10^{-6}$ .

$C_1$ : Factor para el tipo de cemento:

1.00 para cemento tipo I.

0.85 para cemento tipo II.

1.1 para cemento tipo III.

$C_2$ : Factor para el tipo de curado:

0.75 para curado a vapor.

1.00 para curado con agua ó 100% de la humedad relativa.

1.20 si es sellado durante el curado (curado compuesto).

$w$ : Contenido de agua, lb/ft<sup>3</sup> para la mezcla de concreto hidráulico en consideración.

$f'c$ : Resistencia a la compresión a los 28 días, en psi (determinado de AASHTO T 22).

El software de la Guía de Diseño calcula la contracción última de la ecuación 2.27 cuando en la ventana de los materiales dentro del programa, no es chequeado en la caja de diálogo del cálculo.

*Estimación del esfuerzo de contracción última en el nivel 3 de la entrada de datos.*

En las entradas de datos del nivel 3, se puede utilizar la ecuación 2.25 con la única diferencia que pueden ser usados valores de datos históricos para

$w$  y  $f'c$  de instituciones o agencias encargadas, en vez de utilizar los valores específicos de mezclas que son requeridos en el nivel 2.

*Tiempo requerido para desarrollar el 50 por ciento de la contracción última.*

Para todos los niveles de entrada de datos, a menos que la información disponible sea confiable, el valor recomendado por el Comité del ACI es de 35 días, se recomienda para ser usado para el tiempo requerido de desarrollo del 50 por ciento de la contracción última.

Nótese que si la pruebas AASHTO T 160 es usada para estimar la contracción en el laboratorio, el tiempo requerido para desarrollar el 50 por ciento de la contracción última se refiere al número de días para alcanzar la mitad de la contracción última después de que el espécimen ha sido removido de una condición completamente empapada.

*Cantidad anticipada de contracción reversible.*

Para todos los niveles de entrada de datos, a menos que la información disponible sea confiable, es recomendado el valor del 50 por ciento.

***Conductividad térmica, capacidad calorífica y absorberencia de la superficie del concreto hidráulico.***

Los valores recomendados para la conductividad térmica, capacidad calorífica y la absorberencia de la superficie en los diferentes niveles jerárquicos de entrada de datos, son mostrados en la tabla 2.18.

El resumen mostrado en la tabla 2.18, puede ser usado para diseño de pavimentos nuevos, reconstruidos y rehabilitación.

**Tabla 2.18. Estimación de la conductividad térmica, capacidad calorífica y absorbencia de la superficie del concreto hidráulico en los diferentes niveles jerárquicos de entrada de datos.<sup>44</sup>**

<b>Nivel de entrada de datos</b>	<b>Propiedades requeridas</b>	<b>Opciones para la estimación de la entrada de datos</b>
1	Conductividad térmica	Estimar usando prueba de laboratorio de acuerdo con ASTM E 1952.
	Capacidad de calor	Estimar usando prueba de laboratorio de acuerdo con ASTM D 2766.
	Absorbencia de la superficie de onda corta	Es recomendado una estimación de laboratorio.
2	Conductividad térmica	Lo mismo que en el nivel 1.
	Capacidad de calor	
	Absorbencia de la superficie de onda corta	
3	Conductividad térmica	Rango de valores razonables desde 1.0 a 1.5 BTU/pie-h-°F. Puede ser usado para el diseño el valor típico de 1.25 BTU/pie-h-°F.
	Capacidad de calor	Rango de valores razonables desde 0.2 a 0.28 BTU/lb-°F. Puede ser usado para el diseño el valor típico de 0.28 BTU/lb-°F.
	Absorbencia de la superficie de onda corta	Sin embargo, los valores de las propiedades por defecto están disponibles para conveniencia del usuario:  Pavimento de concreto hidráulico: 0.70-0.90.  Puede ser usado el valor típico de 0.85 para pavimentos de concreto hidráulico.

<sup>44</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.58.

### 2.3.3.9 CARACTERIZACIÓN DE LA ENTRADA DE DATOS PARA EL GRUPO DE MATERIALES ESTABILIZADOS QUÍMICAMENTE.

El grupo de materiales estabilizados químicamente, consiste de concreto de baja resistencia, cemento estabilizado, cemento estabilizado de graduación abierta, suelo cemento, limo-cemento-ceniza y materiales tratados con limo. Para todos estos materiales, las entradas de datos requeridas para el proceso de diseño son:

- Propiedades de resistencia y módulo.
  - Inicial módulo elástico ( $E$ ) a 28 días o módulo resiliente ( $M_r$ ) (el tipo de módulo es una función del tipo de material bajo consideración).
  - Módulo elástico mínimo ó módulo resiliente después del daño proveniente del tráfico (requerido para el diseño de pavimentos flexibles solamente).
  - Inicial resistencia a la flexión a 28 días (requerido para el diseño de pavimentos flexibles solamente).
  - Relación de Poisson.
- Propiedades térmicas.
  - Conductividad térmica.
  - Capacidad calorífica.

#### Módulo elástico o módulo resiliente para el diseño.

Los módulos requeridos (módulo elástico [ $E$ ] para el concreto de baja resistencia, cemento estabilizado, materiales estabilizados con cemento de granulometría abierta, suelo cemento, limo-cemento-ceniza y el módulo de resiliencia [ $M_r$ ] para suelos estabilizados) para el diseño es a 28 días. El estado de esfuerzo (esfuerzo desviador y presión de confinamiento) al cual el  $M_r$  debería ser estimado, puede ser determinado del análisis estructural de la prueba de diseño (después se considera apropiadamente para la presión de la sobrecarga). Mientras no es notorio que los materiales podrían continuar



acumulando resistencia con el tiempo ó podrían degradarse posiblemente a través del tiempo, el valor a 28 días, son consideradamente usados en el diseño.

*Nivel 1. Pruebas de laboratorio.*

Para la entrada de datos del nivel 1,  $E$  y  $M_r$  de los materiales estabilizados químicamente, son determinados de acuerdo al resumen de la Tabla 2.19. Nótese que la prueba de  $M_r$  debería ser guiado por el contenido de materiales estabilizados químicamente, el contenido de estabilizador destinado, moldeado y condicionado a la humedad óptima y densidad máxima. El curado debe ser especificado también por la prueba protocolo y debe reflejar las condiciones del campo.

**Tabla 2.19. Métodos de prueba para determinar  $E$  y  $M_r$  (nivel 1).<sup>45</sup>**

<b>Material estabilizado químicamente</b>	<b>Proceso de prueba recomendado</b>
Concreto de baja resistencia (E).	ASTM C 469, "Módulo estático de elasticidad y relación de Poisson del concreto en compresión". El módulo de elasticidad es una entrada de datos requerida para estos materiales. Sin embargo, la prueba del módulo en el nivel 1 no es posible debido a la carencia de protocolos de pruebas estándar.
Agregado tratado con cemento (E).	
Cemento estabilizado de granulometría abierta (E).	
Limo-cemento-ceniza (E).	
Suelo cemento (E).	
Suelo estabilizado con limo ( $M_r$ ).	El diseño de mezcla y la prueba de protocolo (MDTP) en conjunción con el protocolo de prueba AASHTO T 307.

Nótese que las pruebas de laboratorio pueden ser desarrolladas en mezclas estabilizadas moldeadas en el laboratorio ó muestras de campo obtenidas a través de pruebas destructivas.

*Nivel 2. Correlaciones con otras propiedades de materiales.*

En la entrada de datos del nivel 2,  $E$  ó  $M_r$  de los materiales estabilizados químicamente, puede ser estimado usando los modelos presentados en la Tabla 2.20.

<sup>45</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.60.

**Tabla 2.20. Modelos/relación usados para determinar el nivel 2 de  $E$  ó  $M_r$ .<sup>46</sup>**

<b>Material estabilizado químicamente</b>	<b>Relación recomendada</b>
Concreto de baja resistencia.	$E = 57000\sqrt{f'_c}$
Agregado tratado con cemento	Donde $E$ es el módulo de elasticidad, psi. $f'_c$ : Es la resistencia a la compresión en psi, de acuerdo a la prueba AASHTO T 22.
Estabilizado con cemento de graduación abierta.	No hay correlaciones disponibles.
Suelo cemento.	$E = 1200 \times q_u$ . Donde, $E$ es el módulo elástico, psi. $q_u$ : resistencia a la compresión sin confinar, psi, probado de acuerdo a ASTM D 1633, "Método de prueba estándar para el esfuerzo a la compresión de suelo cemento moldeado en cilindros".
Limo-cemento-ceniza.	$E = 1200 \times q_u$ . Donde, $E$ es el módulo elástico, psi. $q_u$ : resistencia a la compresión sin confinar, psi, probado de acuerdo a ASTM C 593, "Especificación estándar para ceniza y otros materiales puzonálicos para utilizar con limo".
Suelos estabilizados con limo.	$M_r = 0.124q_u + 9.98$ . Donde: $M_r$ : módulo resiliente, ksi. $q_u$ : resistencia a la compresión sin confinar, psi, probado de acuerdo a ASTM D, "Método de prueba estándar para resistencia a la compresión sin confinar de mezclas de suelo con limo compactado".

*Nivel 3. Valores típicos.*

En la entrada de datos del nivel 2,  $E$  ó  $M_r$ , es estimado de experiencias ó de datos históricos. Un resumen de valores típicos de  $M_r$  para materiales estabilizados químicamente es presentado en la Tabla 2.21.

**Tabla 2.21. Resumen de valores típicos del módulo resiliente para materiales estabilizados químicamente.<sup>47</sup>**

<b>Material estabilizado químicamente.</b>	<b>Rango de valores de <math>E</math> ó <math>M_r</math>, psi.</b>	<b>Valores típicos de <math>E</math> ó <math>M_r</math>, psi.</b>
Concreto de baja resistencia.	1,500,000 a 2,500,000	2,000,000
Agregado tratado con cemento	700,000 a 1,500,000	1,000,000
Estabilizado con cemento de graduación abierta.	-	750,000
Suelo cemento.	50,000 a 1,000,000	500,000
Limo-cemento-ceniza.	500,000 a 2,000,000	1,500,000
Suelos estabilizados con limo.	30,000 a 60,000	45,000

<sup>46</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.61.

<sup>47</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.61.

Módulo elástico mínimo para el diseño (requerido para pavimentos de HMA solamente).

Las repetidas aplicaciones de cargas de tráfico en pavimentos de HMA, pueden dar como resultado en el deterioro de los materiales semirígidos estabilizados químicamente. El grado de deterioro ó daño es altamente correlacionado a la magnitud de las cargas de tráfico aplicadas y a la frecuencia de las mismas. La Tabla 2.22 presenta los valores típicos de módulos resilientes para el deterioro de materiales estabilizados químicamente (después de que el material haya sido sujeto a ciclos de cargado de tráfico). Los valores presentados del módulo resiliente, pueden ser modificados para reflejar las condiciones locales. Esto es aplicable para el diseño de pavimentos nuevos, reconstruidos y para rehabilitados.

**Tabla 2.22. Resumen de valores típicos de módulo resiliente deteriorado para materiales estabilizados químicamente.<sup>48</sup>**

<b>Material estabilizado químicamente.</b>	<b>Valor típico de <math>M_r</math> deteriorado, psi.</b>
Concreto de baja resistencia.	300,000
Agregado estabilizado con cemento.	100,000
Estabilizado con cemento de graduación abierta.	50,000
Suelo cemento.	25,000
Limo-cemento-ceniza.	40,000
Suelos estabilizados con limos.	15,000

Resistencia a la flexión para el diseño (requerido para pavimentos de HMA solamente).

La vida de la fatiga de los materiales estabilizados químicamente, es vinculada al esfuerzo de flexión crítica inducido en la capa estabilizada. La entrada de datos requerida de  $MR$  para propósitos de diseño, es el valor a los 28 días. Esto es aplicable para el diseño de pavimentos nuevos, reconstruidos y para rehabilitación.

<sup>48</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.62.

*Nivel 1. Pruebas de laboratorio.*

En la entrada de datos del nivel 1, la resistencia a la flexión ( $MR$ ), debería ser estimado de pruebas de laboratorio de especímenes de vigas de materiales estabilizados químicamente. La Tabla 2.23, presenta algunas pruebas recomendadas para determinar la resistencia a la flexión de varios materiales estabilizados.

**Tabla 2.23. Métodos de prueba para determinar la resistencia a la flexión.<sup>49</sup>**

<b>Material estabilizado químicamente</b>	<b>Proceso de prueba recomendado</b>
Concreto de baja resistencia (E).	AASHTO T 97
Agregado tratado con cemento (E).	
Cemento estabilizado de granulometría abierta (E).	No disponible
Limo-cemento-ceniza (E).	AASHTO T 97
Suelo cemento (E).	ASTM D 1635
Suelo estabilizado con limo ( $M_r$ ).	No hay disponible pruebas AASHTO ó ASTM. Además, para el nivel 1 no es recomendado la prueba.

*Nivel 2. Correlaciones con otras propiedades de materiales.*

En la entrada de datos del nivel 2,  $MR$  puede ser estimada de la prueba de resistencia a la compresión sin confinar ( $q_u$ ) de las muestras curadas de materiales estabilizados químicamente. Los protocolos de prueba recomendados y la relación entre  $q_u$  y  $MR$  para materiales estabilizados químicamente son resumidos en la Tabla 2.24.

**Tabla 2.24. Relación entre  $q_u$  y  $MR$  de materiales estabilizados químicamente.<sup>50</sup>**

<b>Material estabilizado químicamente.</b>	<b>Protocolo de prueba.</b>	<b>Valor típico de <math>MR</math>, psi.</b>
Concreto de baja resistencia.	AASHTO T 22	$MR$ puede ser estimada en una forma conservadora como el 20 por ciento de $q_u$ .
Agregado tratado con cemento		
Estabilizado con cemento de graduación abierta.	No hay disponible.	-
Suelo cemento.	ASTM D 1633.	$MR$ puede ser estimada en una forma conservadora como el 20 por ciento de $q_u$
Limo-cemento-ceniza.	ASTM C 593.	
Suelos estabilizados con limo.	ASTM D 5102.	

<sup>49</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.62.

<sup>50</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.63.

*Nivel 3. Valores típicos.*

En la entrada de datos del nivel 3, *MR* puede ser estimada de experiencias ó de datos históricos basados en la descripción de materiales. Los valores típicos son presentados en la Tabla 2.25.

**Tabla 2.25. Valores típicos de *MR* para materiales estabilizados químicamente.<sup>51</sup>**

<b>Material estabilizado químicamente.</b>	<b>Valor típico de <i>MR</i>, psi</b>
Concreto de baja resistencia.	450
Agregado estabilizado con cemento.	200
Estabilizado con cemento de graduación abierta.	200
Suelo cemento.	100
Limo-cemento-ceniza.	150
Suelos estabilizados con limos.	25

*Relación de Poisson para el diseño.*

Este es otra entrada de datos importante requerida para el análisis estructural. Aunque este parámetro puede ser determinado de pruebas de laboratorio, el costo y el tiempo requerido no es justificado. Los valores típicos pueden ser usados para el diseño de pavimentos con sobrecapas nuevos, reconstruidos, rehabilitados. El rango de valores recomendados es resumido en la Tabla 2.26.

**Tabla 2.26. Rango de valores para la relación de Poisson de materiales estabilizados químicamente.<sup>52</sup>**

<b>Material</b>	<b>Relación de Poisson</b>
Agregado estabilizado con cemento (incluyendo el concreto de baja resistencia).	0.1 a 0.2
Suelo cemento.	0.15 a 0.35
Limo-cemento-ceniza.	0.1 a 0.15
Suelos estabilizados con limos.	0.15 a 0.2

<sup>51</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.63.

<sup>52</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.63.

Conductividad térmica y capacidad calorífica para el diseño.

La conductividad térmica,  $K$ , y la capacidad calorífica,  $Q$ , son las propiedades de los materiales que controlan el flujo de calor a través del sistema de pavimento, de tal modo que influye en los regímenes de temperatura y humedad en el sistema. La conductividad térmica y la capacidad de calor son la clave para la EICM y son utilizados para estimar los perfiles de la temperatura y la humedad en la estructura de pavimento y subrasante a través de la vida de diseño del pavimento. La Tabla 2.27, resume las aproximaciones recomendadas para caracterizar  $K$  y  $Q$  en los diferentes niveles jerárquicos de entrada de datos para materiales estabilizados químicamente. Esto es aplicable para el diseño de pavimentos nuevos, reconstruidos y rehabilitados.

**Tabla 2.27. Aproximaciones recomendadas para la estimación de la conductividad térmica y capacidad de calor de materiales estabilizados químicamente en el cálculo del EICM.<sup>53</sup>**

Propiedades de los materiales	Nivel de entrada de datos	Descripción
Conductividad térmica, $K$ .	1	Es recomendable una medición directa en este nivel (ASTM E 1952: "Prueba del método estándar para conductividad térmica y difusión térmica por exploración calorimétrica diferenciada de la temperatura modulada").
	2	No es aplicable.
	3	Utilizar valores de diseño selectos basado en datos históricos de Instituciones o de valores típicos mostrados a continuación: <ul style="list-style-type: none"> <li>Rango de valores típicos para capas estabilizadas con limo que va desde 1.0 a 1.5 BTU/(pie-h-°F). Puede ser usado para el diseño el valor típico de 1.25 BTU/pie-h-°F.</li> </ul>
Capacidad calorífica, $Q$ .	1	Es recomendable una medición directa en este nivel (ASTM D 2766: "Calor específico de líquidos y sólidos").
	2	No es aplicable.
	3	Utilizar valores de diseño selectos basado en datos históricos de Instituciones o de valores típicos mostrados a continuación: <ul style="list-style-type: none"> <li>Rango de valores razonables que va desde 0.2 a 0.4 BTU/(lb-°F). Puede ser usado para el diseño el valor típico de 0.28 BTU/lb-°F.</li> </ul>

<sup>53</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.64.

### **2.3.3.10 CARACTERIZACIÓN DE LA ENTRADA DE DATOS PARA EL GRUPO DE MATERIALES GRANULARES NO LIGADOS Y EL GRUPO DE MATERIALES DE SUBRASANTE.**

Los materiales granulares no ligados y de subrasante son descritos en esta Guía de Diseño usando las definiciones estándar de AASHTO y la Clasificación Unificada del Suelo (USC). El sistema de clasificación del suelo AASHTO, se basa en la distribución del tamaño de la partícula y de los límites de Atterberg. Este sistema de clasificación es descrito en la prueba estándar AASHTO M 145, “Clasificación del suelo y mezcla de suelo de agregados para propósitos de construcción de carreteras”. La clasificación del suelo AASHTO está basado en la porción de materiales granulares no ligados y de la subrasante que es más pequeño de 3 pulg. de diámetro.

El sistema de clasificación AASHTO identifica dos tipos de materiales:

- Materiales granulares (material que tiene el 35 por ciento ó menos en peso, partículas más pequeñas de 0.0029 pulg. de diámetro).
- Materiales limo-arcilloso (materiales que tienen más del 35 por ciento en peso, partículas más pequeñas de 0.0029 pulg. de diámetro).

Estas dos divisiones son además subdivididas en 7 grupos principales de clasificación (de A-1 hasta A-7). Las clasificaciones de grupos y subgrupos están basadas en las estimaciones ó medidas de la distribución del tamaño del grano y de los valores del límite líquido e índice de plasticidad.

El sistema USC es descrito en la prueba estándar ASTM D 2487, “Método estándar para la clasificación de los suelos para propósitos ingenieriles”. El sistema USC identifica tres divisiones principales del suelo:

- Suelos de agregado grueso (material que tiene menos del 50 por ciento en peso, partículas más pequeñas de 0.0029 pulg. de diámetro).
- Suelos de grano fino (material que tiene el 50 por ciento ó más en peso, partículas más pequeñas de 0.0029 pulg. de diámetro).
- Suelos altamente orgánicos (materiales que demuestren ciertas características de orgánicos).

Los parámetros requeridos de materiales granulares no ligados, subrasante y lecho de roca pueden ser clasificados en uno de estos tres grupos principales:

- Entrada de datos del material para el modelo de respuesta del pavimento.
- Entrada de datos del material en el EICM.
- Otras propiedades de los materiales.

Las entrada de datos del material para el modelo de respuesta del pavimento requeridos son el módulo resiliente,  $M_r$ , la relación de Poisson,  $\mu$  (módulo elástico para el lecho de rocas) parámetro usado para cuantificar el esfuerzo que es dependiente de la rigidez de los materiales granulares no ligados, materiales de subrasante y materiales del lecho de rocas bajo cargas móviles. Todos ellos son usados para caracterizar el comportamiento de la capa cuando están sujetadas a esfuerzos.

Los parámetros de materiales asociados con el EICM son todos esos parámetros que son requeridos y utilizados por los modelos de EICM para predecir las condiciones de temperatura y de humedad dentro del sistema de pavimento. Las entradas de datos claves incluyen la gradación, los límites de Atterberg, y conductividad hidráulica.



La categoría de otras propiedades de los materiales, lo constituyen a los materiales asociados a propiedades especiales requeridas para la solución del diseño. Un ejemplo de esta categoría es el coeficiente de presión lateral.

### ***ENTRADA DE DATOS DEL MATERIAL PARA EL MODELO DE RESPUESTA DEL PAVIMENTO.***

La entrada de datos de los materiales requeridos son el módulo de resiliencia y la relación de Poisson.

#### *Módulo resiliente.*

El módulo resiliente es requerido para el cálculo del modelo de respuesta estructural. Tiene un efecto significativo en el cálculo de la respuesta del pavimento y el módulo dinámico de reacción de la subrasante (valor  $k$ ), calculado internamente por el software de la Guía de Diseño. El módulo resiliente puede ser medido directamente de laboratorio u obtenido a través del uso de correlaciones de otras propiedades de resistencia de materiales tales como el CBR. Los diferentes niveles de entrada de datos para el módulo resiliente son presentados a continuación y puede ser utilizado para el diseño de pavimentos nuevos, reconstrucción y rehabilitación.

#### *Nivel 1. Pruebas de laboratorio.*

Los valores del módulo resiliente para materiales granulares no ligados, subrasante y lecho de rocas en el nivel 1, son determinados de pruebas triaxiales cíclicas preparadas en muestras representativas. Los recomendados métodos de pruebas estándar para los módulos de prueba son:

- NCHRP 1-28A, “Método de prueba armonizado para la determinación del módulo resiliente en el diseño de pavimento flexible.”
- AASHTO T 307, “Determinación del módulo resiliente del suelo y de materiales para agregados.”

Para el diseño Mecanicista- empírico, el módulo resiliente es estimado usando un generalizado modelo establecido. El coeficiente elástico no lineal y los exponentes que constituyen el modelo, es determinado usando el análisis de regresiones lineales y no lineales para ajustar el modelo de prueba en laboratorio generado por los datos de la prueba de  $M_r$ . El modelo generalizado (NCHRP 1-28A) utilizado en el proceso de diseño, es el siguiente:

$$M_r = k_1 P_a \left( \frac{q}{P_a} \right)^{k_2} \left( \frac{t_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (2.28)$$

Donde:

$M_r$ : Módulo resiliente, psi.

$\theta$ : Esfuerzo de volumen (bulk) =  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ .

$\sigma_1$ : Esfuerzo principal mayor.

$\sigma_2$ : Esfuerzo principal intermedio =  $\sigma_3$  para la prueba  $M_r$  con un espécimen cilíndrico.

$\sigma_3$ : Esfuerzo principal menor/presión de confinamiento.

$t_{oct}$ : Esfuerzo cortante octaédrico.

$$t_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(s_1 - s_2)^2 + (s_1 - s_3)^2 + (s_2 - s_3)^2}$$

$P_a$ : Esfuerzo normal (presión atmosférica).

$K_1, k_2, k_3$ : Constantes de regresión (obtenidos para ajustar los datos de la prueba de módulo de resiliencia en la ecuación).

### *Nivel 2. Correlaciones con otras propiedades de materiales.*

Las correlaciones generales que describen la relación entre el índice del suelo y las propiedades de resistencia, pueden ser utilizadas en la estimación de  $M_r$ . La relación puede ser de forma directa ó indirecta. Para la relación indirecta, primero, las propiedades de los materiales es relacionada al CBR y luego el CBR es relacionado a  $M_r$ . Los modelos usados en la Guía de Diseño para la estimación de  $M_r$  son presentados en la Tabla 2.28. Para el nivel 2 en el

software de la Guía de Diseño, permita al usuario seguir las siguientes dos opciones:

- El valor de la entrada de datos representativa de  $M_r$  y la utilización de EICM para ajustarlo por los efectos climáticos estacionales.
- Entrada de datos de  $M_r$  para cada mes (estación) del año (un total de 12 meses).

**Tabla 2.28. Modelos relacionados al índice de materiales y propiedades de resistencia para  $M_r$ .**<sup>54</sup>

Propiedad resistencia/índice	Modelo	Comentarios	Prueba estándar
CBR.	$M_r = 2555(CBR)^{0.64} (TRL)$ $M_r$ en psi.	CBR= Relación de soporte de California, porcentaje.	AASHTO T 193, "Relación de soporte de California".
Valor R.	$M_r = 1155 + 555R$ $M_r$ en psi.	R= Valor R.	AASHTO T 190, "Resistencia del valor R y presión de expansión de suelos compactados".
Coefficiente de capa de AASHTO.	$M_r = 30000 \left( \frac{a_i}{0.14} \right)$ $M_r$ en psi	$a_i$ : Coeficiente de capa de AASHTO.	Guía para el diseño de estructuras de pavimentos AASHTO.
PI y gradación*.	$CBR = \frac{75}{1 + 0.728(wPI)}$	wPI=P <sub>200</sub> xPI. P <sub>200</sub> = Porcentaje que pasa la malla No. 200. PI= Índice de plasticidad, porcentaje.	AASHTO T 27, "Análisis de mallas para agregado grueso y fino". AASHTO T 90, "Determinación del límite plástico y el índice plástico del suelo".
DCP*.	$CBR = \frac{292}{DCP^{1.12}}$	CBR= Relación de soporte de California, porcentaje. DCP= Índice DCP, mm/soplos	ASTM D 6951, "Método de prueba estándar para el uso del penetrómetro de cono dinámico en aplicaciones de pavimento poco profundas".

\*Estimado del CBR para ser utilizado en la estimación de  $M_r$ .

<sup>54</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.67.

*Nivel 3. Valores típicos (basado en calibración).*

Para la entrada de datos del nivel 3, los valores típicos de  $M_r$  presentados en la Tabla 2.29 son recomendados. Nótese que para el nivel 3, solamente un valor típico de  $M_r$  representativo es requerido con un contenido de humedad óptimo. El EICM es usado para modificar el  $M_r$  representativo para los efectos estacionales del clima. Los usuarios tienen la opción de especificar que el valor de  $M_r$  representativo sea usado sin ser modificado por el clima en el EICM.

**Tabla 2.29. Valores típicos del módulo resiliente para materiales granulares no ligados y subrasante (contenido de humedad óptima).<sup>55</sup>**

<b>Clasificación del material</b>	<b>Rango de valores de <math>M_r</math>, psi.</b>	<b>Valor Típico de <math>M_r</math>, psi.</b>
A-1-a	38,500-42,000	40,000
A-1-b	35,500-40,000	38,000
A-2-4	28,000-37,500	32,000
A-2-5	24,000-33,000	28,000
A-2-6	21,500-31,000	26,000
A-2-7	21,500-28,000	24,000
A-3	24,500-35,500	29,000
A-4	21,500-29,000	24,000
A-5	17,000-25,500	20,000
A-6	13,500-24,000	17,000
A-7-5	8,000-17,500	12,000
A-7-6	5,000-13,500	8,000
CH	5,000-13,500	8,000
MH	8,000-17,500	11,500
CL	13,500-24,000	17,000
ML	17,000-25,500	20,000
SW	28,000-37,500	32,000
SP	24,000-33,000	28,000
SW-SC	21,500-31,000	25,500
SW-SM	24,000-33,000	28,000
SP-SC	21,500-31,000	25,500
SP-SM	24,000-33,000	28,000
SC	21,500-28,000	24,000
SM	28,000-37,500	32,000
GW	39,500-42,000	41,000
GP	35,500-40,000	38,000
GW-GC	28,000-40,000	34,500
GW-GM	35,500-40,500	38,500
GP-GC	28,000-39,000	34,000
GP-GM	31,000-40,000	36,000
GC	24,000-37,500	31,000
GM	33,000-42,000	38,500

<sup>55</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.69.

Se aconseja tener mucha precaución al utilizar los valores de  $M_r$  representados en la Tabla 2.29 ya que ellos son valores muy aproximados. La razón de la precaución es si por ejemplo una subrasante A-1-a es realmente infinita (espesores de más de 20 pies ó más), entonces usar el valor de  $M_r$  de 40000 psi, puede ser justificado para una profundidad infinita.

Sin embargo, si la subrasante A-1-a tiene unos cuantos pies de espesor (menor de 5 pies) y así actúa como un terraplén a través de material de subrasante más débil, entonces, el  $M_r$  compuesto de los dos materiales sería menor de 40000 psi. Los diseñadores deberían seleccionar el valor de  $M_r$  que represente la fundación completa del pavimento. Esto requiere un extenso conocimiento de las subcapas en la cual el pavimento será construido.

#### Relación de Poisson.

La entrada de datos de la relación de Poisson es requerido para el cálculo del modelo de respuesta estructural, aunque sus efectos en el cálculo de la respuesta del pavimento no es muy significativo. Como resultado, este parámetro es rara vez medido y es a menudo un valor asumido.

#### *Nivel 1. Pruebas de laboratorio.*

Las mediciones directas de la relación de Poisson no es justificada normalmente debido que tiene una sensibilidad baja en la respuesta estructural. La relación de Poisson de bases granulares no ligadas, puede ser determinada de pruebas triaxiales cíclicas en muestras preparadas, utilizando datos de pruebas obtenidos de procesos rutinarios del módulo resiliente. Este proceso es aplicable para el diseño de pavimentos nuevos, reconstruidos o rehabilitados.

#### *Nivel 2. Correlaciones con otras propiedades de materiales.*

Hay modelos y correlaciones apropiados que pueden ser usados para estimar la relación de Poisson. Sin embargo, no son recomendados en este

proceso de diseño. Los diseñadores pueden, sin embargo, adoptar modelos y correlaciones basados en conocimientos y experiencias locales. Este proceso es aplicable para el diseño de pavimentos nuevos, reconstruidos o rehabilitados.

*Nivel 3. Valores típicos.*

Para la entrada de datos en el nivel 3, pueden ser utilizados los valores típicos mostrados en la Tabla 2.30. El rango de valores para la relación de Poisson de materiales granulares no ligados y subrasante están entre 0.2 y 0.45. Este proceso es aplicable para el diseño de pavimentos nuevos, reconstruidos o rehabilitados.

**Tabla 2.30. Valores típicos para la relación de Poisson de materiales granulares no ligados y subrasante.<sup>56</sup>**

<b>Descripción del material</b>	<b><math>\mu</math>Rango</b>	<b><math>\mu</math>Típico</b>
Arcilla (saturada).	0.4-0.5	0.45
Arcilla (sin saturar).	0.1-0.3	0.2
Arena arcillosa	0.2-0.3	0.25
Limo.	0.3-0.35	0.325
Arena densa.	0.2-0.4	0.3
Arena de grano grueso.	0.15	0.15
Arena de grano fino.	0.25	0.25
Lecho de rocas.	0.1-0.4	0.25

***Entrada de datos de material no ligado en el EICM.***

Las propiedades de materiales requeridos para la entrada de datos en el EICM incluyen límites de Atterberg, gradación y conductividad hidráulica saturada. Se requieren sobre todo para los materiales granulares no ligados de la base y de la subrasante.

*Índice plástico.*

El índice plástico (*PI*) de un suelo, es la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico del suelo e indica la magnitud del rango del

<sup>56</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.71.

contenido de humedad a través del cual el suelo se encuentra en una condición plástica.

El límite plástico (*PL*), es el contenido de humedad expresado en porcentaje de la masa de suelo secado en el horno, en el límite entre el estado plástico y semisólido. Mientras que límite líquido (*LL*) es definido como el contenido de agua del suelo en el límite arbitrariamente determinado entre el estado líquido y plástico, expresado en porcentaje de la masa de suelo secado en el horno. El índice plástico es definido así:

$$PI = LL - PL \quad (2.29)$$

Las pruebas estándar AASHTO utilizadas para determinar *PI*, *LL* y *PL* son AASHTO T 90, “Determinación del límite plástico y el índice plástico del suelo”, y AASHTO T 89, “Determinación del límite líquido del suelo”. Nótese que no hay distinción de niveles jerárquicos en la entrada de datos para este parámetro, solamente son recomendados los valores de pruebas (nivel 1).

#### Análisis de mallas.

El análisis de mallas es realizado para determinar el tamaño de la distribución de la partícula de los materiales granulares no ligados y subrasante. El tamaño de la distribución de la partícula puede ser chequeado a través de especificaciones requeridas para determinar tolerancias, y puede ser graficado para determinar la naturaleza de la distribución del tamaño del grano.

La información requerida del análisis del tamaño de la partícula son el porcentaje de material que pasa la malla N° 4 ( $P_4$ ), el porcentaje que pasa la malla N° 200 ( $P_{200}$ ) y el diámetro en mm al cual el 60 por ciento de material de suelo pasa la malla,  $D_{60}$ . Las pruebas estándar AASHTO utilizadas para el análisis del tamaño de la partícula es AASHTO T 27. Nótese que no hay

distinción de niveles jerárquicos en la entrada de datos para este parámetro, solamente son recomendados los valores de pruebas.

*Peso unitario máximo seco y contenido de humedad óptimo (gravimétrico ó por peso).*

El software de la Guía de Diseño permite una entrada de datos para el peso unitario máximo seco (MDD) y el contenido de humedad óptimo (OMC) (niveles 1 y 3) para materiales granulares no ligados y subrasante. El MDD y el OMC pueden ser calculados internamente por el software (nivel 2) utilizando la información del *PI* y la graduación. Para el nivel 1, MDD y OMC son estimados para una muestra de prueba representativa de materiales granulares no ligados ó subrasante a través de pruebas de laboratorio. La prueba estándar relevante es AASHTO T 99, “Relaciones de densidad-humedad de suelos utilizando un pisón de 5.5 lb y un gotero de 12 pulg. Para el nivel 2, MDD y OMC son estimados utilizando correlaciones ó modelos. Para el nivel 3, los valores típicos de MDD y OMC son asumidos de acuerdo a experiencias locales. El rango típico de MDD va de 100 a 140 lb/pie<sup>3</sup>, mientras que el rango de OMC va desde 4 a 15 por ciento.

*Gravedad específica de los sólidos.*

El software de la Guía de Diseño permite la entrada directa de datos de la gravedad específica de los sólidos ( $G_s$ ) (nivel 1 y 3) de materiales granulares no ligados y subrasante, y también puede ser calculado internamente por el software (nivel 2) utilizando la información del *PI* y de la gradación.

*Conductividad hidráulica saturada.*

El software de la Guía de Diseño permite la entrada directa de datos de la conductividad hidráulica saturada ( $k$ ) (niveles 1 y 3) de materiales granulares no ligados y subrasante, además puede ser calculado internamente por el software (nivel 2) utilizando la información del *PI* y de la gradación.



Grado de saturación, porcentaje.

El grado de saturación ( $S$ ) es la proporción de espacios de vacíos en un material granular no ligado ó subrasante ocupado por agua. El software de la Guía de Diseño calcula el grado de saturación internamente utilizando parámetros del material granular no ligado y la subrasante.

**Otras propiedades de materiales no ligados.**

Coefficiente de presión lateral.

El coeficiente de presión ( $k_o$ ), es el término usado para expresar la relación de la presión lateral y la presión vertical de la tierra. Para materiales granulares no ligados, subrasante y lecho rocoso, el rango de valores típicos in situ de  $k_o$  va de 0.4 a 0.6. El coeficiente de presión lateral puede ser estimado utilizando los siguientes modelos:

*Materiales no cohesivos:*

$$k_o = \frac{m}{1-m} \quad (2.30)$$

*Materiales cohesivos:*

$$k_o = 1 - \text{sen } f \quad (2.31)$$

**Tabla 2.31. Típico ángulo efectivo de fricción interna para materiales granular no ligado, subrasante y lecho de rocas.<sup>57</sup>**

Descripción del material	Ángulo de fricción interna, $\Phi$	Coefficiente de presión lateral, $k_o$ .
Lecho de roca limpio y sano.	32	0.495
Grava limpia, mezcla grava-arena y arena gruesa.	29 a 31	0.548 a 0.575
Arena limpia de fina a mediana, limo de media a arena gruesa, grava limosa ó grava arcillosa.	24 a 29	0.575 a 0.645
Arena fina limpia, arena limosa ó arcillosa fina a arena media.	19 a 24	0.645 a 0.717
Limo arenoso fino, sin arena plástica.	17 a 19	0.717 a 0.746
Residuos de arcilla muy rígida ó dura.	22 a 26	0.617 a 0.673
Arcilla y limo arcillosa rígida y media rígida.	19 a 19	0.717

<sup>57</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.73.

Donde:

$\mu$ : Relación de Poisson.

$\Phi$ : Angulo efectivo de fricción interna.

El rango de valores típicos de  $\mu$  y  $\Phi$ , son presentados en las Tablas 2.30 y 2.31 respectivamente. Este proceso es aplicable para el diseño de pavimentos nuevos, reconstruidos y rehabilitación.

### **2.3.3.11 CARACTERIZACIÓN DE LA ENTRADA DE DATOS PARA EL GRUPO DE MATERIALES DE LECHO DE ROCAS.**

#### ***Módulo de elasticidad de materiales de lecho de rocas.***

En capas de lecho rocoso poco profundas, si es encontrado bajo una alineación, podría tener un impacto significativo en la respuesta mecanicista del pavimento y por lo tanto, la necesidad para ser completamente considerado en el diseño. Esto es especialmente real si el proceso de cálculo del módulo de la capa es adoptado en el diseño de rehabilitación para caracterizar los materiales del pavimento. Mientras que es rara la medición precisa de la rigidez, y aún, garantizada, cualquier capa de lecho de rocas debe ser incorporada en el análisis.

La Tabla 2.32 resume los rangos recomendados de los valores de módulos de materiales de lecho de rocas, para utilizar en el diseño de pavimentos flexibles y rígidos nuevos. Estos valores se aplican en todos los niveles jerárquicos de entrada de datos.

#### ***Relación de Poisson de materiales de lecho rocoso.***

La relación de Poisson es requerida en la entrada de datos para el cálculo de los modelos de respuesta estructural, aunque su efecto en el cálculo de la respuesta del pavimento no es grande. Como resultado, este parámetro es

rara vez medido y es a menudo asumido, particularmente con materiales de lecho rocoso.

**Tabla 2.32. Estimación del módulo elástico de la capa de lecho rocoso.<sup>58</sup>**

<b>Categoría del grupo de material</b>	<b>Tipo de diseño</b>	<b>Nivel de entrada de datos</b>	<b>Descripción</b>
Lecho de rocas	Nuevo	1-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ninguno de estos niveles es considerado aplicable para las condiciones de lecho de rocas.</li> </ul>
		3	<ul style="list-style-type: none"> <li>El usuario selecciona los valores típicos de diseño:</li> </ul> <p><u>Sólido, lecho de roca masivo:</u> Rangos típicos: 750-2000 ksi. Valor por defecto: 1000 ksi.</p> <p><u>Altamente fracturado, desgastado:</u> Rangos típicos: 250-1000 ksi. Valor por defecto: 500 ksi.</p>

La Tabla 2.33 presenta valores típicos de la relación de Poisson para materiales de lecho rocoso en los niveles jerárquicos de entrada de datos 2 y 3. La entrada de datos en el nivel 1, no es aplicable para este grupo de material.

**Tabla 2.33. Relación de Poisson para el lecho de rocas.<sup>59</sup>**

<b>Materiales de lecho de rocas</b>	<b>Nivel 2</b> <b>μRango</b>	<b>Nivel 3</b> <b>μTípico</b>
Sólido, masivo y continuo.	0.10-0.25	0.15
Altamente fracturado, gastado.	0.25-0.40	0.30

<sup>58</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.74.

<sup>59</sup> Parte 2, Capítulo 4: Material Characterization. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.2.74.

## **2.3.4 EFECTOS DEL MEDIO AMBIENTE.**

### **2.3.4.1 IMPORTANCIA DEL CLIMA EN EL DISEÑO MECANICISTA-EMPÍRICO.**

Las condiciones del medio ambiente tienen efectos sobre el comportamiento de los pavimentos rígidos y flexibles. Factores externos tales como la precipitación, temperatura, congelamiento y la profundidad del nivel freático juegan un papel clave para definir las limitaciones que los impactos del medio ambiente pueden tener en el comportamiento del pavimento. Factores internos tales como la susceptibilidad de los materiales de pavimentos para la humedad, drenabilidad en las capas de pavimento, infiltración potencial del pavimento, etc., donde el pavimento reaccionará al ser aplicadas condiciones externas del medio ambiente. En la estructura de pavimento, la humedad y la temperatura son dos de las variables que pueden significativamente afectar la capa de pavimento y las propiedades de la subrasante, y por lo tanto, su capacidad de soportar cargas.

Algunos de los efectos del medio ambiente sobre los materiales de pavimento son mencionados a continuación:

- Exhibición de materiales ligados de asfalto varían los valores de módulo dependiendo de la temperatura. Los valores de módulos pueden variar de 2 a 3 millones psi ó más durante los meses fríos de invierno y cerca de 100,000 psi ó menos durante los meses calientes de verano.
- Propiedades cementantes de materiales tales como esfuerzo y módulo de flexión no son significativamente afectados por cambios normales de temperatura. Sin embargo, los gradientes de temperatura y humedad particularmente en la parte superior de la capa de concreto hidráulico pueden significativamente

afectar las tensiones deflexiones y en consecuencia daños y deterioros en el pavimento.

- Los materiales ligados no son directamente afectados por la presencia de humedad. Sin embargo, la humedad excesiva puede llevar a despojar la mezcla asfáltica o puede tener efectos a largo plazo sobre la integridad estructural de los materiales ligados con cemento.

Todos los deterioros considerados en la Guía son perjudicados por los factores del medio ambiente a un cierto grado. Por lo tanto, las fluctuaciones diarias y estacionales de la humedad y de los perfiles de temperatura en la estructura de pavimento, ofrecen cambios en el agua subterránea, precipitación/infiltración, ciclos de congelamiento y otros factores externos, los cuales son modelados en una manera comprensiva en el proceso de diseño mecanicista-empírico.

#### **2.3.4.2 CONSIDERACIONES DE LOS EFECTOS CLIMÁTICOS EN EL DISEÑO.**

##### **El Mejoramiento del Modelo Climático Integrado.**

Los cambios en los perfiles de temperatura y humedad en la estructura de pavimento y subrasante a través de la vida de diseño del pavimento, son completamente considerados en la Guía de Diseño por medio de un sofisticada herramienta de modelo climático llamado Mejoramiento del Modelo Climático Integrado (EICM). Este es un programa dimensional acoplado del flujo del calor y de la humedad, que simula cambios en el comportamiento y características de los materiales de pavimento y subrasante en conjunción con las condiciones climáticas a través de los años de operación. El EICM consiste en tres principales componentes:

- El Modelo Climático Estructural de Materiales (Modelo CMS) desarrollado en la Universidad de Illinois.
- El Modelo CRREL del Alza de la Helada y Establecimiento del deshielo desarrollado por el Laboratorio de Ingeniería y Regiones Frías de Investigación de la Armada de los Estados Unidos.
- El Modelo de Infiltración y Drenaje (Modelo ID) desarrollado en la Universidad A&M de Texas.

La versión original del EICM se refirió simplemente al Modelo Climático Integrado (ICM) el cual fue desarrollado por el FHWA en la Universidad A&M de Texas, Instituto de Transporte de Texas en 1989. Esta versión acompañó al Modelo ID previamente desarrollados por los Modelos CMS y CRREL.

En resumen, las principales tareas (con respecto a la Guía de Diseño) emprendidas en el desarrollo del EICM son:

- Reemplazar la Curva Característica Suelo-Agua (SWCC) de la ecuación de Gardner con las ecuaciones propuestas por Fredlund y Xing para obtener un mejor ajuste funcional.
- Desarrollo estimado del mejoramiento de SWCCs, conductividad hidráulica saturada ( $k_{sat}$ ) y gravedad específica de sólidos ( $G_s$ ) dados, conociendo las propiedades índices del suelo tales como distribución del tamaño del grano (porcentaje que pasa la malla No. 200,  $P_{200}$ , y tamaño del grano efectivo con el 60 por ciento que pasa en peso,  $D_{60}$ ) e índice de plasticidad ( $PI$ ).
- Incorporación dentro del EICM de una predicción de la conductividad hidráulica sin saturar basada en los SWCC propuestas por Fredlund en 1994.
- Adicionar la base de datos del clima contenidos en datos horarios de estaciones de tiempo para sol, lluvia, velocidad del viento, temperatura del aire y humedad relativa.

La SWCC es definida como la variación de la capacidad de almacenamiento del agua en los macro y micro poros del suelo con respecto a la succión. La relación es generalmente planteada como la variación del contenido de agua (gravimetría, volumetría ó grado de saturación) con la succión del suelo. Varios estudios han sido conducidos para comparar diferentes ecuaciones disponibles para representar la SWCC. Estos estudios han mostrado generalmente que las ecuaciones propuestas por Freundlund y Xing en 1994 mostraron un buen acuerdo con una base de datos extendida.

Otra importante mejora de importancia práctica fue la introducción de algoritmos para estimar la gravedad específica de los sólidos ( $G_s$ ) y de la conductividad hidráulica saturada ( $k_{sat}$ ). Estas estimaciones pueden ser usadas en casos donde  $G_s$  y  $k_{sat}$  no pueden ser estimadas de pruebas de laboratorio ó de campo.

La siguiente modificación principal fue la incorporación de un algoritmo para predecir la conductividad hidráulica no saturada. El ICM versión 2.1 hizo uso de los parámetros de Gardner para la representación de la función de la conductividad hidráulica no saturada, el cual es la relación entre la conductividad hidráulica y la succión del suelo. Como parte de las modificaciones desarrolladas por el ICM 2.1, los parámetros por defecto fueron reemplazados por la ecuación propuesta por Freundlund en 1994.

### **Incorporación del EICM dentro de la Guía de Diseño.**

El software del EICM ha sido hecho como parte integral del proceso de la Guía de Diseño. Está completamente vinculado al software e internamente desarrolla todos los cálculos necesarios. Así, el clima es completamente incorporado dentro de la metodología de la Guía de Diseño el cual proveerá un mejoramiento en la capacidad de diseño del pavimento.

Las tareas listadas a continuación resumen el papel del módulo EICM en todo el proceso de diseño. Para el análisis y diseño de pavimentos flexibles, las tareas incorporadas para explicar los efectos del medio ambiente incluidos, son las siguientes:

- *Tarea 1:* Registrar el módulo resiliente provisto por el usuario,  $M_R$ , de todos los materiales de las capas no ligadas en un principio ó como condición de referencia. Generalmente, esto será igual ó cerca del contenido óptimo de agua y de la densidad seca máxima.
- *Tarea 2:* Evaluar los cambios esperados en el contenido de humedad desde el inicio o de la condición de referencia, así como la subrasante y materiales no ligados alcanzan el equilibrio de la condición de humedad. También evaluar los contenidos de humedad por los cambios estacionales.
- *Tarea 3:* Evaluar los efectos de cambios de contenido de humedad en el suelo con respecto a la condición de referencia en el módulo resiliente introducido por el usuario.
- *Tarea 4:* Evaluar el efecto de congelamiento sobre la capa  $M_R$ . (No aplicable a nuestro país).
- *Tarea 5:* Evaluar el efecto de recuperación y deshielo de la condición de congelamiento de  $M_R$ . (No aplicable a nuestro país).
- *Tarea 6:* Utilización del tiempo. Son los valores variantes del  $M_R$  en el cálculo de parámetros de respuesta crítico del pavimento y daños de varios puntos en el sistema de pavimento.
- *Tarea 7:* Evaluar cambios de temperatura como una función del tiempo para todas las capas ligadas de asfalto.

Las entradas en la tarea 1 es una entrada provista por el usuario. Este valor es determinado usando cualquier proceso de Análisis de Elementos Finitos (FEM) ó Análisis Elástico Lineal (LEA), procesos que componen a la Guía de Diseño, dependiendo si es utilizado el módulo dependiente de la tensión ó el análisis elástico lineal.



Las tareas del 2 al 7 son desarrolladas internamente por el EIMC en el software de la Guía de Diseño y las salidas de datos están disponibles para los módulos de diseño de los pavimentos flexibles y rígidos.

Para pavimentos rígidos, las siguientes tareas adicionales son desarrolladas por el EIMC:

- *Tarea 8:* Generar perfiles de temperatura en el pavimento hidráulico y en las capas subyacentes para la sección del diseño de prueba, a cada hora de cada día para la localización seleccionada del proyecto, utilizando información de las estaciones de clima (usado para gradientes de temperatura en concreto hidráulico, aberturas y cierres de juntas y grietas, temperaturas de la base de concreto asfáltico para estimación de módulos).
- *Tarea 9:* Convertir el perfil de la temperatura no lineal a un gradiente de temperatura lineal efectiva que es utilizado para modelo de curvatura de losas y esfuerzos termales.
- *Tarea 10:* Generar un archivo de distribución de probabilidad de gradientes de temperatura lineal efectiva que puedan ser esperados para que ocurran para cada mes del año para el diseño de prueba de la sección transversal.
- *Tarea 11:* Determinar el índice de congelamiento y el número de ciclos de hielo-deshielo para la localización seleccionada. (No aplicable a nuestro país).
- *Tarea 12:* Proveer valores principales de humedad relativa mensualmente para usar en estimaciones de bombeo por humedad de losas de pavimento rígido.

Una de las salidas importantes requeridas del EICM para el diseño de pavimentos rígidos y flexibles es un sistema de factores de ajustes para materiales de capas no ligadas, que se considera para los efectos de los

parámetros y condiciones de medio ambiente tales como cambios en los contenidos de humedad, congelamiento, deshielo. Este factor, denotado por el factor  $F_{env}$ , es un coeficiente que es multiplicado por el valor de  $M_R$  óptimo para obtener un  $M_R$  como una función de la posición y el tiempo.

Las salidas del EICM pueden ser descritas en dos niveles (interno y externo):

#### **Salidas internas del EICM.**

El motor de cálculo del EICM que determina valores de contenido volumétrico de agua  $\theta_w$  y la temperatura de cada nudo (FEM) a través del tiempo. Los valores de  $\theta_w$  son divididos por el contenido volumétrico de agua saturado  $\theta_{sat}$  para obtener valores de grado de saturación,  $S$ . Sin oscilaciones en las entradas de agua subterránea y sin grietas en la capa de concreto asfáltico, los valores de  $S$  son esencialmente valores en el estado de equilibrio,  $S_{equil}$ .

Los valores de  $S_{equil}$  junto con los valores de grado de saturación en condiciones óptimas,  $S_{opt}$ , son usadas para calcular factores de ajuste para módulos de capas no ligadas para condiciones no congeladas,  $F_U$ , en cada nudo.

#### *Salidas externas del EICM.*

Las siguientes salidas son generadas por el EICM para usarse por otros componentes del software de la Guía de Diseño:

- Factores de ajuste de  $M_R$  para materiales no ligados en función del tiempo y la posición de cada capa.
- Temperaturas en la superficie y en el punto medio de cada subcapa ligada de asfalto. Estos valores son subjetivos por caracterización estadística para cada período de análisis (para un período de 1 mes ó 2 semanas).

- Valores de temperatura horaria en la superficie y en el sistema de incremento de profundidad (cada pulgada) en las capas ligadas para uso en el modelo térmico de grietas.
- Contenido de humedad volumétrico. Un valor promedio de cada subcapa es reportado para usar en el modelo de deformación permanente para los materiales no ligados.
- Perfil de temperatura en el concreto hidráulico. Valores horarios son generados para usar en las grietas y en los modelos de fallas para JPCP y modelos de despostillamiento para CRCP.
- Valores de humedad relativa para cada mes son generados para usar en los modelos JPCP y CRCP de gradientes de temperatura a través de la losa.

Las salidas externas de EICM se alimentan directamente de la caracterización de los materiales, cálculos de respuesta estructural y módulos de predicción de comportamiento del software de la Guía de Diseño.

#### **2.3.4.3 ENTRADAS DE DATOS DE CLIMA Y MATERIALES REQUERIDOS PARA EL MODELO TÉRMICO Y CONDICIONES DE HUMEDAD.**

Un gran número de parámetros de entrada son necesarios para producir las salidas de datos deseadas del EICM para el diseño de pavimentos. Las entradas requeridas por el modelo climático son las siguientes:

- Información General.
- Información relacionada al tiempo.
- Información relacionada al agua subterránea.
- Propiedades de drenaje y la superficie.
- Estructura y materiales de pavimento.

Los puntos presentados arriba cubren el diseño de pavimentos nuevos y rehabilitación. La interacción entre el clima, materiales y diseño de pavimentos es completamente explorado en la Guía de Diseño.

### ***Información general.***

Bajo esta categoría, las siguientes entradas específicas se relacionan con el modelo climático:

- *Complementación del mes y año de la construcción de Base/Subrasante.* Esta entrada es requerida para el diseño de pavimentos flexibles nuevos solamente. Se requiere para inicializar el modelo de humedad en el EICM. Los cálculos de la humedad en los materiales no ligados se comienzan desde este punto en el tiempo y como los contenidos de humedad en estas capas cambian de valores óptimos introducidos por el usuario a un valor de equilibrio. Cuando esto se toma conjuntamente con el mes de apertura al tráfico, esta entrada también se utiliza para controlar la longitud del período del análisis. Por ejemplo, si la diferencia del tiempo entre el mes de la construcción y el mes de apertura al tráfico es 2 años y la vida anticipada del diseño es 20 años, el período del análisis se fija a 22 años. Si esta entrada es totalmente desconocida, el diseñador debería utilizar el mes en la cual la mayoría de las carreteras existentes en el área han sido construidas.
- *Mes y año de la construcción del pavimento existente.* Esta entrada se requiere solamente para el diseño de la rehabilitación usando los recubrimientos de concreto asfáltico y concreto hidráulico. Si el pavimento subyacente es un pavimento flexible, este parámetro ayuda a identificar el grado al cual el pavimento se envejece en el momento de la rehabilitación. Si el pavimento subyacente es un pavimento rígido, este parámetro se utiliza para estimar la fuerza y el módulo de la capa de concreto hidráulico en el momento de la rehabilitación. Si esta entrada es totalmente desconocida, el diseñador debería utilizar el mes en la

cual la mayoría de las carreteras existentes en el área han sido construidas.

- *Mes y año de la construcción del pavimento.* Este parámetro se requiere para el diseño de pavimentos nuevos y rehabilitación. Para el diseño de pavimento flexible, este parámetro ayuda a determinar la rigidez y las características de la resistencia de la capa de asfalto y para el diseño del pavimento rígido se utiliza la estimación de la "tensión-cero", temperatura en el momento de la construcción del concreto hidráulico. Además, en el diseño de CRCP, esta entrada se utiliza para computar las humedades relativas, que tienen un impacto en el espaciamiento y la anchura iniciales de la grieta. Si esta entrada es totalmente desconocida, el diseñador debe utilizar el mes en la cual la mayoría de las carreteras existentes en el área han sido construidas.
- *Mes y año de apertura al tráfico.* El mes previsto en el cual el pavimento será abierto para el tráfico después de la construcción. Este valor define las condiciones climáticas a la hora de abrirse el tráfico, que se relaciona con los gradientes de la temperatura y los módulos de las capas, incluyendo el de la subrasante. Si es desconocido totalmente, el diseñador debe utilizar el mes más probable después del mes estimado de la construcción.
- *Tipo de diseño.* Pavimentos nuevos o rehabilitación y concreto asfáltico y rígidos. Esta entrada determina los tipos de entradas climáticas requeridas para el análisis, inicialización de parámetros de los modelos climáticos, esquemas de subcapas del pavimento, tipos de salidas requeridas del análisis climático, etc.

#### ***Datos relacionados al tiempo.***

Para lograr el análisis climático requerido para el incremento de la acumulación de daño, la Guía de Diseño requiere información de los siguientes cinco parámetros relacionados al tiempo sobre una base horaria de toda la vida de diseño del proyecto:

- Temperatura horaria del aire.
- Precipitación horaria.
- Velocidad del viento horaria.
- Porcentaje de los rayos del sol horario (usado para definir la cobertura de nubes).
- Humedad relativa horaria.

La temperatura del aire es requerido para la ecuación de balance de calor en el EICM para el cálculo de las ondas largas de radiación emitidas por el aire y por la transferencia de calor convectivo de la superficie hacia el aire.

Los flujos de calor resultante de la precipitación y la infiltración en la estructura de pavimento no han sido considerados en la formulación de las condiciones de flujos de calor ligados en la superficie. El papel de la precipitación bajo estas circunstancias no es totalmente claro y los métodos para incorporarla en el balance de la energía no han sido realizados. Sin embargo la precipitación es necesaria para calcular la infiltración en los casos de proyectos de rehabilitación de pavimentos y procesos de envejecimiento.

La velocidad del viento es requerida en los cálculos del ajuste del coeficiente de transferencia de calor en la superficie del pavimento. El porcentaje de rayos de sol son necesarios para los cálculos de balance de calor en la superficie del pavimento.

La humedad relativa horaria tiene un gran impacto sobre la contracción por secado del JPCP y el CRCP y también para determinar la abertura y el ancho de la grieta inicial en el CRCP.

### ***Profundidad del agua subterránea.***

La profundidad del agua subterránea se pensó para ser la mejor estimación de la profundidad media anual o de la profundidad media

estacional (un valor para cada uno de las cuatro estaciones del año). En la introducción de datos del nivel 1, podía ser determinado de la caracterización de perfiles de pozos perforados antes del diseño. En el nivel de introducción de datos del nivel 3, puede ser proporcionada una estimación del valor medio anual o los promedios estacionales.

Es importante reconocer que este parámetro desempeña un papel significativo en la exactitud total de los contenidos de agua de la fundación/pavimento y por lo tanto, de los valores de los módulos de equilibrio. Cada intento debería ser hecho para caracterizar este parámetro de la mejor manera posible.

### ***Propiedades de la superficie y drenaje.***

#### ***Absorbencia superficial de onda corta.***

Esta entrada pertenece a las capas superficiales del concreto asfáltico e hidráulico. La absorbencia superficial para una capa dada, depende de su composición, color y textura. Esta cantidad correlaciona directamente la cantidad de energía solar disponible que sea absorbida por la superficie del pavimento. Las superficies más ligeras y más reflexivas tienden a tener absorbencia más baja de la onda corta y viceversa.

Las estimaciones recomendadas para éste parámetro en cada uno de los niveles jerárquicos de introducción de datos, es la siguiente:

- Nivel 1: En este nivel es recomendado que este parámetro sea estimado a través de pruebas de laboratorio. Sin embargo, aunque existan procesos para la medición de absorbencia de onda corta, no hay certificado estándar actual de AASHTO para materiales de pavimento.
- Nivel 2: No aplicable.
- Nivel 3: Los valores por defecto pueden ser asumidos para varios materiales de pavimentos como los siguientes:

- Asfalto desgastado (gris): 0.80 – 0.90.
- Asfalto fresco (negro): 0.90 – 0.98.
- Capa de concreto hidráulico vieja: 0.70 – 0.90.

### Infiltración.

Este parámetro define el potencial neto de la infiltración del pavimento sobre su vida de diseño. En la Guía de Diseño, la infiltración puede asumir cuatro valores: Ninguno, menor (10 por ciento de la precipitación que entra en el pavimento), moderado (50 por ciento de la precipitación que entra en el pavimento), y extremo (100 por ciento de la precipitación que entra en el pavimento). De acuerdo con estas entradas, el EICM determina la cantidad de agua disponible encima de la primera capa no ligada.

Las siguientes recomendaciones son hechas para seleccionar los parámetros de infiltración:

- Menor: Esta opción es válida cuando son usados los hombros de concreto anclados o sellados (en pavimentos rígidos), carriles anchos de concreto rígido o ancho completo de pavimento asfáltico (carril principal y hombro monolítico) ó cuando un agente agresivo es controlado para mantener la junta del carril y el hombro sellada.
- Moderado: Esta opción es válida para todos los otros tipos de hombros, restauración de pavimento hidráulico y sobre capas de concreto asfáltico en pavimentos existentes viejos y agrietados, donde las grietas son el reflejo de donde posiblemente ocurran.
- Extremo: Generalmente no es usado para el diseño de pavimentos nuevos o reconstruidos.

Estas recomendaciones son validas en toda la jerarquía de los niveles de entradas de datos.



Longitud de trayectoria del drenaje.

La longitud de trayectoria del drenaje es la longitud resultante de la trayectoria del drenaje, es decir, la distancia medida a lo largo del resultado de la sección transversal y longitudinal del pavimento. Se mide del punto más alto de la sección representativa del pavimento al punto en donde ocurre el drenaje. Esta entrada se utiliza en la infiltración del EICM y el modelo del drenaje para computar el tiempo requerido para drenar una capa no ligada de la base o de la subbase de una condición inicialmente húmeda.

El programa para computadora DRIP se puede utilizar para calcular este parámetro basado en la sección transversal del pavimentos y en las pendientes longitudinales, los anchos de carril, las anchuras del foso de drenaje lateral (si es aplicable), y geometría seccionada transversalmente (coronado o superelevado).

Sección transversal del pavimento.

La sección transversal del pavimento es la pendiente perpendicular a la superficie del pavimento en la dirección del tráfico. Esta entrada se utiliza para calcular el tiempo requerido para drenar una capa de base o de subbase del pavimento en una condición inicialmente húmeda.

***Entradas de datos con respecto a la estructura y materiales de pavimento.***

Espesores de capa.

El espesor de la capa de cada material en la estructura del pavimento debe corresponder a las capas que son más o menos homogéneas. El EICM internamente subdivide estas capas para cálculos más exactos de los perfiles de la humedad y de temperatura. El procedimiento requiere siempre dos capas no ligadas bajo las últimas capas estabilizadas para los propósitos de cálculo (una capa podría ser una subrasante compactada y la otra subrasante natural

ó una capa podría ser el relleno granular compactado y el otro subrasante natural).

Si el diseño de prueba no facilita esto, la capa de subrasante es subdividida en dos capas internamente por el software de la Guía del Diseño. Además, todas las subdivisiones de la capa se manejan internamente y automáticamente. El usuario no debe subdividir las capas del pavimento en subcapas.

*Propiedades de materiales asfálticos.*

Se requieren varias características del asfalto para el diseño de pavimentos flexibles y de recubrimientos ó de concreto asfáltico. Entre estas características están las que controlan el flujo de calor a través del sistema de pavimento y de tal modo que influyan en el régimen de la temperatura y de la humedad dentro de ella. Las características de materiales asfálticos que entran en los cálculos de EICM incluyen:

- Absorbencia superficial de onda corta.
- Conductividad térmica,  $K$ .
- Calor ó capacidad térmica,  $Q$ .

La conductividad térmica  $K$  es la cantidad de calor que fluye normalmente a través de la superficie de un área unitaria por unidad de tiempo y por unidad de gradiente de temperatura. El contenido de humedad tiene una influencia sobre la conductividad térmica del concreto asfáltico. El EICM no varía la conductividad térmica con varios contenidos de humedad de las capas de asfalto como hace con las capas no ligadas.

El calor o la capacidad térmica es la cantidad real de energía térmica  $Q$  necesaria para cambiar la temperatura de una unidad de masa a un grado.

La Tabla 2.34 esquematiza las propuestas recomendadas para caracterizar  $K$  y  $Q$  en las jerarquías de niveles de entrada de datos para el diseño de pavimentos flexibles nuevos y el diseño de pavimentos con sobrecapa de concreto asfáltico.

**Tabla 2.34. Caracterización de las entradas de datos de los materiales de concreto asfáltico requeridas para los cálculos del EICM.<sup>60</sup>**

Propiedades del Material	Nivel de entrada	Descripción
Conductividad térmica, $K$	1	Es recomendada una medición directa para este nivel (ASTM E 1952).
	2	No es aplicable.
	3	Usar valores de diseño selectos basados sobre datos históricos de instituciones ó de valores típicos mostrados a continuación: <ul style="list-style-type: none"> <li>Rango de valores típicos para concreto asfáltico de 0.44 a 0.81 BTU/(ft)(h)(°F).</li> </ul>
Capacidad de calor, $Q$	1	Es recomendada una medición directa para este nivel (ASTM D 2766).
	2	No es aplicable.
	3	Usar valores de diseño selectos basados sobre datos históricos de instituciones ó de valores típicos mostrados a continuación: <ul style="list-style-type: none"> <li>Rango de valores típicos para concreto asfáltico de 0.22 a 0.40 BTU/(lb)(°F).</li> </ul>

*Propiedades de materiales para concreto hidráulico.*

Así como con los materiales de asfalto, la conductividad térmica, la capacidad de calor y la absorbencia superficial de onda corta también se necesitan para los materiales de concreto hidráulico para que el EICM estime el régimen de la temperatura y de la humedad en un sistema de pavimento rígido. La Tabla 2.35 esquematiza las propuestas recomendadas para caracterizar la conductividad termal y la capacidad de calor de los materiales de concreto hidráulico usados en el diseño de pavimentos nuevos de concreto

<sup>60</sup> Parte 2, Capítulo 3: Environmental Effects. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.3.13.

hidráulico, sobrecapas de concreto hidráulico colocados sobre pavimento flexible existente y de las sobrecapas de concreto asfáltico colocados sobre pavimento rígido existente.

**Tabla 2.35. Caracterización de las entradas de datos de los materiales de concreto hidráulico requeridas para los cálculos del EICM.<sup>61</sup>**

Propiedades del Material	Nivel de entrada	Descripción
Conductividad térmica, $K$	1	Es recomendada una medición directa para este nivel (ASTM E 1952).
	2	No es aplicable.
	3	Usar valores de diseño selectos basados sobre datos históricos de instituciones ó de valores típicos mostrados a continuación: <ul style="list-style-type: none"> <li>Rango de valores típicos para concreto hidráulico de 1.0 a 1.5 BTU/(ft)(h)(°F).</li> </ul>
Capacidad de calor, $Q$	1	Es recomendada una medición directa para este nivel (ASTM D 2766).
	2	No es aplicable.
	3	Usar valores de diseño selectos basados sobre datos históricos de instituciones ó de valores típicos mostrados a continuación: <ul style="list-style-type: none"> <li>Rango de valores típicos para concreto hidráulico de 0.2 a 0.28 BTU/(lb)(°F) con el último valor más bajo del rango siendo éste el más común.</li> </ul>

Propiedades de los materiales compactados no ligados.

*Determinación de los parámetros de Masa-Volumen.*

Los parámetros de interés en esta categoría son el peso específico seco máximo ( $g_{d\text{máx}}$ ), la gravedad específica ( $G_s$ ) y el contenido de humedad óptimo gravimétrico ( $W_{opt}$ ) del material compactado no ligado en cuestión. Desde estas tres entradas, el resto de los parámetros de masa-volumen se pueden calcular, incluyendo el grado inicial de la saturación,  $S_{opt}$ , contenido volumétrico óptimo

<sup>61</sup> Parte 2, Capítulo 3: Environmental Effects. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.3.14.

de agua,  $\theta_{opt}$  y del contenido volumétrico saturado de agua,  $\theta_{sat}$ . Estos cálculos se hacen internamente en el software de la Guía de Diseño y son parte de las salidas internas del EICM.

La Tabla 2.36 describe los procedimientos para obtener los parámetros de entrada de datos bajo esta categoría para los materiales compactados no ligados. En el nivel 1, se requiere que  $g_{d\text{ máx}}$ ,  $W_{opt}$ , y  $G_S$  estén medidos cuidadosamente en el laboratorio de acuerdo con los estándares de la prueba para cada capa no ligada.

Si el usuario elige no medir estos parámetros anteriores, entonces se sugiere que las entradas del nivel 2 sean adoptadas. En las entradas del nivel 2, el usuario incorpora características del índice de gradación y de la ingeniería de materiales no ligados tales como el tamaño de grano eficaz que corresponde a 60 por ciento que pasa en peso,  $D_{60}$ , el porcentaje que pasa el tamiz del No. 200,  $P_{200}$ , y el índice de plasticidad,  $PI$ .

Las entradas de datos del nivel 3 no son aplicables para esta categoría de entrada de datos.

La estimación de  $S_{opt}$ ,  $\theta_{opt}$ ,  $\theta_{sat}$  son calculados internamente en el EICM a partir de  $g_{d\text{ máx}}$ ,  $W_{opt}$ , y  $G_S$  usando las siguientes ecuaciones:

$$q_{opt} = \frac{W_{opt} \cdot g_{d\text{ máx}}}{g_{agua}} \quad (2.32)$$

$$S_{opt} = \frac{q_{opt}}{1 - \frac{g_{d\text{ máx}}}{g_{agua} \cdot G_S}} \quad (2.33)$$

$$q_{sat} = \frac{q_{opt}}{S_{opt}} \quad (2.34)$$

Donde:

$g_{agua}$  : Es peso específico del agua (en unidades consistentes).

*Equilibrio del contenido de humedad óptimo gravimétrico.*

Esto es requerido de entrada de datos para el diseño de rehabilitación. Sin embargo, no se requiere para el diseño de pavimento nuevo. Se recomienda que este parámetro esté estimado de la prueba directa de muestras del sitio o con otros medios apropiados.

*Conductividad hidráulica saturada.*

La conductividad hidráulica saturada,  $K_{sat}$ , se requiere para determinar los perfiles transitorios de la humedad en materiales compactados no ligados y para calcular sus características de drenaje. La Tabla 2.37 describe cómo este parámetro se puede estimar en los varios niveles jerárquicos de introducción de datos.

*Conductividad térmica seca y capacidad de calor seca*

La Tabla 2.38 esquematiza las propuestas recomendadas para caracterizar la conductividad térmica ( $K$ ) y la capacidad de calor ( $Q$ ) seca de materiales no ligados. El EICM ajusta automáticamente los valores iniciales de  $K$  y  $Q$  según el contenido actual de humedad del suelo.

**Tabla 2.36. Entradas de datos de materiales requeridos para material compactado no ligado para los parámetros de Masa-Volumen de los cálculos de EICM.<sup>62</sup>**

Propiedad del Material	Nivel de Entrada	Descripción
Gravedad específica (secada en horno), $G_s$	1	Medición directa usando AASHTO T 100 (desarrollado en conjunto con la prueba de consolidación AASHTO T 180 para bases ó AASHTO T 99 para otras capas).
	2	Determinado de $P_{200}$ (AASHTO T 27) y $PI$ (AASHTO T 90) de las capas, así: 1. <i>Determinar <math>P_{200}</math> y <math>PI</math>.</i> 2. <i>Cálcular <math>G_s</math></i> $G_s = 0.041(P_{200} \times PI)^{0.29} + 2.65$
	3	No Aplicable.
Contenido gravimétrico óptimo de agua, $W_{opt}$ , y el peso específico máximo de los sólidos, $g_{d \text{ máx}}$	1	Típicamente AASHTO T180 para prueba de compactación de capa de base y AASHTO T 99 para prueba de compactación para otras capas.
	2	Determinado de $D_{60}$ (AASHTO T 27), $P_{200}$ (AASHTO T 27) y $PI$ (AASHTO T 90) de las capas, así: 1. <i>Leer <math>P_{200}</math> y <math>PI</math> y <math>D_{60}</math>. Identificar la capa como una base de agregado compactado, subrasante compactada ó suelo natural in situ.</i> 2. <i>Cálcular <math>S_{opt}</math>:</i> $S_{opt} = 6.752(P_{200} \times PI)^{0.147} + 78$ 3. <i>Calcular <math>w_{opt}</math>:</i> <i>Si <math>P_{200} \times PI &gt; 0</math></i> $w_{opt} = 1.3(P_{200} \times PI)^{0.73} + 11$ <i>Si <math>P_{200} \times PI = 0</math></i> $w_{opt(T99)} = 8.6425(D_{60})^{-0.1038}$ <i>Si la capa no es una base de agregados:</i> $w_{opt} = w_{opt(T99)}$ <i>Si la capa es una base de agregados:</i> $w_{opt} = w_{opt(T99)} - \Delta w_{opt}$ 4. <i>Para obtener <math>G_s</math>, referirse al proceso del nivel 2 mostrado arriba.</i> 5. <i>Calcular <math>g_{d \text{ máx}}</math> para materiales compactados, <math>g_{d \text{ máx comp}}</math></i> 6. $g_{d \text{ máx comp}} = \frac{G_s \cdot g_{\text{agua}}}{1 + \frac{w_{opt} \cdot G_s}{S_{opt}}}$ 7. <i>Calcular <math>g_{d \text{ máx}}</math></i> <i>Si la capa es un material compactado:</i> $g_{d \text{ máx}} = g_{d \text{ máx comp}}$ <i>Si la capa es un material natural in situ:</i> $g_d = 0.90 \cdot g_{d \text{ máx comp}}$ 8. <i>El EICM usa <math>g_d</math> para <math>g_{d \text{ máx}}</math></i>
	3	No Aplicable.

<sup>62</sup> Parte 2, Capítulo 3: Environmental Effects. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.3.15.

**Tabla 2.37. Entradas de materiales requerido para el material compactado no ligado para los cálculos de EICM en la conductividad hidráulica saturada,  $K_{sat}$ .**<sup>63</sup>

Propiedad del Material	Nivel de Entrada	Descripción
Conductividad hidráulica saturada, $K_{sat}$	1	La Medición directa es recomendada en este nivel utilizando la prueba de la permeabilidad (AASHTO T 215).
	2	Determinado de $P_{200}$ , (AASHTO T 27), $D_{60}$ (AASHTO T 27) y $PI$ (AASHTO T 90) de las capas así: 1. Determinar $P_{200} PI = P_{200} \times PI$ 2. Si $0 \leq P_{200} PI < 1$ $k_{sat} = 118.11 \times 10^{-1.1275(\log D_{60} + 2)^2 + 7.2816(\log D_{60} + 2) - 11.2891} \text{ (pies/h)}$ Válido para $D_{60} < 0.75$ pulg. Si $D_{60} > 0.75$ pulg, colocar $D_{60} = 0.75$ mm 3. Si $P_{200} PI \geq 1$ $k_{sat} = 118.11 \times 10^{-0.0004(P_{200} PI)^2 - 0.0929(P_{200} PI) - 6.56} \text{ (pies/h)}$
	3	No Aplicable

**Tabla 2.38. Entradas de materiales requerido para el material compactado no ligado para los cálculos de EICM en la conductividad térmica seca ( $K$ ) y la capacidad de calor seca ( $Q$ )**<sup>64</sup>

Propiedad del Material	Nivel de Entrada	Descripción																																						
Conductividad térmica seca, $K$	1	Es recomendado una medición directa en este nivel (ASTM E 1952).																																						
	2	No Aplicable.																																						
	3	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo de Suelo</th> <th>Rango</th> <th>Recomendado</th> </tr> <tr> <th></th> <th>BTU/(ft)(h)(°F)</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A-1-a</td> <td>0.22-0.44</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>A-1-b</td> <td>0.22-0.44</td> <td>0.27</td> </tr> <tr> <td>A-2-4</td> <td>0.22-0.24</td> <td>0.23</td> </tr> <tr> <td>A-2-5</td> <td>0.22-0.24</td> <td>0.23</td> </tr> <tr> <td>A-2-6</td> <td>0.20-0.24</td> <td>0.22</td> </tr> <tr> <td>A-2-7</td> <td>0.16-0.23</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>A-3</td> <td>0.25-0.40</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>A-4</td> <td>0.17-0.23</td> <td>0.22</td> </tr> <tr> <td>A-5</td> <td>0.17-0.23</td> <td>0.19</td> </tr> <tr> <td>A-6</td> <td>0.16-0.22</td> <td>0.18</td> </tr> <tr> <td>A-7-5</td> <td>0.09-0.17</td> <td>0.13</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de Suelo	Rango	Recomendado		BTU/(ft)(h)(°F)		A-1-a	0.22-0.44	0.30	A-1-b	0.22-0.44	0.27	A-2-4	0.22-0.24	0.23	A-2-5	0.22-0.24	0.23	A-2-6	0.20-0.24	0.22	A-2-7	0.16-0.23	0.20	A-3	0.25-0.40	0.30	A-4	0.17-0.23	0.22	A-5	0.17-0.23	0.19	A-6	0.16-0.22	0.18	A-7-5	0.09-0.17
Tipo de Suelo	Rango	Recomendado																																						
	BTU/(ft)(h)(°F)																																							
A-1-a	0.22-0.44	0.30																																						
A-1-b	0.22-0.44	0.27																																						
A-2-4	0.22-0.24	0.23																																						
A-2-5	0.22-0.24	0.23																																						
A-2-6	0.20-0.24	0.22																																						
A-2-7	0.16-0.23	0.20																																						
A-3	0.25-0.40	0.30																																						
A-4	0.17-0.23	0.22																																						
A-5	0.17-0.23	0.19																																						
A-6	0.16-0.22	0.18																																						
A-7-5	0.09-0.17	0.13																																						
Capacidad de calor seca, $Q$	1	Es recomendado una medición directa en este Nivel (ASTM D 2766).																																						
	2	No Aplicable.																																						
	3	Usar valores de diseño selectos basados sobre datos históricos de instituciones ó de valores típicos mostrados a continuación: <ul style="list-style-type: none"> <li>Rango de valores típicos de 0.17 a 0.20 BTU/(lb)(°F).</li> </ul>																																						

<sup>63</sup> Parte 2, Capítulo 3: Environmental Effects. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.3.17.

<sup>64</sup> Parte 2, Capítulo 3: Environmental Effects. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.3.15.



*Parámetros de las características suelo-agua.*

La SWCC define la relación entre el contenido de agua y la succión de un suelo dado. La Tabla 2.39 esquematiza las consideraciones recomendadas para caracterizar los parámetros de la SWCC en cada de los tres niveles jerárquicos de entradas de datos. Como parte del desarrollo de la Guía de Diseño, muchos esfuerzos fueron consumidos para obtener los parámetros apropiados de la ecuación de Fredlung y Xing provenientes de las propiedades índices del suelo.

**Tabla 2.39. Opciones para estimar los parámetros de la SWCC.<sup>65</sup>**

Nivel de entrada	Proceso para determinarlos parámetros de la SWCC	Pruebas requeridas
1	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Medición directa de la succión (<math>h</math>) en psi y contenido volumétrico del agua (<math>\theta_w</math>). como par ordenado.</li> <li>2. Medición directa del contenido gravimétrico del agua <math>W_{opt}</math> y el peso específico máximo seco <math>\gamma_d</math> máx.</li> <li>3. Medición directa de la gravedad específica de los sólidos, <math>G_s</math>.</li> <li>4. Calcular <math>\theta_{opt}</math>.</li> <li>5. Calcular <math>S_{opt}</math>.</li> <li>6. Calcular <math>\theta_{sat}</math>.</li> <li>7. Basado en el análisis de regresión no lineal, calcular la SWCC de los parámetros modelos de <math>a_f</math>, <math>b_f</math>, <math>c_f</math> y <math>h_r</math> usando la ecuación propuesta por Fredlund y Xing y los valores del par ordenado (<math>h</math>, <math>\theta_w</math>) como par ordenado obtenido en el paso 1.</li> </ol> $q_w = C(h) \times \frac{q_{sat}}{\left[ \ln \left[ \exp(1) + \left( \frac{h}{a_f} \right)^{b_f} \right] \right]^{c_f}}$ $C(h) = \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{h}{h_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{1.45 \times 10^3}{h_r} \right)} \right]$ <ol style="list-style-type: none"> <li>8. Entrar los datos de <math>a_f</math> (psi), <math>b_f</math>, <math>c_f</math> y <math>h_r</math> (psi) dentro del software de la Guía de Diseño.</li> <li>9. El EICM generará la función de algún contenido de agua (SWCC).</li> </ol>	<p>Placa de presión, filtro de papel y/o prueba de la celda Tempe.</p> <p>AASHTO T 180 ó AASHTO T 99 para <math>\gamma_d</math> máx. AASHTO T 100 para <math>G_s</math>.</p>

<sup>65</sup> Parte 2, Capítulo 3: Environmental Effects. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.3.18.

**Tabla 2.39. Opciones para estimar los parámetros de la SWCC (continuación).<sup>66</sup>**

Nivel de entrada	Proceso para determinar los parámetros de la SWCC	Pruebas requeridas
2	<p>1. Medición directa del contenido gravimétrico del agua <math>W_{opt}</math> y el peso específico seco máximo <math>\gamma_d</math> máx.</p> <p>2. Medición directa de la gravedad específica de los sólidos <math>G_s</math>.</p> <p>3. El EICM internamente hará lo siguiente:</p> <p>a) Calcular <math>P_{200} * PI</math>.</p> <p>b) Calcular <math>\theta_{opt}</math>, <math>S_{opt}</math> y <math>\theta_{sat}</math> descritos para el nivel 1.</p> <p>c) Basado en el análisis de regresión no lineal, el EICM calculará los parámetros modelos de <math>a_f</math>, <math>b_f</math>, <math>c_f</math> y <math>h_r</math> de la SWCC usando la correlaciones con <math>P_{200} * PI</math> y <math>D_{60}</math>.</p> <p>i. Si <math>P_{200}PI &gt; 0</math>:</p> $a_f = \frac{0.00364(P_{200}PI)^{3.35} + 4(P_{200}PI) + 11}{6.895}, \text{ psi}$ $\frac{b_f}{c_f} = -2.313(P_{200}PI)^{0.14} + 5$ $c_f = 0.0514(P_{200}PI)^{0.465} + 0.5$ $\frac{h_r}{a_f} = 32.44e^{0.0186(P_{200}PI)}$ <p>ii. Si <math>P_{200}PI = 0</math>:</p> $a_f = \frac{0.8627(D_{60})^{-0.751}}{6.895}, \text{ psi}$ $\bar{b}_f = 7.5$ $c_f = 0.1772 \ln(D_{60}) + 0.5$ $\frac{h_r}{a_f} = \frac{1}{D_{60} + 9.7e^{-4}}$ <p>d) La SWCC será establecido internamente usando la ecuación de Fredlung y Xing mostrado en el nivel 1.</p>	<p>AASHTO T 180 ó AASHTO T 99 para <math>\gamma_d</math> máx. AASHTO T 100 para <math>G_s</math>. AASHTO T 127 para <math>P_{200}</math> y <math>D_{60}</math>. AASHTO T 90 para <math>PI</math>.</p>

<sup>66</sup> Parte 2, Capítulo 3: Environmental Effects. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.3.19.

**Tabla 2.39. Opciones para estimar los parámetros de la SWCC (continuación).<sup>67</sup>**

Nivel de entrada	Proceso para determinarlos parámetros de la SWCC	Pruebas requeridas
3	<p>Medición directa y entrada de <math>P_{200}</math>, <math>PI</math> y <math>D_{60}</math> después de que el EICM use correlaciones con <math>P_{200}PI</math> y <math>D_{60}</math> para automáticamente generar los parámetros de la SWCC para cada suelo, así:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Identificar la capa como una base de agregado u otra capa.</li> <li>2. Calcular <math>G_S</math> esquematizado en la tabla 2.3.3 para el Nivel 2.</li> <li>3. Calcular <math>P_{200} * PI</math>.</li> <li>4. Calcular <math>S_{opt}</math>, <math>W_{opt}</math> y <math>\gamma_d</math> máx mostrado en el Nivel 2.</li> <li>5. Basado en el análisis de regresión no lineal, el EICM calculará el modelo de parámetros de la SWCC <math>a_f</math>, <math>b_f</math>, <math>c_f</math> y <math>h_t</math> usando las correlaciones con <math>P_{200}PI</math> y <math>D_{60}</math> mostrado en el Nivel 2.</li> <li>6. La SWCC será internamente establecido usando la ecuación de Fredlung y Xing mostrado en el nivel 1.</li> </ol>	<p>AASHTO T 127 para <math>P_{200}</math> y <math>D_{60}</math>. AASHTO T 90 para <math>PI</math>.</p>

*Propiedades de los materiales natural no compactado no ligado.*

La Tabla 2.40 describe los parámetros de entrada para capas de suelo natural in situ, el cual se encuentra debajo de las capas compactadas.

Aunque las características de los materiales de estas capas más bajas son importantes para el comportamiento total de la carga-respuesta del pavimento, un nivel inferior de esfuerzo es generalmente suficiente para caracterizarlas cuando están comparados con las propiedades de los materiales compactos para sobrecapa.

<sup>67</sup> Parte 2, Capítulo 3: Environmental Effects. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.3.19.

**Tabla 2.40. Entradas requeridas para capa natural no ligada de materiales in situ para el cálculo del EICM.<sup>68</sup>**

<b>Propiedades requeridas</b>	<b>Opciones para determinación</b>
Gravedad específica, $G_s$	Medición directa no requerida (nivel 1). Referirse a la Tabla 2.35 para estimar este parámetro de los parámetros de gradación (nivel 2).
Conductividad hidráulica saturada, $K_{sat}$	Medición directa no requerida (nivel 1). Referirse a la Tabla 2.36 para estimar este parámetro de los parámetros de gradación (nivel 2).
Peso específico seco máximo, $g_{d\text{máx}}$	Medición directa no requerida (nivel 1). Referirse a la Tabla 2.37 para estimar este parámetro de los parámetros de gradación (nivel 2).
Conductividad térmica seca, $K$ Capacidad de calor, $Q$	Medición directa o valores por defecto pueden ser combinados y usados. Referirse a la Tabla 2.38 para rangos de valores razonables.
Índice Plástico, $PI$	Medición directa requerida de acuerdo a AASHTO T 90.
$P_{200}$ , $P_4$ , $D_{60}$	Medición directa requerida de acuerdo a AASHTO T 27.
Contenido gravimétrico óptimo de agua, $W_{opt}$	No requerido. Referir a Tabla 2.36
Equilibrio gravimétrico del contenido de agua	Medición directa requerida para análisis de pavimentos rehabilitados. Este parámetro no es requerido par diseño de pavimentos nuevos.

<sup>68</sup> Parte 2, Capítulo 3: Environmental Effects. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 2.3.22.

## **2.4 DRENAJE**

### **2.4.1 INTRODUCCIÓN.**

La humedad tiene una gran influencia sobre las propiedades de los materiales que constituyen el paquete estructural y sobre el comportamiento de los pavimentos en general. La presencia del agua juega un papel tan importante que el método AASHTO 1986 incorporó un coeficiente de drenaje en la ecuación de diseño que afectaba a la base y subbase.

El agua presente en los pavimentos puede provocar estos daños:

- Migración de partículas del suelo creando problemas de erosión.
- Fallas producidas por un escurrimiento incontrolado que llevan a la saturación, exceso de subpresión o exceso de fuerzas de filtración.
- Ablandamiento de la subrasante cuando ésta se satura y permanece saturada durante un prolongado período.
- Degradación de la calidad del material del pavimento por acción de la humedad.

En todo buen diseño de pavimentos debe buscarse que la base, subbase y subrasante estén lo más protegidos de la acción del agua. Hay tres formas de considerar el control o la reducción de los problemas causados por el agua:

1. Sellar correctamente el pavimento y no permitir la entrada del agua a las distintas capas:
  - Usar materiales apropiados y técnicas especiales para sellado de juntas longitudinales, transversales y fisuras.
  - Diseñar pavimentos con membranas impermeables.
  - Usar capas de rodamiento, bases, subbases y hombros impermeables.

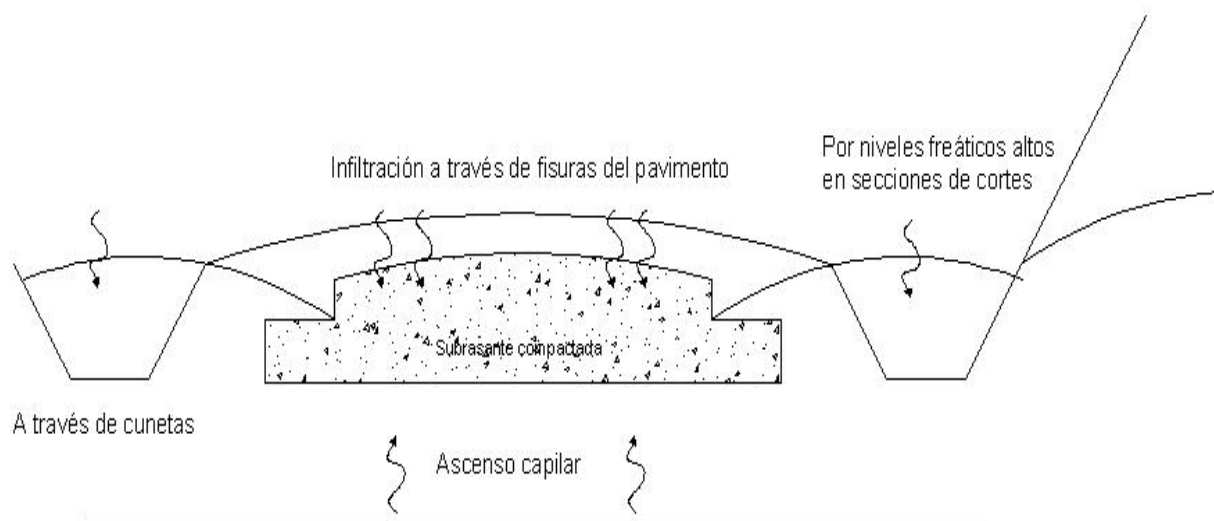
- Instalar drenes interceptores para evitar la entrada de agua al paquete estructural.
2. Usar materiales que sean insensibles a la humedad y que no provoquen daños relacionados con la humedad:
    - Usar materiales estabilizados para capas granulares (estabilización con cemento o productos bituminosos).
    - Seleccionar materiales granulares con bajo contenido de finos y baja plasticidad que puedan resistir los efectos de la humedad.
  3. Proveer un drenaje adecuado para remover efectivamente todo tipo de humedad que pueda entrar en el pavimento antes que se produzcan deterioros:
    - Diseñar un sistema de drenaje que mantenga el nivel freático por debajo del pavimento o que pueda evacuar fácilmente el agua que eventualmente pueda ingresar en el paquete estructural.
    - Usar bases y subbases permeables, diseñadas no sólo desde el punto de vista estructural sino también como capas drenantes. Debido a esto, el agua que ingresa al pavimento drena en dirección horizontal para salir del camino, en lugar de continuar hacia abajo, hacia la subrasante.
    - Colocar mantos drenantes debajo de secciones en terraplén.

### **2.4.2 FALLAS INDUCIDAS POR LA HUMEDAD.**

La infiltración a través de la superficie, niveles freáticos altos, ascenso capilar y aguas provenientes de infiltraciones (comunes en secciones de corte con niveles freáticos altos) contribuyen al desarrollo de fallas en los pavimentos. Las fallas en pavimentos flexibles están caracterizadas por excesiva deflexión, fisuración, bajo valor de soporte de la subrasante y desintegraciones. Para pavimentos rígidos las fallas son debidas a inestabilidad de la subrasante, bombeo con la consecuente pérdida de soporte y deterioro del concreto debido a fisuras de durabilidad.

Es un hecho bien conocido que la presencia del agua es muy perjudicial para los pavimentos. Tanto es así que los métodos clásicos de diseño consideraban los parámetros resistentes de la subrasante en condición saturada como dato de entrada en el diseño. El agua libre en la interfase subrasante-pavimento es la responsable de muchos problemas. Cedergreen (1967) demostró que las cargas dinámicas producen incrementos más importantes de la presión de poros justo en el momento del pasaje de la carga y en consecuencia hay una reducción notable de la capacidad de carga.

La humedad en la subrasante y en la estructura del pavimento proviene de distintas causas tal como se mira en la siguiente Figura 2.23:



**Figura 2.23. Fuentes de humedad en pavimentos<sup>69</sup>**

Cedergreen midió la capacidad del agua para infiltrarse a través de pavimentos y encontró que la permeabilidad del pavimento de concreto considerando juntas y otras áreas de infiltración era de 5.1 mm/hora ( $1.4 \times 10^{-4}$

<sup>69</sup> Fig. 2.20: Curso de Actualización de Diseño Estructural de Caminos. Método AASHTO 1993. Septiembre 1998. Pág. 127.

cm/seg) y para pavimentos flexibles, teniendo en cuenta fisuras y otras discontinuidades era de 12.7 mm/hora ( $3.5 \times 10^{-4}$  cm/seg.).

### 2.4.3 PRINCIPIOS BÁSICOS DE UN SISTEMA DE DRENAJE.

Hay dos fuentes de agua en lo que concierne al estudio de un sistema de drenaje:

- El agua existente en la zona de saturación a la altura del nivel freático.
- El agua de infiltración que entra en el pavimento escurriendo a través de juntas o fisuras en la superficie del pavimento, a través de vacíos en el pavimento ó a través de cunetas laterales al camino.

En el diseño de un sistema de drenaje se deben considerar estos conceptos:

- *Filtración*: Es el movimiento o flujo de agua a través de un medio poroso permeable.
- *Porosidad*: Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total.
- *Permeabilidad*: Es la propiedad que tiene un medio para permitir el pasaje del agua. Esta depende del tamaño, forma y extensión de los poros o vacíos interconectados.
- *Coefficiente de Permeabilidad*: Es el volumen de agua que atraviesa una unidad de área en un medio poroso en una unidad de tiempo bajo un gradiente hidráulico unitario. Por ley de Darcy:

$$v = ki$$

$$\frac{Q}{A} = ki \quad (2.35)$$

$$k = \frac{Q}{iA}$$



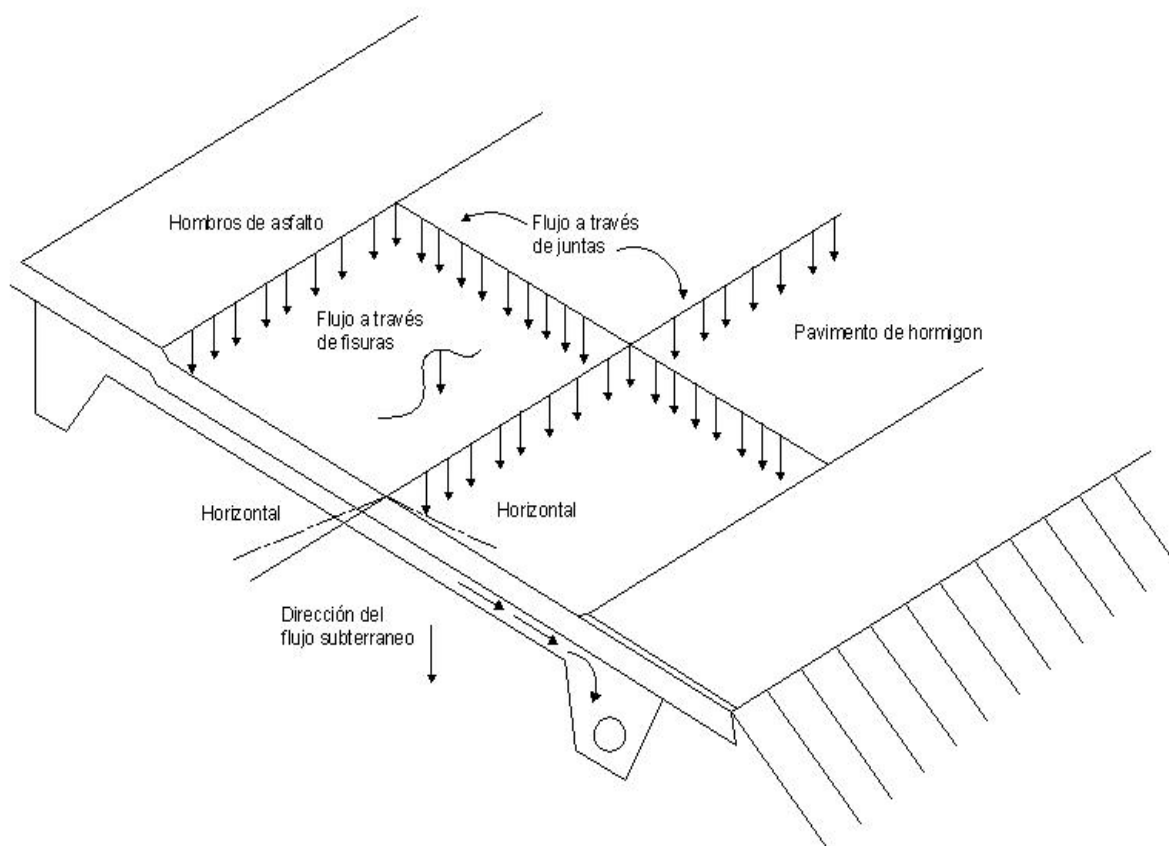
Siendo:

k: Coeficiente de Permeabilidad

i: Gradiente Hidráulico

El coeficiente de permeabilidad varía dentro de un rango muy alto y varía también según la dirección en que se escurra el agua.

El movimiento del agua dentro del paquete estructural depende de la permeabilidad de los materiales usados en el mismo y de las pendientes longitudinales y transversales del camino.



**Figura 2.24. Forma en que escurra el agua sobre y bajo un pavimento de concreto<sup>70</sup>**

<sup>70</sup> Fig. 2.21: Curso de Actualización de Diseño Estructural de Caminos. Método AASHTO 1993. Septiembre 1998. Pág. 128.

Un sistema de drenaje subsuperficial debe ser diseñado de acuerdo a estos criterios:

- El pavimento incluyendo hombros y áreas adyacentes debe ser diseñado y mantenido tan impermeable como sea posible para minimizar la infiltración de agua de superficie como de agua por capilaridad o de agua freática.
- Para minimizar los efectos perjudiciales del agua, el sistema de drenaje debe ser diseñado de manera tal que evacue el agua lo más pronto posible.
- El sistema de drenaje debe ser diseñado como un componente estructural del paquete sin que sus buenas propiedades drenantes impliquen una merma de sus cualidades resistentes.

#### **2.4.4 SISTEMAS DE DRENAJE SUBTERRÁNEOS DE CAMINOS.**

Un sistema de drenaje subterráneo de caminos puede clasificarse de acuerdo a:

- La función de agua subterránea que deben controlar.
- La función que cumplen.
- Su ubicación y geometría.

Estos sistemas pueden cumplir estas funciones:

- Intercepción del escurrimiento proveniente de un corte.
- Abatimiento del nivel freático.
- Captación de flujos de otros sistemas de drenaje.

Los sistemas más conocidos son:

- Drenes Longitudinales.
- Drenes Transversales y Horizontales.

- Bases Permeables.
- Pozos.

### **Drenes Longitudinales.**

Están ubicados en forma paralela al camino y pueden constar de una cuneta de una profundidad determinada o de un caño colector perforado y un filtro.

Cuando se trata de cortes muy profundos con niveles freáticos originales altos, un dren longitudinal al costado del camino puede no ser suficiente y aparecería agua al pie del talud del corte, con todos los problemas que esto causa. En este caso se recomienda colocar a media ladera otro dren interceptor.

### **Drenes Transversales y Horizontales.**

Son los drenes que corren en forma transversal al camino. En general forman un ángulo recto con el eje del camino aunque a veces son oblicuos a éste. Han sido usados en juntas de pavimentos para producir en correspondencia con ellas un buen drenaje de bases y subbases. Esto es muy conveniente hacerlo cuando debido a la relación entre pendientes longitudinales y transversales, el agua tiende a ir paralela al eje del camino.

También se utilizan cuando se pasa de sección en terraplén a sección de corte y es de esperar un flujo de agua desde la zona de corte a la de terraplén, se usan drenes transversales de agua.

### **Bases Permeables.**

Es una capa de pavimento cuyo ancho y longitud (en la dirección del flujo) son mucho mayores que su espesor. Si están correctamente diseñadas controlan eficazmente los problemas de infiltración y escurrimiento de agua.

Una base permeable debe tener un espesor adecuado y estar construida con un material de alto coeficiente de permeabilidad. Debe poseer una salida

bien diseñada para las aguas colectadas y en muchos casos deben estar rodeadas con capas de filtro para protegerlas frente al taponamiento de capas vecinas más finas.

#### **Sistema de Pozos.**

Los pozos verticales se usan para controlar el caudal de agua dentro del terreno y aliviar las presiones de poros en taludes cuya estabilidad se encuentre seriamente comprometida. En este caso los pozos deben ser bombeados para rebatir el nivel freático durante la construcción o simplemente permitir el flujo para aliviar presiones artesianas. A veces tienen algún sistema colector que permite su drenaje libre hacia lugares más bajos. En este caso están combinados con túneles, drenes horizontales, etc.

### **2.4.5 MATERIAL PARA DRENAJE.**

En todo diseño de un sistema de drenaje, los materiales deben ser seleccionados cuidadosamente para asegurar que el drenaje se vea favorecido. Todos los componentes de un sistema de drenaje deben funcionar en armonía para que cumplan con los objetivos propuestos en el diseño. Los componentes son aquellos que interceptan el agua, los que colectan a un punto determinado y los que la evacúan del paquete estructural.

#### **Caños Colectores.**

Pueden ser hechos de varios materiales:

- Cerámico.
- Concreto.
- Plástico con fibra bituminosa.
- Metal corrugado.
- Polietileno corrugado.
- PVC.

Las longitudes son muy variables, 0.3 a 0.9m. para cerámicos. En este caso pueden ir no perforados y el agua e capta a través de las juntas abiertas. Los metálicos u de fibras de 2.5m. ó más. Los de plástico corrugado vienen en longitudes de 60 a 90m.

### **Materiales de filtro.**

Cuando se usan materiales de granulometría muy abierta para drenes transversales, longitudinales, bases permeables y pozos de drenaje, se hace necesario el empleo de materiales de filtro. Sus funciones son:

- Prevenir el movimiento de partículas de suelo que pueden migrar y taponar el dren.
- Proveer material en las vecindades de los vacíos del dren que sea más permeable que el suelo circundante.
- Proveer un buen apoyo para el dren.
- Estabilizar el suelo sobre el que se apoya el dren.

En el caso de tener tuberías de drenaje, el material circundante debe cumplir determinadas condiciones granulométricas con respecto a las aperturas de los tubos. Estos son:

- *Para tuberías con ranuras rectangulares:*

$$\frac{D_{85}^F}{B} > 1.2 \quad (2.36)$$

*Siendo :*

$D_{85}^F$  : Diámetro equivalente a "pasa 85%" para el filtro.

$B$  : Ancho de la ranura.

- *Para tuberías con orificios circulares:*

$$\frac{D_{85}^F}{D} > 1 \quad (2.37)$$

Siendo :

$D_{85}^F$  : Diámetro equivalente a "pasa 85%" para el filtro.

$D$  : Diámetro de la ranura.

De acuerdo a Cedergreen, el Bureau of Reclamation aconseja:

$$\frac{D_{85}^F}{\text{Máx. Abertura del Tubo}} > 2 \quad (2.38)$$

### **Filtros de transición.**

Se colocan para evitar la saturación de finos de una capa drenante y para asegurar una buena permeabilidad en el filtro. Para cumplir estas condiciones la granulometría de ambas capas debe cumplir lo siguiente:

Según Terzaghi:

$$\frac{D_{15M}^F}{D_{85}} < 5 \text{ para evitar arrastres de finos.}$$

$$\frac{D_{15M}^F}{D_{15}} > 5 \text{ para asegurar una buena permeabilidad en el filtro.}$$

Esto puede expresarse también así:

$$5D_{15}^M < D_{15}^F < D_{85}^M \quad (2.39)$$

Donde:

F: Se refiere a la capa de filtro.

M: Se refiere a la capa situada antes del filtro.

Además se busca que ambas curvas granulométricas sean lo más paralelas posibles. Esto se logra haciendo cumplir esta ley:

$$\frac{D_{50M}^F}{D_{50}} < 25 \text{ según el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos.}$$

Estas ecuaciones se aplican al filtro y capa de transición, en este caso “F” corresponde al filtro y “M” a la capa de transición. Cuando se aplican a la capa de transición y al terreno natural, “F” corresponde a la capa de transición y “M” al terreno natural.

### **Filtros de fábrica.**

Se usan cuando es difícil conseguir materiales de granulometría adecuada para construir las capas de transición. En este caso se emplean membranas artificiales que tienen aberturas que cumplen las mismas propiedades hidráulicas que las capas de transición.

Las más comunes son los geotextiles formados por fibras no tejidas. En este caso se habla del AOS (Tamaño de Apertura Aparente) que es el tamaño de poros que supera al 95% del tamaño de los poros del geotextil. Este tamaño se le llama también  $P_{95}$ . Las condiciones granulométricas a cumplir son:

$$P_{95} < BD_{85M} \quad (2.40)$$

“M” se refiere al suelo natural, si éste tiene un porcentaje en el tamiz N° 200 < 50%:

$$\text{Cuando } C_U < 2 \text{ ó } C_U > 8 \quad B = 1, \text{ siendo } C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$\text{Cuando } 2 < C_U < 4 \quad B = 0.5C_U$$

$$\text{Cuando } 4 < C_U < 8 \quad B = \frac{8}{C_U}$$

Si el material tiene un porcentaje en el tamiz N° 200 > 50%:  $B=1.8$ .

Además  $P_{95} > 3D_{15}^M$ , para evitar el taponamiento del geotextil.

Con respecto al material de filtro se debe cumplir sólo esa condición de Terzaghi:

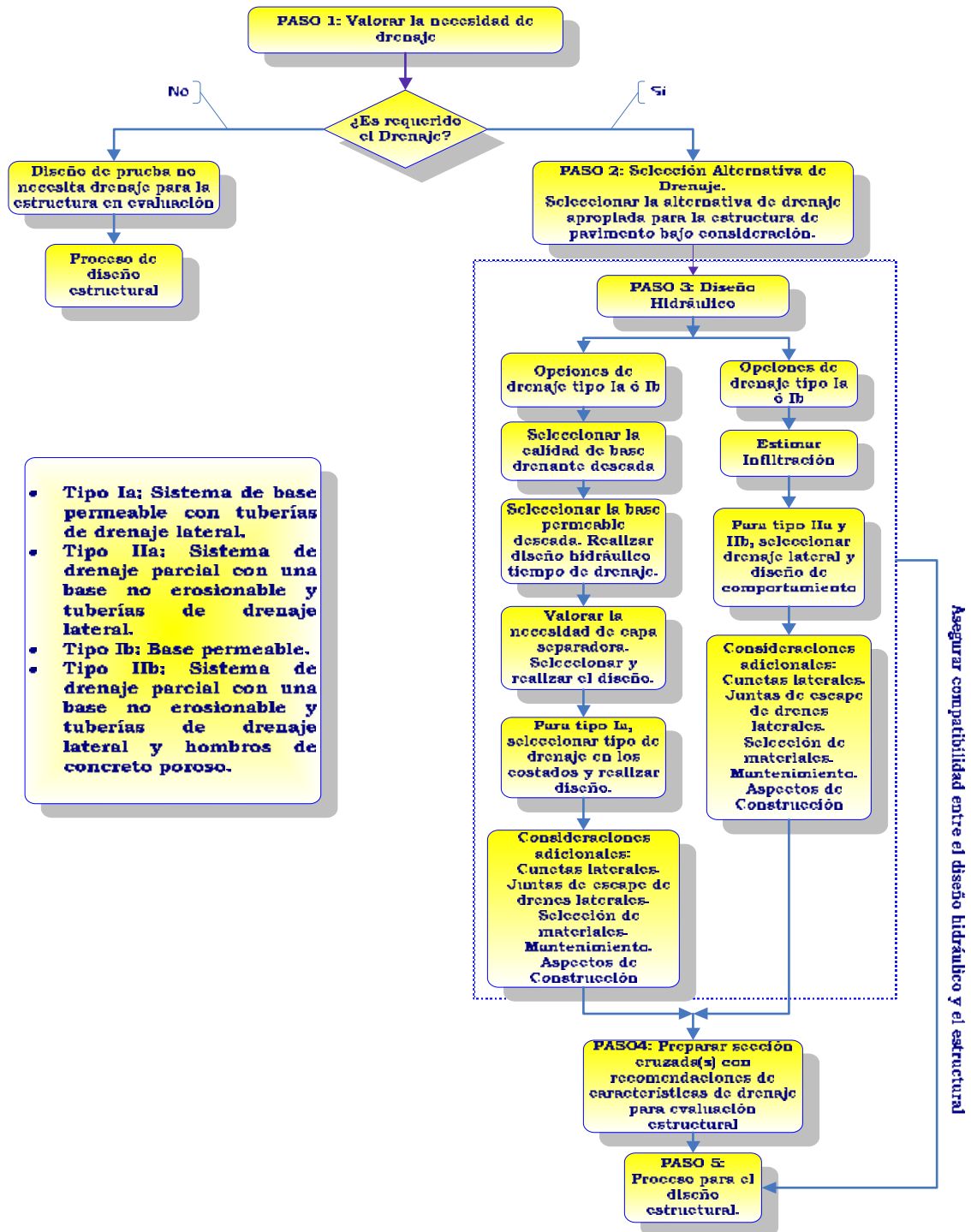
$$\frac{D_{15}^F}{P_{15}} > 5, \text{ dado que el geotextil no puede sufrir erosión.}$$

#### **2.4.6 DISEÑO DE DRENAJE SISTEMÁTICO PARA LA SUPERFICIE.**

El drenaje de la superficie debería incrementar la vida del pavimento y disminuir la probabilidad de falla, pero también incrementa el costo inicial de construcción. Así, como primer paso, la necesidad de drenaje debería ser fijado para determinar si el drenaje será viable para la condiciones del sitio dadas y características de diseño propuestas. Si el drenaje no es considerado viable desde este análisis, no es necesario considerarlo en el diseño estructural. Por otro lado si existe la necesidad importante del subdrenaje, las mejores alternativas deberían ser seleccionadas y propiamente diseñadas desde un punto de vista hidráulico y estructural. Se debe poner atención en la selección de los materiales, construcción y mantenimiento de los sistemas de drenaje lo cual es importante para la obtención de periodos largos de sistemas de drenajes exitosos.

El Esquema 2.4 presenta un sistema aproximado para considerar la necesidad y el desarrollo de diseño del drenaje, últimamente para guiar la preparación de secciones transversales con características de drenajes adecuadas que pueden ser evaluadas para deterioros estructurales usando el Método Mecanicista-Empírico. Se presenta a continuación los pasos para llevar a cabo el diseño de drenaje para la nueva guía AASHTO 2002.





**Esquema 2.4. Drenaje sistemático de la superficie considerado pavimentos nuevos ó reconstruidos.<sup>71</sup>**

<sup>71</sup> Parte 3, Capítulo 1: Drainage. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 3.1.15.

***PASO1: Fijar la necesidad para el drenaje.***

Un paso importante en el proceso de diseño de pavimentos es identificar la necesidad del subdrenaje para las situaciones dadas del proyecto. El drenaje de la superficie es viable siempre y cuando hay un problema anticipado con la humedad. No hay un criterio universal para fijar la necesidad de drenaje subsuperficial, sin embargo, las siguientes preguntas básicas pueden ayudar a guiar la decisión a realizar:

- ¿Cuál es el anticipado nivel de tráfico pesado? (el tráfico pesado es un factor primario para determinar la necesidad de subdrenaje).
- ¿Son las condiciones climáticas significativas tal como el agua el cual podría infiltrarse en el pavimento y mantenerlo saturado por periodos largos?
- ¿Son los materiales de pavimentos susceptibles al daño relacionado a la humedad? ¿Hay alguna característica en el diseño de pavimentos que podría aliviar algunos problemas relacionados con la humedad?
- ¿Es el sistema de drenaje de la superficie el método más efectivo para minimizar los deterioros relacionados a la humedad en el pavimento?
- ¿Se le dará mantenimiento periódicamente el sistema de drenaje?

Idealmente la necesidad del subdrenaje debería estar basada en un análisis costo-beneficio en el que el beneficio (extensión de vida, reducción de mantenimiento) debería ser mayor que el costo añadido de instalación y mantenimiento. En la ausencia de un proceso universal aceptable para el desarrollo del análisis, puede ser usado la práctica de la Tabla 2.40. El proceso esta basado primordialmente en las condiciones del sitio que afectan la decisión de la realización del proceso. Además similar al programa LTPP, se utilizaron los siguientes criterios para definir las cuatro regiones climáticas siguientes:

- Clima húmedo: precipitación anual > 508 mm (20 pulg.).
- Clima seco: precipitación anual ≤ 508 mm (20 pulg.).
- Clima helado: índice de congelamiento anual > 83°C-días (150° F-días)
- Clima no helado: índice de congelamiento anual ≤ 83°C-días (150° F-días).

**PASO 2: Selección de alternativas de drenaje.**

Después de determinar el drenaje subsuperficial necesario, el diseñador debe seleccionar el tipo de drenaje que será el más efectivo para el diseño del pavimento dado. El tipo de drenaje subsuperficial requerido debería estar basado en las necesidades de las cargas contempladas en la situación del diseño dado. Algunas opciones factibles de subdrenaje para varios tipos de pavimentos son discutidos a continuación:

*Pavimentos de HMA convencionales de esfuerzo profundo.*

Cuando las condiciones del sitio son tales que el drenaje es “recomendado” de acuerdo a la Tabla 2.40, las siguientes opciones son disponibles para este tipo de pavimento:

- Un sistema de base permeable con tubería de drenes laterales (Tipo Ia). La base permeable podría ser una capa de ATPB (base permeable tratada con asfalto) ó de CTPB (base permeable tratada con cemento). Debe ser provista también una capa separadora. Una base permeable (Tipo Ib) podría ser considerada para pendientes planas (menor a 0.5 por ciento de la pendiente longitudinal) ó en las curvas cuando el mantenimiento de los costados pueden ser seguros.
- Un sistema de drenaje parcial con una base no erosionable y con tubería de drenes de laterales (Tipo IIa).

**Tabla 2.40. Evaluación de la necesidad del drenaje subsuperficial en pavimentos nuevos o reconstruidos.<sup>72</sup>**

Condición Climática	Cantidad de vehículos mayores de 12 millones a 20 años en el carril de diseño			Cantidad de vehículos entre 2.5 y 12 millones a 20 años en el carril de diseño			Cantidad de vehículos menores de 2.5 millones a 20 años en el carril de diseño		
	$K_{\text{subrasante}} < 3$ m/día	$K_{\text{subrasante}} 3 \text{ a } 30$ m/día	$K_{\text{subrasante}} > 30$ m/día	$K_{\text{subrasante}} < 3$ m/día	$K_{\text{subrasante}} 3 \text{ a } 30$ m/día	$K_{\text{subrasante}} > 30$ m/día	$K_{\text{subrasante}} < 3$ m/día	$K_{\text{subrasante}} 3 \text{ a } 30$ m/día	$K_{\text{subrasante}} > 30$ m/día
Húmedo - Helado	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>NR</i>	<i>NR</i>
Húmedo - No helado	<i>R</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>NR</i>	<i>NR</i>
Seco - Helado	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>NR</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>NR</i>	<i>NR</i>	<i>NR</i>	<i>NR</i>
Seco - No helado	<i>F</i>	<i>NR</i>	<i>NR</i>	<i>NR</i>	<i>NR</i>	<i>NR</i>	<i>NR</i>	<i>NR</i>	<i>NR</i>

- **$K_{\text{subrasante}}$** : Permeabilidad de la subrasante (este término es usado como un sustituto para los tipos de suelo) como usos determinados.
- **R**: Alguna forma de drenaje u otra característica de diseño son **recomendados** para combatir los problemas de humedad.
- **F**: Es **factible** proveer un subdrenaje. Los siguientes factores adicionales se necesitan para ser considerado en la decisión de hacerlo factible: (1) Comportamiento y experiencia del pavimento en el pasado en condiciones similares ó alguna de ellas. (2) Costo diferencial e incremento anticipado en la vida de servicio a través del uso de varias alternativas de drenaje. (3) Durabilidad anticipada y/o erosionabilidad en materiales de pavimento.
- **NR**: Drenaje subsuperficial **no es requerido** en estas condiciones

<sup>72</sup> Parte 3, Capítulo 1: Drainage. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 3.1.16.

Cuando las condiciones del sitio son tales en el que es “factible”, la provisión de un espesor de base de agregado denso puede ser considerada en adición a las dos opciones listadas arriba.

*Pavimentos de HMA de espesor completo.*

Cuando las condiciones del sitio son tales que son tales que el drenaje en la Tabla 2.40 aparece como “recomendado”, las siguientes opciones son disponibles para este tipo de pavimento:

- Un sistema de base permeable con tubería de drenaje en los costados (Tipo Ia). La base permeable debe ser de ATPB y la capa separadora de agregado debe ser una capa tratada de asfalto para satisfacer la definición de pavimento de HMA con profundidad completa. Una base permeable visible (tipo Ib) podría ser considerada para pendientes suaves (con menos del 0.5 por ciento de pendiente longitudinal) ó en las curva cuando el mantenimiento del drenaje de los costados sean seguros.
- La instalación de tuberías de drenaje en los costados a lo largo de la estructura con espesor completo de HMA (Tipo IIa). La capa densa de HMA no erosionable podría ser asumida para el proceso de diseño.

Cuando las condiciones del sitio son tales que la provisión de drenaje es “factible”, cada una de las opciones mencionadas anteriormente pueden ser aceptables.

*Junta simple en pavimentos de concreto.*

Cuando las condiciones son tales que el drenaje es “recomendado” de acuerdo a la Tabla 2.40, están disponibles las siguientes opciones para este tipo de pavimento:

- Un sistema de base permeable con tuberías de drenaje lateral (Tipo Ia). La base permeable puede ser un ATPB ó un CTPB

cuando el nivel de tráfico de vehículos es alto (mayor a 12 millones a 20 años de aplicaciones en el carril de diseño). Una base permeable visible (Tipo Ib) podría ser considerada para pendientes suaves (con menos del 0.5 por ciento de pendiente longitudinal) ó en las curvas cuando el mantenimiento de los costados descubiertos pueden ser seguros.

- Un sistema de drenaje parcial con una base no erosionable y tuberías de drenaje lateral.
- Un sistema de drenaje parcial con una base no erosionable, tuberías de drenaje lateral y hombros de concreto poroso.

Cuando las condiciones del sitio son tales que la provisión de drenaje es “Factible”, un espesor de base de agregado denso graduado podría ser considerado con las opciones mencionadas anteriormente.

### ***PASO 3: Diseño Hidráulico.***

Los procesos involucrados en el diseño de los componentes principales de un sistema de base permeable, son presentados continuación. Los principales tópicos de discusión son el diseño de bases permeables, diseño de capa separadora y diseño de drenaje lateral. Los aspectos sobresalientes del diseño hidráulico para uno de estos componentes de drenaje serán discutidos a continuación. El programa de computadora de la FHWA llamado DRIP, está disponible como parte del software que acompaña a la Guía de Diseño, puede desarrollarse el diseño hidráulico de estos componentes en forma rápida y segura.

#### *Diseño hidráulico de bases permeables.*

Las propuestas recomendadas para el comportamiento del diseño hidráulico de bases permeables están basadas en el proceso de tiempo de drenaje. Este proceso está basado en las siguientes presunciones:

- El agua se infiltra en el pavimento hasta que la base permeable esté saturada.
- El derramamiento en exceso no entrará en la sección de pavimento después que esté saturada.
- Después que un evento de lluvia cese, el agua es drenada a los costados con las cunetas ó drenes de tormentas a través de drenes laterales ó en forma descubierta.

El principal parámetro de interés en el procedimiento del tiempo de drenaje es el período de tiempo requerido para drenar la base permeable a un nivel de humedad preestablecido. El diseño estándar de AASHTO basado en este parámetro califica la calidad de drenaje de la base permeable desde “Excelente” a “Pobre”. La Tabla 2.41 muestra la guía para seleccionar la calidad de la base permeable fundamentado en este método.

**Tabla 2.41. Calificación de la calidad de drenaje de bases permeables basado en el tiempo que toma en drenar el 50% del agua drenable <sup>73</sup>**

<b>Calidad de Drenaje</b>	<b>Tiempo de Drenaje</b>
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Permisible	7 días
Pobre	1 mes
Muy Pobre	No drena

El objetivo del drenaje es remover toda el agua drenada en un período corto de tiempo. Para la mayoría de autopistas, avenidas y calles principales, se espera drenar el 50 por ciento del agua aproximadamente en dos horas.

Las entradas para el proceso de diseño incluyen diseño de pavimento básico y propiedades de los materiales tales como geometría de la carretera (pendientes transversales, pendiente longitudinal, ancho de carril), espesor de la base permeable, porosidad y efectos de porosidad de los agregados de la

<sup>73</sup> Parte 3, Capítulo 1: Drainage. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 3.1.20.

base permeable y permeabilidad de los materiales de la base permeable. Utilizando estas entradas, el parámetro del tiempo de drenaje es calculado para un grado de drenaje (U) dado. El diseño final es entonces elegido basado en esta información.

*Sensibilidad del proceso del tiempo de drenaje y recomendaciones de diseño de la base permeable.*

Para todas las entradas de datos que van dentro del cálculo en el diseño, la permeabilidad tiene mayor influencia que el espesor de la base permeable en los parámetros del tiempo de drenaje. El tiempo requerido para drenar una base permeable decrece exponencialmente con el incremento en la permeabilidad. Por lo tanto, la relación costo-efectividad reduce el tiempo para drenar, es recomendado que la permeabilidad sea incrementada para la reducir la cantidad de finos (es requerido para las bases permeables un mínimo de 1000 pies/día). Sin embargo, se debe tomar importancia al mantener una adecuada estabilidad en la base permeable cuando se efectúa la reducción de finos. Para garantizar una estabilidad razonable, el valor mínimo del coeficiente de uniformidad ( $C_U$ ) requerido para una base permeable sin tratar, es de 3.5. Si esto no se puede lograr, la base debería ser tratada con asfalto ó cemento Pórtland. Más adelante, los niveles más altos de tráfico también justifican el uso de una base permeable tratada.

Debido a que el espesor no tiene un efecto significativo en el parámetro del tiempo de drenaje, el valor de 4 es recomendado para bases permeables. Este espesor debería proveer una conducción hidráulica adecuada y se presta a la auto-compactación sin segregación.

*Diseño de capa separadora.*

Los resultados relacionados en el diseño de dos tipos de capas separadoras (agregado denso y geotextil) se discutirán a continuación.



*Diseño de capas separadoras de agregados.*

La capa separadora de agregado debe satisfacer los requerimientos de separación y uniformidad en la separación de la interfase capa/subrasante y en la interfase capa/base permeable. El primer criterio se asegura de que la capa separadora actúe como filtro, previniendo la mezcla interna de materiales diferentes y el segundo criterio proveer una guía para desarrollar una base de agregado bien graduada. La capa separadora debería servir también como una barrera impermeable para prevenir el agua sobre la base permeable desde la subrasante (la permeabilidad deseada es menor de 15 pies/día).

Los siguientes requerimientos adicionales son necesarios para garantizar que la capa separadora de agregado denso no tenga muchos finos y esté bien graduada:

- El porcentaje de material que pasa la malla No.200 no debe exceder del 12 por ciento.
- El coeficiente de uniformidad debe ser mayor a 20, preferentemente mayor de 40.

Los resultados de estos chequeos son típicamente ploteados en una carta graduada para desarrollar un diseño sobre el cual la capa separadora de agregado debe pasar. Un diseño detallado de la capa separadora de agregado puede ser realizado usando el programa DRIP disponible como parte del software que acompaña la Guía de Diseño.

Cuando son usadas capas separadoras estabilizadas, los chequeos de graduación mencionadas arriba no son necesarias. Sin embargo, se debería observar que cuando se utilizan capas estabilizadas en esfuerzos altos, cualquier grieta de contracción que aparezca en estas capas podría resultar que el material de la subrasante se mezcle en las bases permeables.

*Diseño de capas separadoras de geotextiles.*

El diseño de geotextiles para la filtración es básicamente el mismo diseño para las capas separadoras. Un geotextil es similar a un suelo que tiene vacíos (poros) y partículas (filamentos y fibras). Sin embargo, debido a la forma y el arreglo de los filamentos y la compresibilidad de la estructura con geotextil, la relación geométrica entre filamentos y vacíos es más compleja que en el suelo. Tres simples conceptos de filtración son usados en el proceso de diseño:

1. Si el tamaño de los poros más largos en el filtro de geotextil es más pequeño que la partícula más larga de suelo, el suelo será retenido por el filtro.
2. Si las aberturas más pequeñas en el geotextil son suficientemente largas para permitir que partículas más pequeñas de suelo se introduzcan a través del filtro, entonces el geotextil no cubrirá ó formará trabazón.
3. Un número largo de aberturas debería estar presente en el geotextil así el apropiado flujo puede ser mantenido aún si algunos poros abiertos se obstruyan más tarde.

Los criterios importantes del diseño que se considerarán en especificar las características del geotextil como una capa separadora son divididos en cuatro categorías, como son:

- Retención de suelo.
- Permeabilidad.
- Trabazón.
- Durabilidad y resistencia.

La retención y trabazón del suelo son criterios satisfactorios de diseño en geotextiles seleccionando un apropiado valor de Tamaño de Abertura Aparente (AOS) para la fabricación del geotextil y para la selección de un número mínimo de abertura de los poros.

El diseño de la capa separadora de geotextil puede ser desarrollada usando el programa DRIP disponible con el software de la Guía de Diseño. En ausencia de detalles de diseño se puede utilizar la norma AASHTO M 288, “Especificaciones Estándar para Geotextiles”.

Esta especificación provee los máximos valores de AOS en relación al porcentaje del suelo in situ pasando por la malla No. 200 y establece los esfuerzos mínimos deseables y propiedades de resistencia.

#### Diseño de drenaje lateral.

El diseño hidráulico de drenaje lateral es básicamente el proceso de los cuatro pasos mencionados a continuación:

1. Determinar la clasificación de descarga del pavimento.
  - a. Infiltración aproximada en el pavimento (fundamentado en estimaciones de infiltración).
  - b. Permeabilidad aproximada de la base (fundamentado en aproximaciones de flujo profundo).
  - c. Aproximación del tiempo de drenaje. (fundamentado en el tiempo requerido para una cantidad requerida de agua a drenar de una base permeable saturada).
2. Determinar la capacidad de flujo del dren lateral.
  - a. Tubería de drenaje lateral.
  - b. Geocomposición del dren lateral.
3. Determinar el espaciamiento de salida.
  - a. Para tuberías de drenaje lateral, el espaciamiento de salida máximo no debe de exceder de 75 m para propósitos de mantenimiento.
4. Determinar el ancho de zanja.

El objetivo final del diseño de drenaje lateral es determinar el espaciamiento de salida basado en la anticipación de descarga del pavimento y en la capacidad de flujo de los drenes laterales.

Hay tres opciones para determinar la descarga del pavimento, como es indicado anteriormente (capas separadoras, bases permeables y drenes laterales). Cuando se diseña el sistema de drenaje Tipo Ia, la recomendación es usar la aproximación del tiempo de drenaje para determinar la clasificación la tasa de descarga del pavimento. Cuando se diseñan los sistemas Tipo Ila ó I Ib, la infiltración en el pavimento puede ser usada para la clasificación de descarga estimada del pavimento.

Las tuberías con un diámetro mínimo de 4 pulg. son requeridos para tuberías de drenaje lateral longitudinal y salidas. Esto permite un fácil acceso de monitoreo y equipamiento para el interior de las tuberías. Además, un espaciamiento máximo de salida de 250 pies es también recomendado para facilidad de actividades de mantenimiento tales como limpiar con agua y una varilla ó de remoción y reemplazo. Las salidas dobles con paredes principales son recomendadas también. Los requerimientos de mantenimiento para diámetros de tuberías y espaciamiento de salidas a menudo satisfacen los requerimientos del diseño hidráulico.

***PASO 4: Preparación de secciones transversales de pavimentos con características de drenaje apropiadas.***

En este paso, todas las opciones de drenaje viables para el sitio dado y restricciones de diseño son resumidos para la evaluación estructural. El diseñador puede seleccionar la opción más viable u opciones basadas en disponibilidad de materiales, análisis económico, experiencia constructiva, esfuerzos en proyectos de mantenimiento u otra experiencia local para la evaluación estructural. La preparación del detallado de las secciones transversales de la estructura de pavimento (el cual incluye varias

presunciones hechas en el proceso de diseño hidráulico con consideraciones a los tipos de capas, espesores, arreglo relativo, geometría del pavimento, tuberías inclinadas, etc.) ayudará el proceso de análisis estructural.

***PASO 5: Comportamiento del diseño estructural.***

Los detalles de la sección transversal de pavimento del Paso 4 ayudarán en la preparación de los datos de entradas para configurar un diseño de prueba para la evaluación estructural. Se debe tener cuidado durante el proceso de diseño estructural para asegurar que la solución del diseño final coincida con las presunciones hechas en el proceso de diseño hidráulico particularmente con las consideraciones de los siguientes puntos:

- Espesores asumidos de capas separadoras permeables de agregados.
- Presunciones de las características del diseño (hombros amarrados ó barras de dovelas para JPCP) usado en las necesidades de evolución del drenaje (esto juega un papel importante en determinar la infiltración de la humedad dentro de la estructura de pavimento durante el diseño estructural).
- Los materiales seleccionados para capas de drenaje con granulometría abierta y capas separadoras durante el diseño hidráulico (esto juega un papel importante en la determinación de los ajustes estacionales de la rigidez en las capas de pavimento).
- Presunciones de la geometría del pavimento (acompañado con las propiedades de los materiales los cuales son usados en el cálculo de la estimación del tiempo de drenaje).

## **2.5 HOMBROS**

### **2.5.1 CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS.**

Además de servir como áreas de estacionamiento de emergencia, los hombros prestan soporte lateral al carril de la vía de la estructura de pavimento, provee un área de maniobras e incrementa la visibilidad sobre curvas horizontales.

Los hombros varían en ancho desde los dos pies en caminos rurales hasta 12 pies o más en carreteras donde pueden ser usados como vías de emergencias para el tráfico ó durante el mantenimiento de vías regulares de tráfico.

Los hombros deben ser rasantes con la superficie de la vía y con el borde del carril de tráfico. Todos los hombros deben ser lo suficientemente inclinados para drenar el agua fuera de la vía. Los hombros de concreto asfáltico y de concreto hidráulico deben tener una inclinación del 2 al 6%, grava o piedra triturada del 4 al 6% y los hombros de grama alrededor del 8%.

Es aconsejable el uso de hombros pavimentados. Sin embargo, el costo adicional de este diseño no se puede garantizar en todos los proyectos. En estos casos, se ha dado una gran consideración el uso de hombros de carriles ensanchados. Esto reduciría significativamente el esfuerzo en los bordes, esfuerzos de tensión y deflexiones. Esto incrementa la capacidad de acarrear cargas, seguridad y reduciría el costo de mantenimiento.

## 2.5.2 CARGAS DE TRÁFICO SOBRE LOS HOMBROS.

El espesor de diseño de los hombros debería estar basado en la magnitud y frecuencia de cargas a las cuales los hombros serán sujetos. Sin embargo, hay un largo número de variables que afecta el número de cargas que los hombros recibirán. La invasión de vehículos, el uso de hombros como carriles temporales durante rehabilitación y la incorporación de hombros como carriles adicionales tienen un significado impactante en el desarrollo de hombros. Además, se deben considerar en el diseño el gran número de vehículos que a menudo se estacionan por las noches sobre hombros y a las cargas estáticas. El diseñador debería considerar un comportamiento de hombros sobre secciones similares, estimando el uso de tráfico sobre los hombros y planes futuros para rutas cuando se seleccione una estructura de pavimento para hombros.

Las siguientes recomendaciones deberían ser consideradas en el diseño de hombros:

### **General:**

1. Los hombros deberían ser construidos del mismo material de la estructura principal de pavimento para reducir problemas de mantenimiento sobre la junta con el hombro y la estructura principal.
2. Deberían ser usados el mismo tipo de materiales y espesor general de base y subbase bajo los hombros y la estructura principal, especialmente altos volúmenes. Se debe tomar cuidado en el diseño de la base y subbase en pendientes cruzadas en hombros de concreto para evitar empozamientos de agua bajo la junta de vía/hombro y en los bordes del hombro. Los problemas son a menudo encontrados en estos lugares debido a los cambios en el tipo de material, resultando un soporte no uniforme ó con

diferentes características de drenaje. Los materiales de la base y subbase deben ser propiamente permeables para fomentar el flujo del agua fuera del pavimento y prevenir la acumulación de agua.

3. Permitir el uso de agregado grueso para la base teniendo más del 6% menos de material en la malla N° 200 para proporcionar al menos una filtración suave de agua fuera de la base para minimizar el bombeo y el bloqueo del sistema de drenaje de hombros.
4. Las autopistas en el área urbana y otras rutas en las que circulan altos volúmenes de vehículos, los hombros deberían ser construidos de la misma sección estructural como la del pavimento principal para asegurarse de una adecuada capacidad de carga en la interfase entre el pavimento y el hombro para prever facilidad y economía en la construcción, y así prevenir condiciones de empozamiento bajo el pavimento. Esto permitirá a los hombros ser usados como vías temporales durante los procesos de rehabilitación ó reconstrucción.
5. El número esperado de vehículos estacionados sobre los hombros debería ser considerado en el diseño de hombros. Esto ocurre a menudo en las noches donde no hay intercambio de pendientes y áreas de descanso y que puedan causar daño si los hombros no son diseñados para estas cargas. Nótese que esta carga estática puede ser aproximadamente por la entrada de una carga de baja velocidad siempre que el límite de material asfáltico es usado en la estructura de hombros.

**Concreto hidráulico:**

1. Las losas ensanchadas de concreto hidráulico han sido mostradas para ser un diseño efectivo. Como recomendación previa, el ensanchamiento máximo es de 2 pies más allá de la faja



del borde regular del carril. El ancho de la losa de concreto hidráulico para hombros no debería ser mayor que 14 pies para minimizar la posibilidad de grietas longitudinales.

2. Como una opción para autopistas urbanas, puede ser considerado un hombro disminuido gradualmente. Adyacente a la estructura principal, las losas de pavimento hidráulico para hombros deberían ser del mismo espesor que la estructura principal de pavimento para permitir la colocación de las barras de amarre a la mitad del espesor de la losa y proporcionar soporte estructural a la invasión de la ruedas del vehículo. La losa del hombro debe estar entonces estrechada no menos de 6 pulg. Afuera del borde.
3. Los hombros de concreto deberían ser amarrados a la estructura principal con un apropiado espaciado y barras de amarre graduadas. El amarre del hombro de concreto mantiene firmemente a la junta y da una buena transferencia de carga el cual reducirá esfuerzos en el pavimento y deflexiones en los bordes. El amarre del hombro de concreto darán lugar a un mejor confinamiento, mayor facilidad para sellar la junta longitudinal el cual reducirá la filtración del agua a través de la estructura de pavimento. Las barras de amarre son necesarias entre la estructura de pavimento y los hombros para mantener la junta longitudinal firme y proveer la transferencia necesaria de carga y así evitar aberturas de juntas y problemas de seguridad.
4. Los procesos de diseño tradicionales (Guía de Diseño AASHTO 1993) son inadecuadas en modelar esfuerzos y tensiones en barras de amarre. Por lo tanto, las recomendaciones para las barras de amarre deberían ser basadas en prácticas satisfactorias de agencias de tránsito. Las barras de amarre con un diámetro de 5/8 pulg. son típicamente colocadas a cada 30 pulg. con una profundidad de la mitad del espesor de la losa. Si las barras de

amarre son dobladas por algún motivo necesario en el proceso de la construcción y luego son nuevamente enderezadas, es recomendado utilizar acero de grado 40 como la mejor opción para este proceso de doblado de las barras. Cuando se usa acero de grado 40, se deben usar barras de amarre de 5/8 pulg. de diámetro por 30 pulg. de longitud. Cuando se usa acero de grado 60, se deben usar barras de amarre de 5/8 pulg. de diámetro por 40 pulg. de longitud ó 1/2 pulg. de diámetro por 32 pulg. de longitud. Algunas instituciones usan barras de 3/4 pulg. de diámetro con 30 pulg. de espaciamiento para proporcionar la mejor capacidad de mantener la junta unida y una buena transferencia de carga para el tráfico pesado.

5. Las barras de amarre no deberían ser colocadas dentro de 15 pulg. de las juntas transversales. Cuando se usan barras de amarre mayores a las 32 pulg. con juntas sesgadas (oblicuas), las barras de amarre no deberían estar colocadas dentro de 18 pulg. de las juntas transversales.
6. Otra opción es utilizar juntas con pernos de gancho cuando se construyen los machimbres. Algunas instituciones especifican dos piezas de barras de amarre roscadas para evitar la flexión de una barra. Una parte es molde dentro de la losa de concreto hidráulico y la otra parte se rosca en la primera parte después de pavimentar.
7. Las juntas transversales de la estructura principal deberían ser extendidas continuamente a través del hombro. Todas las juntas transversales del hombro deben ser aserradas a una profundidad de un tercio del espesor de la losa.
8. Cuando las juntas de los hombros de concreto son usados adyacentes a la estructura principal con refuerzo continuo, la junta del hombro debería ser aserrada a intervalos de cada 15 pies. La junta simple del hombro no debería ser construida en

forma íntegra con refuerzo continuo. El corte transversal con sierra en los hombros construidos íntegramente propagaran grietas a través de la estructura principal de CRCP.

9. Los machimbros no son recomendables para usar debido a dificultades en la construcción. Definitivamente no deberían ser usados para pavimentos menores de 9 pulg. de espesor, puede ocurrir cortante de la superficie y el fondo de la losa. Si es usado en pavimentos de 9 pulg. de espesor o mayor, el machimbre debería ser colocado a una profundidad de la mitad del espesor de la losa para asegurar un máximo esfuerzo. Es esencial la apropiada consolidación del concreto arriba y abajo del machimbre y la junta debe ser amarrada con acero de refuerzo como recomendación previa.

**Concreto asfáltico:**

1. Si no es usado el pavimentado con sobreancho, la consideración de hombros es dado a la anchura del material de pavimentado de concreto asfáltico para reducir condiciones de carga en los bordes. Aún una anchura pequeña (1 pie) puede ser beneficioso.
2. Para autopistas urbanas y vías rápidas, se puede garantizar una sección estructural menor que la principal para los hombros. Es recomendado que el espesor sea basado en una evaluación de costo de ciclo de vida y más allá del comportamiento bajo condiciones similares.
3. Es recomendado la colocación de mezcla de concreto asfáltico para ser usado en hombros de autopistas transitadas, según lo opuesto a tratamientos en superficies bituminosas, el cual no puede soportar las cargas y requerimientos de mantenimiento substancial.

# **CAPITULO 3**

## **ANÁLISIS ESTRUCTURAL, PREDICCIÓN DE DESEMPEÑO MECANICISTA-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS NUEVOS**

## **3.1 MODELOS DE COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL**

### **3.1.1 INTRODUCCIÓN**

Los pavimentos rígidos son construidos de cemento Pórtland. El desarrollo de los métodos de diseño para pavimentos rígidos no es tan dramático como el de pavimentos flexibles porque el esfuerzo por flexión en el concreto no ha sido considerado como tan notorio o mejor aún un factor de diseño.

Los pavimentos rígidos pueden ser analizados por la teoría de la placa en vez de la teoría de capas. La teoría de la placa es una versión simplificada de la teoría de las capas que asume la losa de concreto para hacer un medio de placa delgada con un plano antes de doblarse para continuar después de doblarse. Si la carga de la llanta en el interior de la losa, cada placa ó teoría de capas puede ser usada y podrían producir casi el mismo esfuerzo de flexión ó de tensión. Si la carga de la llanta es aplicada cerca de la orilla de la losa, es decir, menos de 2 pies (0.61 m.) de la orilla, solamente la teoría de la placa puede ser usada para pavimentos rígidos.

La razón por la cual la teoría de las capas es usada en pavimentos flexibles y no en rígidos es que el pavimento rígido es mucho más duro y la distribución de cargas es sobre un área mucho más amplia. La existencia de juntas en pavimentos rígidos también hace que la teoría de las capas sea inaplicable.

## 3.1.2 ESFUERZOS DEBIDO A CURVATURAS DE LA LOSA.

### 3.1.2.1 INTRODUCCIÓN.

Durante los días cuando la temperatura en la parte más alta de las losas es mayor que en el fondo, la parte más alta tiende a expandirse con respecto al eje neutro durante el cual el fondo tiende a contraerse. Sin embargo, el peso de la losa restringe la expansión y la contracción de la misma, de esta manera, el esfuerzo de compresión son inducidos en lo alto de la losa cuando el esfuerzo de tensión ocurre en el fondo. En la noche cuando la temperatura en la parte superior de la losa es inferior que en el fondo, la parte superior tiende a contraerse con respecto al fondo, así, el esfuerzo de tensión son inducidos en la parte superior y los esfuerzos de compresión en la parte inferior.

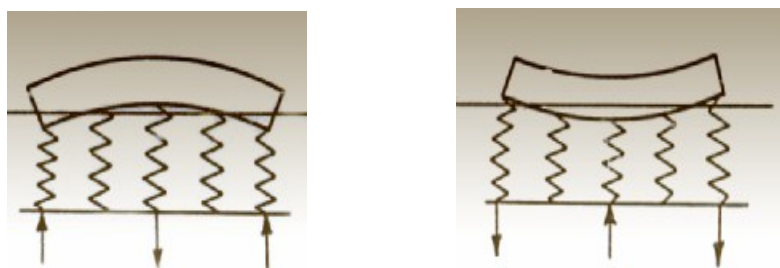


Figura 3.1. Curvatura debido al gradiente de temperatura.<sup>74</sup>

Otra explicación de los esfuerzos de curvatura puede ser hecha por la teoría de placa sobre un Winkler ó una fundación líquida. Una fundación Winkler se caracteriza por una serie de resortes anexos a las placas tal como en la figura 3.1. Cuando la temperatura en la parte alta de la losa es mucho mayor que en el fondo, la parte alta es más larga que el fondo y la losa se curva hacia abajo. Los resortes de los bordes de afuera están en compresión y

<sup>74</sup> Figura 3.1: Pavement Analysis and Design. Pág. 169.

empujan la losa hacia arriba donde los resortes en el interior están en tensión y halan la losa hacia abajo. Como resultado, en lo alto de la losa se encuentra en compresión y el fondo esta en tensión.

Cuando la temperatura en lo alto es más bajo que en el fondo, la losa se curva hacia arriba. Los resortes exteriores halan la losa abajo y donde los resortes interiores empujan la losa hacia arriba, así resulta en tensión en lo alto y compresión en el fondo.

Westergaard (1926) desarrollo ecuaciones para la determinación de los esfuerzos por curvatura en pavimentos de concreto basados en la teoría de la placa.

### 3.1.2.2 FLEXIÓN DE UNA PLACA INFINITA.

La diferencia entre una viga y una placa es que la viga esta esforzada en una dirección solamente, el cual la placa esta esforzada en dos direcciones. Para esfuerzos en dos direcciones, el esfuerzo  $\epsilon_x$  en la dirección  $x$  puede ser determinado por la Ley de Hooke generalizada:

$$e_x = \frac{S_x}{E} - n \frac{S_y}{E} \quad (3.1)$$

En donde  $E$  es el módulo elástico del concreto. El primer término de la derecha de la ecuación anterior indica el esfuerzo en la dirección  $x$  causado por una tensión en esa dirección, y el segundo término indica el esfuerzo causado por tensión en la dirección  $y$ . Similarmente:

$$e_y = \frac{S_y}{E} - n \frac{S_x}{E} \quad (3.2)$$

Cuando la placa ha flexionado en la dirección  $x$ ,  $\epsilon_y$  debería ser igual a cero debido a que la placa es tan ancha y muy confinada que no deberían

ocurrir esfuerzos a menos que muy cerca del borde igualando la ecuación anterior a cero se obtiene:

$$s_y = ns_x \quad (3.3)$$

Sustituyendo esta ecuación en la ecuación de  $\varepsilon_x$  y resolviendo para  $\sigma_x$  se obtiene:

$$s_x = \frac{Ee_x}{1-n^2} \quad (3.4)$$

La ecuación anterior indica el esfuerzo en la dirección de flexión, y la ecuación de  $\sigma_y$  indica el esfuerzo en la dirección perpendicular a la de flexión.

Cuando la flexión ocurre en las direcciones  $x$  y  $y$  como en el caso de curvatura por temperatura, los esfuerzos en ambas direcciones deben ser sobrepuesto para obtener el esfuerzo total. El máximo esfuerzo en una losa infinita debido a curvatura por temperatura pueda ser obtenida asumiendo que la losa esta completamente confinada en las direcciones  $x$  y  $y$ .

Sea  $\Delta t$  el diferenciadle temperatura entre la parte alta y baja de la losa y  $\alpha_t$  el coeficiente de expansión térmica del concreto. Si la losa es libre de moverse y la temperatura en lo alto de la losa es más mayor que en el fondo, en la cima de la losa se expandirá por un esfuerzo de  $\alpha_t \Delta t/2$  y en el fondo se contraerá con el mismo esfuerzo. Si la losa esta completamente restringida al movimiento, resultará un esfuerzo de compresión en la cima y un esfuerzo de tensión en el fondo. El máximo esfuerzo es:

$$e_x = e_y = \frac{\alpha_t \Delta t}{2} \quad (3.5)$$

De la ecuación 3.4, el esfuerzo en la dirección  $x$  debido a la flexión es:

$$s_x = \frac{E\alpha_t \Delta t}{2(1-n^2)} \quad (3.6)$$



La ecuación anterior es debida a esfuerzo en la dirección  $y$  causada por la flexión en la dirección  $y$ , de la ecuación 3.3 el esfuerzo en la dirección  $x$  causado por la flexión en la dirección  $y$  es:

$$s_x = \frac{nEa_t\Delta t}{2(1-n^2)} \quad (3.7)$$

El total de esfuerzos es la sumatoria de la ecuación 3.6 y 3.7 es:

$$s_x = \frac{Ea_t\Delta t}{2(1-n^2)}(1+n) = \frac{Ea_t\Delta t}{2(1-n)} \quad (3.8)$$

El análisis de arriba esta basado en la asunción de que la distribución de la temperatura es lineal a través de la profundidad de la losa. Esta es una aproximación a la realidad porque la distribución de temperatura real es altamente no lineal.

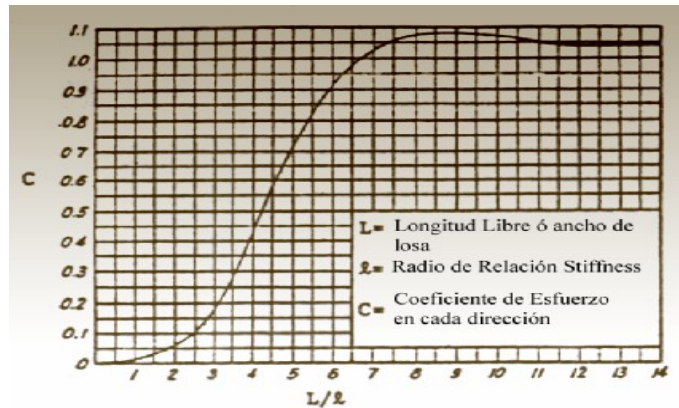
### 3.1.2.3 ESFUERZO DE CURVATURA EN LOSAS FINITAS.

Sea una losa finita con longitud  $L_x$  en la dirección  $x$  y  $L_y$  en la dirección  $y$ . el total de esfuerzo en la dirección  $x$  puede ser expresada como:

$$s_x = \frac{C_x Ea_t\Delta t}{2(1-n^2)} + \frac{C_y Ea_t\Delta t}{2(1-n^2)} = \frac{Ea_t\Delta t}{2(1-n^2)}(C_x + nC_y) \quad (3.9)$$

En donde  $C_x$  y  $C_y$  son los factores de corrección para una losa finita. El primer término de la ecuación anterior es el esfuerzo debido a la flexión en la dirección  $x$  y el segundo término es el esfuerzo debido a la flexión en la dirección  $y$ . En forma similar, el esfuerzo en la dirección  $y$  es:

$$s_y = \frac{Ea_t \Delta t}{2(1-n^2)} (C_y + nC_x) \quad (3.10)$$



**Figura 3.2. Factor de Corrección para losas finitas.<sup>75</sup>**

Bradbury (1938) basado en el análisis de Westergaard, desarrolló una carta simple para determinar  $C_x$  y  $C_y$  mostrada en la figura 3.2. El factor de corrección  $C_x$  depende de  $L_x/l$  y el factor de corrección  $C_y$  depende de  $L_y/l$ , donde  $l$  es el radio de relación de rigidez (stiffness) definido como:

$$l = \left[ \frac{Eh^3}{12(1-n^2)k} \right]^{0.25} \quad (3.11)$$

En donde  $E$  es el módulo de elasticidad del concreto,  $h$  es el espesor de la losa,  $\nu$  es la relación de Poisson del concreto y  $k$  es el módulo de reacción de la subrasante. Las ecuaciones anteriores de  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  dan el esfuerzo máximo interior en el centro de la losa. Los esfuerzos de borde en el semi-espacio de la losa puede ser determinado por:

$$s = \frac{CEa_t \Delta t}{2} \quad (3.12)$$

<sup>75</sup> Figura 3.2: Pavement Analysis and Design. Pág. 172.

#### **3.1.2.4 COMBINACIÓN DE ESFUERZOS.**

Aún cuando los esfuerzos por curvatura pueden ser bastante largos y causar grietas al concreto cuando se han combinado con los esfuerzos cargados, son usualmente no considerados en el diseño de espesor por las siguientes razones:

1. Las juntas y el acero son usadas para mitigar y tener cuidado de los esfuerzo por curvatura. Los esfuerzos por curvatura son mitigados cuando las diminutas grietas en el concreto no afectan la capacidad de acarreo de cargas del pavimento.
2. Cuando la fatiga es usada para el diseño no es usual combinar el cargado y los esfuerzos de curvatura. Un pavimento puede ser sujeto a millones de repeticiones de carga durante el periodo de diseño, pero el número de esfuerzos totales debido a curvatura es completamente limitado.
3. Los esfuerzos por curvatura pueden ser añadidos o sustraídos de los esfuerzos cargados para obtener un esfuerzo combinado.

### **3.1.3 ESFUERZOS Y DEFLEXIONES DEBIDO A LAS CARGAS.**

#### **3.1.3.1 INTRODUCCIÓN.**

Pueden ser utilizados tres métodos para determinar los esfuerzos y deflexiones en pavimentos de concreto hidráulicos:

- Fórmulas de forma cerrada.
- Cartas de Influencia.
- Programas de Computadora utilizando el Método de Elementos Finitos.

Las fórmulas originalmente desarrolladas por Westergaard pueden ser aplicadas solamente por una carga de una llanta simple con un área de influencia circular, semicircular, elíptica ó semi-elíptica. Las cartas de influencia desarrolladas por Pickett y Ray (1951) pueden ser aplicadas para cargas llantas múltiples y de cualquier configuración. Ambos métodos son aplicables solamente para una losa larga ó una fundación líquida. Si las cargas son aplicadas para losas múltiples sobre una fundación líquida, sólida ó fundación de capas con transferencias de carga a través de juntas, podría ser usado el método de elementos finitos.

### 3.1.3.2 FÓRMULAS DE FORMA CERRADA.

Estas fórmulas son aplicadas solamente para losas muy largas con carga de llanta simple aplicada cerca de la esquina, en el interior de una losa a la distancia considerable de cada borde y cerca del borde lejos de cualquier esquina.

#### ***Esquinas Cargadas.***

La fórmula de Glodbeck (1919) y Older (1924) es una de las más antiguas para el uso en el diseño de pavimentos de concreto. La fórmula esta basada sobre una concentración de carga  $P$  aplicada en la esquina de la losa mostrada en la figura 3.3. Cuando la carga es aplicada en la esquina, el esfuerzo en la losa es simétrico con respecto a la diagonal. Para una sección que atraviesa a la distancia  $x$  desde la esquina, el momento de flexión es  $Px$  y el ancho de la sección es  $2x$ . Cuando el soporte de la subrasante es negligente y la losa es considerada como una viga cantilever, el esfuerzo de tensión en lo alto de la losa es:

$$S_c = \frac{Px}{\frac{1}{6}(2x)h^2} = \frac{3P}{h^2} \quad (3.13)$$

**Figura 3.3. Losas sujetas a cargas en las esquinas.<sup>76</sup>**

En donde  $\sigma_c$  es el esfuerzo debido a la carga en la esquina,  $P$  es la carga concentrada y  $h$  es el espesor de losa. Notar que  $\sigma_c$  es independiente de  $x$ , es decir, cada sección cruzada no importando que tan lejos de la esquina esté, tendrá el mismo esfuerzo. Si la carga es realmente una carga concentrada aplicada justo en la esquina, la ecuación anterior es una solución exacta porque en la sección cruzada cerca a la carga con  $x$  aproximándose a 0, la reacción de la subrasante es muy pequeña y puede ser ignorada.

La Figura 3.3 muestra una carga circular aplicada cerca de la esquina de una losa. Debido a que el esfuerzo máximo de la sección no es cerca de la esquina, la fuerza de reacción total de la subrasante es absolutamente grande y no puede ser ignorada. Westergaard (1926) aplicó un método de aproximaciones sucesivas y obtuvo las siguientes dos ecuaciones:

$$s_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{\mathbf{l}} \right)^{0.6} \right] \quad (3.14)$$

$$\Delta_c = \frac{P}{k\mathbf{l}^2} \left[ 1.1 - 0.88 \left( \frac{a\sqrt{2}}{\mathbf{l}} \right) \right]$$

---

<sup>76</sup> Figura 3.3: Pavement Analysis and Design. Pág. 175.

En donde  $\Delta_c$  es la deflexión de la esquina,  $l$  es el radio relativo de rigidez (stiffness),  $a$  es el radio de contacto y  $k$  es el módulo de reacción de la subrasante. Westergaard encontró también que el momento máximo ocurre a la distancia de  $2.38\sqrt{a\mathbf{I}}$  desde la esquina. Para una carga concentrada con  $a=0$  las dos ecuaciones anteriores son idénticas.

Ioannides (1985) aplicó el método de elementos finitos para evaluar la solución de Westergaard. Sugirieron el uso de las siguientes dos ecuaciones:

$$s_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{c}{\mathbf{I}} \right)^{0.72} \right] \quad (3.15)$$

$$\Delta_c = \frac{P}{k\mathbf{I}^2} \left[ 1.205 - 0.69 \left( \frac{c}{\mathbf{I}} \right) \right]$$

Donde  $c$  es la longitud lateral de un área de contacto cuadrada. Encontraron que el momento máximo ocurre a una distancia de  $1.80c^{0.30}\mathbf{I}^{0.59}$  desde la esquina. Si la carga es aplicada a través de un área circular, el valor de  $c$  debe ser seleccionada tal que el cuadrado y el círculo tengan la misma área de contacto:

$$c = 1.772a \quad (3.16)$$

### **Cargado en el interior de la losa.**

La antigua fórmula desarrolla por Westergaard (1926) por el esfuerzo en el interior de una losa bajo un área circular cargada de radio  $a$  es:

$$s_i = \frac{3(1+n)P}{2ph^2} \left( \ln \frac{\mathbf{I}}{b} + 0.6159 \right) \quad (3.17)$$

Donde  $\mathbf{l}$  es el radio relativo de rigidez (stiffness) y

$$\begin{aligned} b &= a \quad \text{cuando } a \geq 1.724h \\ b &= \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h \quad \text{cuando } a < 1.724h \end{aligned} \quad (3.18)$$

Para una relación de Poisson de 0.15 y en términos de base 10 logarítmica la ecuación de  $\sigma_i$  puede ser escrita como:

$$s_i = \frac{0.316P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{\mathbf{l}}{b} \right) + 1.069 \right] \quad (3.19)$$

La ecuación de deflexión debida al cargado en el interior de la losa (Westergaard, 1939) es:

$$\Delta_i = \frac{P}{8k\mathbf{l}^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2p} \left[ \ln \left( \frac{a}{2\mathbf{l}} \right) - 0.673 \right] \left( \frac{a}{\mathbf{l}} \right)^2 \right\} \quad (3.20)$$

### **Cargado en los bordes.**

El esfuerzo debido al cargado en los bordes fue presentado por Westergaard (1926, 1933, 1948) en varios diferentes papeles. En sus papeles en 1948, presentó la solución generalizada para esfuerzos y deflexiones máximos producidos por áreas elípticas y semi-elípticas colocadas en los bordes de la losa. Ajustando la longitud mayor y menor de los semi-ejes de la elipse al radio de contacto  $a$ , conducen a la correspondiente solución para un área circular ó semi-circular cargada. En el caso del semi-círculo, su borde recto esta en línea con el borde de la losa. Los resultados obtenidos de estas nuevas fórmulas difieren significativamente de las fórmulas del apartado anterior.

De acuerdo a Ioannides (1985) las siguientes 8 ecuaciones son las mejores para su utilización:

$$S_{e_{(circular)}} = \frac{3(1+n)P}{p(3+n)h^2} \left[ \ln \left( \frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 1.84 - \frac{4n}{3} + \frac{1-n}{2} + \frac{1.18(1+2n)a}{\mathbf{1}} \right] \quad (3.21)$$

$$S_{e_{(semi-circular)}} = \frac{3(1+n)P}{p(3+n)h^2} \left[ \ln \left( \frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 3.84 - \frac{3n}{3} + \frac{(1+2n)a}{2\mathbf{1}} \right] \quad (3.22)$$

$$\Delta_{e_{(circular)}} = \frac{\sqrt{2+1.2nP}}{\sqrt{Eh^3k}} \left[ 1 - \frac{(0.76+0.4n)a}{\mathbf{1}} \right] \quad (3.23)$$

$$\Delta_{e_{(semi-circular)}} = \frac{\sqrt{2+1.2nP}}{\sqrt{Eh^3k}} \left[ 1 - \frac{(0.323+0.17n)a}{\mathbf{1}} \right] \quad (3.24)$$

Para  $v=0.15$ , las cuatro ecuaciones anteriores pueden ser escritas como:

$$S_{e_{(circular)}} = \frac{0.803P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{\mathbf{1}}{a} \right) + 0.666 \left( \frac{a}{\mathbf{1}} \right) - 0.034 \right] \quad (3.25)$$

$$S_{e_{(semi-circular)}} = \frac{0.803P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{\mathbf{1}}{a} \right) + 0.282 \left( \frac{a}{\mathbf{1}} \right) - 0.650 \right] \quad (3.26)$$

$$\Delta_{e_{(circular)}} = \frac{0.431P}{k\mathbf{1}^2} \left[ 1 - 0.82 \left( \frac{a}{\mathbf{1}} \right) \right] \quad (3.27)$$



$$\Delta_{e_{(\text{semi-circulo})}} = \frac{0.431P}{k\mathbf{1}^2} \left[ 1 - 0.349 \left( \frac{a}{\mathbf{1}} \right) \right] \quad (3.28)$$

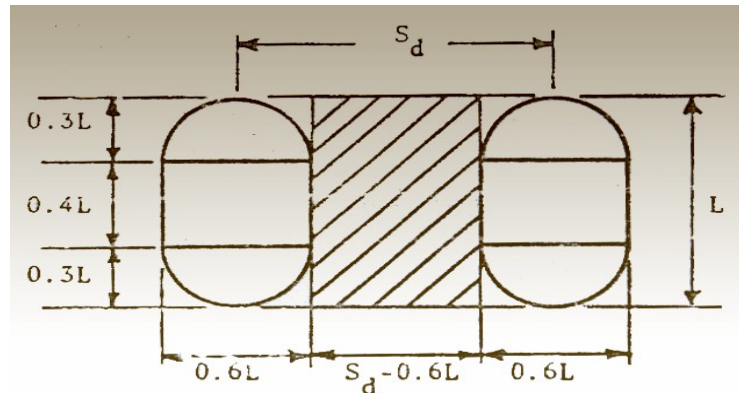
### LLANTAS DUALES

Con la excepción de las ecuaciones  $b$ ,  $d$ ,  $f$ , y  $h$  para un área cargada semicircular, todas las fórmulas presentadas hasta este momento están basadas sobre un área cargada circular. Cuando una carga está aplicada sobre un sistema de llantas duales, es necesario convertirlas en un área circular. Si el total de cargas es el mismo pero el área de contacto del círculo es igual a las de llantas duales, tal como ha sido asumido para el pavimento asfáltico, los resultados de esfuerzos y deflexiones serán muy largos. Por lo tanto, para un cargado total dado, un área circular más larga debería ser usada para pavimentos rígidos.

La figura 3.4 muestra un sistema de llantas duales. Se ha encontrado que los resultados satisfactorios pueden ser obtenidos si el círculo tiene un área igual al área de contacto de las llantas duales más el área entre ellas, como es indicado por el área tachada mostrada en la figura anterior. Si  $P_d$  es la carga sobre una llanta y  $q$  es la presión de contacto, el área de cada llanta es:

$$\frac{P_d}{q} = p(0.3L)^2 + (0.4L)(0.6L) = 0.5227L^2 \quad (3.29)$$

$$L = \sqrt{\frac{P_d}{0.5257q}}$$



**Figura 3.4. Método para convertir llantas duales en área circular.<sup>77</sup>**

El área de un círculo equivalente es:

$$pa^2 = 2 \times 0.5227L^2 + (S_d - 0.6L)L = 0.4454L^2 + S_d L \quad (3.30)$$

Sustituyendo el valor de  $L = \sqrt{\frac{P_d}{0.5227q}}$  en la ecuación anterior se

obtiene:

$$pa^2 = \frac{0.8521P_d}{q} + S_d \sqrt{\frac{P_d}{0.5227q}} \quad (3.31)$$

Así, el área de contacto es:

$$a = \sqrt{\frac{0.8521P_d}{qp} + \frac{S_d}{p} \left( \frac{P_d}{0.5227q} \right)^{1/2}} \quad (3.32)$$

### 3.1.3.3 CARTAS DE INFLUENCIA.

Las cartas de influencia están basadas en fundaciones líquidas (Pickett y Ray, 1951) y fueron usadas previamente por la Asociación del Cemento Pórtland para el diseño de pavimentos rígidos. Las cartas están basadas en la

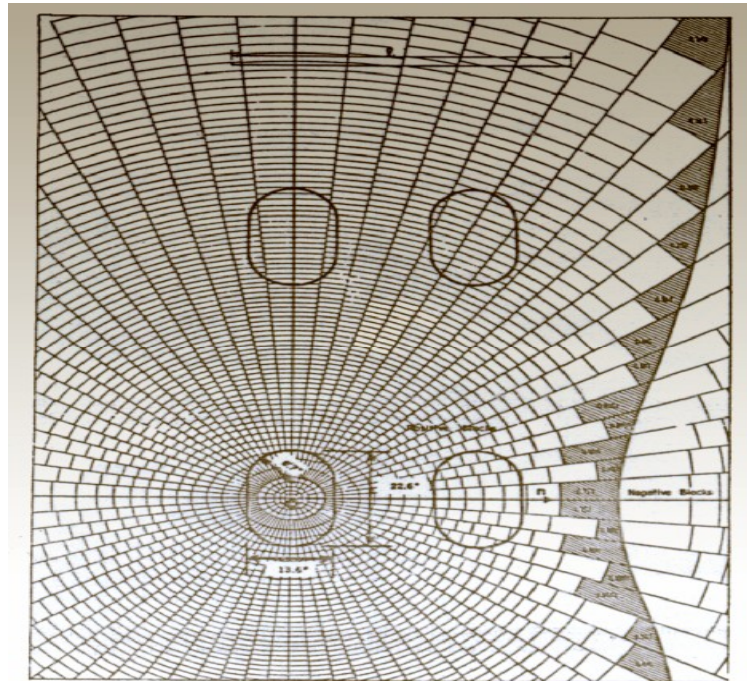
<sup>77</sup> Figura 3.4: Pavement Analysis and Design. Pág. 179.

teoría de Westergaard con una relación de Poisson de 0.15 para las losas de concreto. Solamente están disponibles las cartas para el cargado en el interior y el cargado en los bordes. El cargado en el interior ha sido usado para el diseño de pavimentos de aeropuertos (PCA, 1955) y las de cargado en los bordes para el diseño de pavimentos de alto tráfico (PCA, 1966).

### ***Cargado en el interior de la losa.***

La figura 3.5 muestra la aplicación de las cartas de influencia para la determinación de los momentos en el interior de la losa. El momento es el punto  $O$  en la dirección  $n$ . Para usar las cartas, es necesario determinar los

radios de relación de rigidez  $\mathbf{l}$  de acuerdo a la ecuación  $\mathbf{l} = \left[ \frac{Eh^3}{12(1-n^2)k} \right]^{0.25}$ .



**Figura 3.5. Carta de Influencia para la aplicación de determinación de momentos.<sup>78</sup>**

Por ejemplo, si  $\mathbf{l}$  es 57.1 pulg. (1.45m), la escala en lo alto de la figura 3.5 es 57.1 pulg. (1.45m). Esta escala debería ser usada para dibujar la

<sup>78</sup> Figura 3.5: Pavement Analysis and Design. Pág. 181.

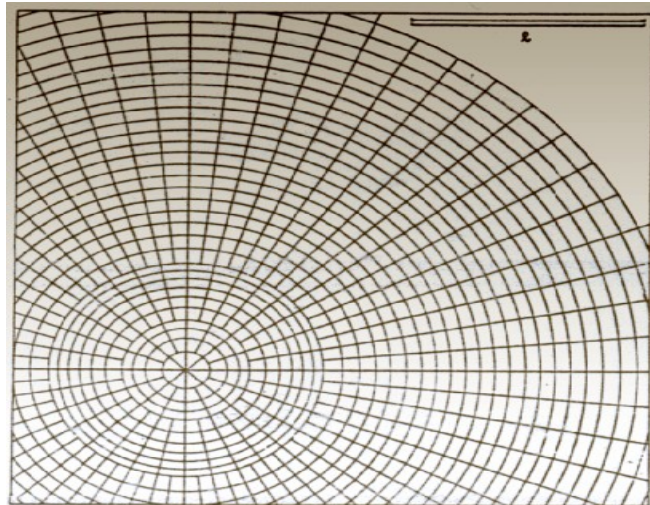
configuración del área de contacto. Si la longitud real de impresión de la llanta es 22.6 pulg. (574mm), la longitud para ser dibujada en la carta de influencia es 22.6/57.1 ó 39.6% de la longitud mostrada en la escala **I**. La localización de otras llantas esta basada en la misma escala. Para continuar el número de bloques  $N$  cubierta por la impresión de la llanta, el momento  $M$  en la dirección  $n$  puede ser determinada por:

$$M = \frac{q \mathbf{l}^2 N}{10,000} \quad (3.33)$$

En donde  $q$  es la presión de contacto. El esfuerzo es determinado dividiendo el momento por la sección del módulo:

$$s_i = \frac{6M}{h^2} \quad (3.34)$$

Para la impresión de llantas mostrada en la figura 3.5, el momento es bajo el centro de la parte más baja en la dirección lateral izquierda. Si el momento en la dirección longitudinal es el requerido, la llanta total montada debe rotar 90° en el sentido horario así que dos de las llantas yace en la zona de los bloques negativos, y los momentos se vuelven más pequeños.



**Figura 3.6. Carta de Influencia para la deflexión debido al cargado en el interior.<sup>79</sup>**

<sup>79</sup> Figura 3.6: Pavement Analysis and Design. Pág. 182.

La Figura 3.6 muestra la deflexión en las cartas de influencia debido al cargado en el interior de la losa. La carta es simétrica y los bloques están formados por círculos concéntricos y líneas radiales. La deflexión esta en el centro de los círculos. El uso de la carta es similar a la de la figura 3.5.

Después que el número de bloques cubiertos por la llanta son contabilizados, la deflexión puede ser determinada por:

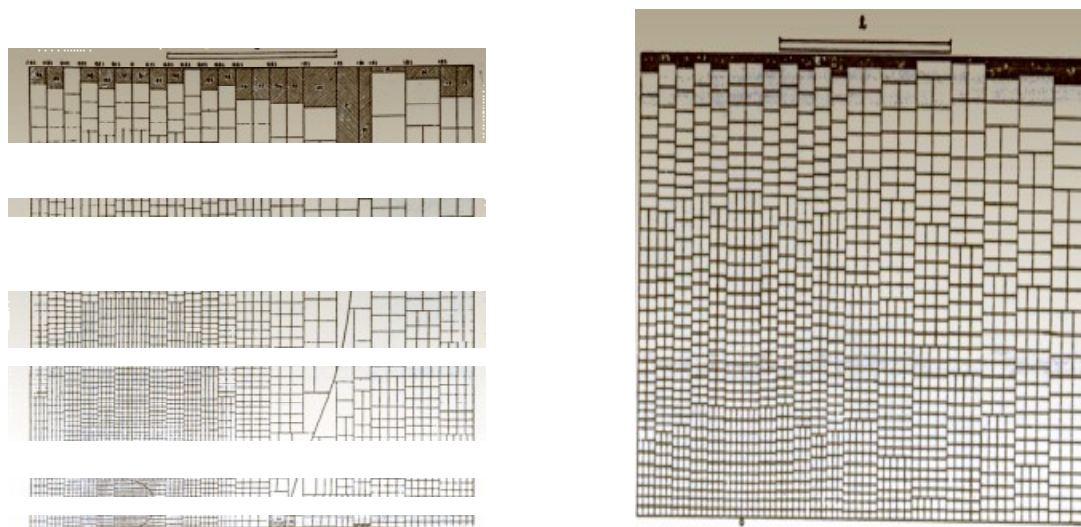
$$\Delta_i = \frac{0.0005qI^4N}{D} \quad (3.35)$$

En donde  $D$  es el módulo de rigidez:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-n^2)} \quad (3.36)$$

### **Cargado en los bordes.**

Las figuras 3.7 muestran las cartas de influencia para momentos y deflexiones en el punto  $O$  en los bordes de la losa. El uso de las cartas es similar al caso del cargado del interior de la losa y se utilizan también las mismas fórmulas.



**Figura 3.7. Cartas de Influencia debido al cargado en el borde de la losa.<sup>80</sup>**

<sup>80</sup> Figura 3.7: Pavement Analysis and Design. Pág. 184 y 185.

### 3.1.4 ESFUERZOS DEBIDO A LA FRICCIÓN.

#### 3.1.4.1 INTRODUCCIÓN.

La fricción entre una losa de concreto y su fundación causa esfuerzos de tensión en el concreto, en el acero de refuerzo y a veces en las barras de amarre. Para planear el pavimento de concreto, el espaciamiento entre las juntas de contracción debe ser escogido de tal forma que los esfuerzos debido a la fricción no causen fracturas al concreto. Para espaciamientos de juntas más largos, el acero de refuerzo se debe suministrar para evitar los esfuerzos causados por la fricción. El número de barras ligadas requeridas es controlado por la fricción.

La Figura 3.8 muestra el arreglo de juntas y acero en el pavimento de concreto.



Figura 3.8. Acero y juntas en pavimentos de concreto.<sup>81</sup>

#### 3.1.4.2 EFECTO DE LOS CAMBIOS DE VOLUMEN EN EL CONCRETO HIDRÁULICO.

El cambio de volumen causado por la variación de temperatura y humedad tiene dos aspectos importantes en el concreto hidráulico. Primero,

<sup>81</sup> Figura 3.8: Pavement Analysis and Design. Pág. 186.

esto induce a los esfuerzos de tensión y causa las grietas al concreto. Segundo, esto causa la abertura en la junta y deficiencia en la transferencia de carga.

***Esfuerzo en el concreto hidráulico.***

Debido a la simetría, la losa tiende a moverse de uno de sus extremos al centro, pero la subrasante previene que ésta se mueva; así, los esfuerzos friccionantes son desarrollados entre la losa y la subrasante. La cantidad de fricción depende del movimiento relativo siendo cero en el centro donde no hay movimiento y máximo a cualquier distancia desde el centro donde el movimiento es completo. Para propósitos prácticos, el coeficiente de fricción promedio  $f_a$  puede ser asumido. El esfuerzo de tensión en el concreto es mucho mayor en el centro y puede ser determinado por la ecuación de la fuerza friccionante por unidad de ancho de la losa  $g_c h L f_a / 2$ , a la fuerza de tensión  $s_c h$ , así:

$$s_c = \frac{g_c L f_a}{2} \quad (3.37)$$

En donde  $\sigma_c$  es el esfuerzo en el concreto,  $\gamma_c$  es la unidad de peso del concreto,  $L$  es la longitud de la losa y  $f_a$  es el coeficiente de fricción promedio entre la losa y la subrasante (usualmente se toma el valor de 1.5).

***Abertura de Juntas.***

El espaciamiento de juntas en pavimentos de concreto depende de las características de contracción del concreto más que el esfuerzo en el mismo. El espaciamiento en juntas más largas causa que éstas se abran completamente y disminuya la eficiencia en la transferencia de cargas. La abertura de una junta puede ser calculada aproximadamente por (Darter y Barenberg, 1977):

$$\Delta L = CL(a_t \Delta T + e) \quad (3.38)$$



En donde  $\Delta L$  es la abertura de la junta causada por el cambio de temperatura y contracción por el secado del concreto;  $\alpha_t$  es el coeficiente de expansión térmica del concreto, generalmente de 9 a  $10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ;  $\epsilon$  es el coeficiente de contracción de secado del concreto, aproximadamente de 0.5 a  $2.5 \times 10^{-4}$ ;  $L$  es el espaciamiento de la junta ó la longitud de la losa;  $\Delta T$  es el rango de temperatura; y  $C$  es el factor de ajuste debido a la fricción de la losa-subbase, su valor es de 0.65 para base estabilizada y 0.8 para subbase granular.

## **3.2 MODELOS DE PREDICCIÓN DE FALLAS ESTRUCTURALES EN PAVIMENTOS RÍGIDOS.**

### **3.2.1 INTRODUCCIÓN.**

Similar a los pavimentos asfálticos, el proceso de diseño mecanicista envuelve la aplicación de modelos estructurales para calcular la respuesta del pavimento, el desarrollo de los modelos de deterioro a pronosticar de la respuesta estructural y la calibración de los deterioros pronosticados con la observación de los mismos puestos sobre pavimentos en servicio.

Los modelos estructurales para el análisis de pavimentos rígidos son más avanzados que los modelos de deterioro. Varios programas de elementos finitos se pueden utilizar como modelo estructural pero la mayoría de modelos de deterioro son ecuaciones de regresión derivadas empíricamente con una larga dispersión de datos. La mayor parte de los tipos de deterioro para ser modelados incluyen grietas por fatiga, bombeo, dislocamientos y deterioros de juntas en pavimentos de concreto y despostillamiento para pavimentos de concreto con refuerzo continuo.



### **3.2.2 MODELOS ESTRUCTURALES.**

El análisis exacto del sistema del pavimento rígido, Reporte 1-26 (NCHRP, 1990) indicaba que los modelos estructurales usados deben tener los mínimos aptitudes siguientes:

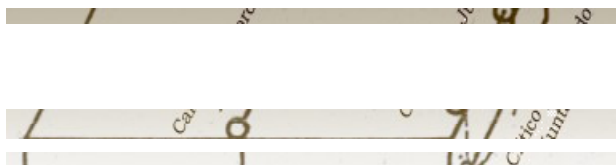
1. Analizar losas de cualquier dimensión arbitraria.
2. Analizar sistemas con dos capas (losa y subbase), vinculada o no vinculada con las mismas ó diferentes propiedades de los materiales.
3. Analizar sistemas de losas con subrasante líquida ó sólida.
4. Analizar sistemas de losas con soporte uniforme ó no uniforme tal que la pérdida de soporte debido a erosión u otras causas puedan ser tomadas en cuenta.
5. Analizar múltiples losas con transferencia de cargas a través de juntas ó grietas.
6. Considerar losas con alabeo y curvadas simultáneamente con respuesta de carga.
7. Analizar losas con espaciamientos variables de grietas para el diseño de CRCP (refuerzo continuo de pavimentos de concreto).
8. Analizar losas con una cualquier condición de carga arbitraria incluyendo llanta simple ó múltiple, presiones de llanta variable y cargas aplicadas en distancias asignadas en forma arbitraria de grietas, juntas ó bordes de losa.
9. Analizar sistemas de pavimentos con condiciones de hombros arbitrarias incluyendo hombros de asfaltos, hombros de amarre de concreto y carriles de manejo extendidos con asfalto u hombros de concreto más allá de la losa extendida.
10. Analizar sistemas con losa no uniforme ó hombros delgados.

### 3.2.3 MODELOS DE GRIETAS POR FATIGA.

Similar al pavimento flexible, la acumulación de daño por fatiga puede ser expresada como la sumatoria de relación de daños entre lo pronosticado y el número de repetición de cargas permitido. Sin embargo, en vez de relacionar el esfuerzo de tensión, el número de repetición de cargas permitido está relacionado a la relación de esfuerzos, el cual es la relación entre el esfuerzo de flexión y el módulo de ruptura. El mismo concepto de probabilidad usado para definir el porcentaje de área agrietada puede ser usado para definir el porcentaje de losas agrietadas.

#### 3.2.3.1 COLOCACIÓN DE LA CARGA DEL VEHÍCULO.

La fatiga del concreto puede causar grietas transversales las cuales inician en los bordes de la losa sobre las juntas transversales y grietas longitudinales las cuales inician en la huella de llanta en la carretera hasta las juntas transversales, usualmente en la huella de la llanta cercana a la línea central de la losa. La Figura 3.9 muestra las cargas más críticas y esfuerzos localizados para ser considerados para el análisis de fatiga. La grieta transversal es causada por la carga en el borde de la semi-losa y la grieta longitudinal es causada por el cargado de la junta.



**Figura 3.9. Carga Crítica y localización de esfuerzos para análisis de fatiga.<sup>82</sup>**

<sup>82</sup> Figura 3.9: Pavement Analysis and Design. Pág. 198.

Debido a la distribución lateral de tráfico, las cargas de las llantas no son aplicadas en la misma localización, así solamente una fracción de la repetición de cargas necesarias será considerada para el daño por fatiga. El reporte 1-26 sugiere el uso de una relación de daño equivalente EDR para cada posición de carga crítica. El EDR es la relación del tráfico aplicado en la misma localización crítica en la que se producirá la misma acumulación de daño por fatiga como el tráfico total distribuido sobre todas las localizaciones. Fue demostrado en el Reporte 1-26 que un EDR de 0.05 a 0.06 puede ser usado para las cargas de bordes de la semi-losa con hombros de asfalto y un EDR de 0.25 a 0.28 pueda ser usado para el cargado de juntas. Para el cargado en los bordes con amarres de hombros de concreto, los rangos de EDR son de 0.12 a 0.34.

Por lo tanto la colocación de la carga del vehículo no es un factor en el diseño de pavimentos flexibles, debe ser cuidadosamente considerado en el diseño de pavimentos rígidos.

### 3.2.3.2 ESFUERZOS POR CURVATURAS.

El Reporte 1-26 sugirió el uso de combinación de cargas y esfuerzos por curvaturas para determinar la relación de esfuerzos y en este caso el número de repetición de cargas permitido. En adición al número de periodos y grupos de cargas un nuevo bucle indica las condiciones de curvaturas que deben ser añadidos:

$$D_r = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^m \frac{n_{i,k,j}}{N_{i,k,j}} \quad (3.39)$$

En donde  $D_r$  es la relación de la acumulación de daño a través del período de diseño en la localización crítica,  $i$  es el contador para periodos valores de soporte de la subrasante,  $p$  es el número total de periodos,  $k$  es el

contador para tres condiciones de curado (día, noche y gradiente de temperatura cero),  $j$  es el contador para grupos de cargas,  $m$  es el total del número de grupos de cargas,  $n_{i,k,j}$  es el número pronosticado de repetición de cargas para la  $j$  ava grupos de carga,  $k$  ava condiciones de curvatura e  $i$  ava período y  $N_{i,k,j}$  es el número permitido de repeticiones de carga para la  $j$  ava grupos de carga,  $k$  ava condiciones de curvatura e  $i$  ava período.

La inclusión de esfuerzos de curvatura complica el calculo porque el trafico que ser dividido en tres períodos cada uno con un gradiente de temperatura diferente. Si no aparece razonable combinar cargas y esfuerzos por temperaturas es porque no ocurren en la misma frecuencia.

Un pavimento puede ser sujeto a cientos de repeticiones de cargas por día debido al tráfico pero el número de repeticiones debido a la curvatura por temperatura es en su mayoría una vez al día. Si el esfuerzo por curvatura no puede ser ignorado y la longitud del panel más largo tiene efectos significantes en las grietas por fatiga debido a los altos esfuerzos por curvatura, es más razonable considerar relaciones de daño debido a las cargas y curvaturas por separado y luego combinarlos.

Las curvaturas no pueden afectar la vida de la fatiga significativamente porque los esfuerzos por curvatura pueden ser sustraídos ó añadidos de los esfuerzos cargados, neutralizando el efecto.

El esfuerzo en el borde es lejano reducirlo por la humedad albeando porque la humedad contiene en el fondo de la losa son más frecuentemente alta que en la cima. El esfuerzo por curvatura debería ser mucho más reducido cuando nuevos pavimentos son para ser construidos con paneles de longitud corta. La calibración de los modelos pueden minimizar más los efectos de los esfuerzos de curvatura.

### 3.2.4 MODELOS DE BOMBEO Y EROSIÓN.

Hay un importante modo de deterioro en adición a la grieta por fatiga que necesita ser dirigido en el diseño de pavimentos rígidos. Este es el bombeo y la erosión de materiales por debajo y encima de la losa. De hecho, la mayoría de las fallas en las pruebas viales de Maryland y AASHO fueron de bombeo.

Los factores que influyen al bombeo y a la erosión incluyen la presencia de agua, el grado al cual el agua es expulsada bajo la losa, la erosionabilidad de los materiales de la subbase, la magnitud y número de cargas repetidas y a la sumatoria de deflexiones. El único modelo disponible es el desarrollado por la PCA que se basó en los resultados de las pruebas viales de AASHO debido que los materiales de subbase utilizados en esta prueba eran altamente erosionables.

Varias tentativas han sido hechas para correlacionar la erosión con la cantidad de expulsión de agua, cargas de tráfico y deflexión del pavimento a través de un modelo de energía (Dempsey, 1983). El empuje de esta consideración es para calcular la cantidad de energía implicada en la deflexión de un pavimento y establecer una correlación entre la energía total absorbida para niveles de tráfico y erosión conocidos. Estos intentos han sido moderadamente satisfactorios para condiciones específicas, pero hay otros factores que afectan la erosionabilidad y que no han sido debidamente considerados.

El reporte 1-26 también presentó un modelo basado empíricamente en el bombeo que considera todos los factores creíbles para influenciar la erosión y el bombeo de pavimentos rígidos. El modelo, el cual puede ser aplicado a JPCP y JRCP incluyendo el tipo de transferencia de carga como una variable, fue desarrollado usando técnicas de regresiones no lineales de una

base de datos de 927 secciones de pavimentos de siete estados en cada zona climática del continente.

El modelo de bombeo de COPES (Darter, 1985) incluye ecuaciones separadas para JPCP y JRCP, estos son presentados a continuación.

### 3.2.4.1 JUNTAS SIMPLES EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.

$$PI = (N_{18})^{0.443} [ -1.479 + 0.255(1-S) + 0.0605(P)^{0.5} + 52.65(H)^{-1.747} + 0.0002269(FI)^{1.205} ] \quad (3.40)$$

Estadística:  $R^2=0.68$

SEE=0.42

n=289

En donde:

*PI*: Índice de bombeo clasificado en una escala de 0 a 3 el cual 0 es no bombeo, 1 para bombeo severidad baja, 2 para severidad media y 3 para bombeo severidad alta.

$N_{18}$ : Número equivalente de eje simple de carga de 18 kip en millones.

*S*: Tipo de suelo basado en la clasificación AASHTO, donde 0 para suelos de grano grueso (A-1 a A-3) y 1 para suelos de granos finos (A-4 a A-7).

*P*: Precipitación anual en centímetros.

*H*: Espesor de losa en pulgadas.

*FI*: Índice de congelamiento en grados-días.

### 3.2.4.2 JUNTAS REFORZADAS EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.

$$PI = (N_{18})^{0.670} [ -22.82 + 26102.2(H)^{-5.0} - 0.129(D) - 0.118(S) + 13.224(P)^{0.0395} + 6.834(FI+1)^{0.00805} ] \quad (3.41)$$

Estadística:  $R^2=0.57$

SEE=0.52

n=481

Donde:

*D*: Es el indicador para la presencia de sistemas de subdrenaje con valores de 0 para un sistema sin subdrenaje y 1 para un sistema con subdrenaje.

### 3.2.5 MODELOS DE FALLAS.

Las fallas en las juntas transversales es un problema serio que puede llevar a severas rugosidades en juntas de pavimentos de concreto. El mecanismo de deterioros por fallas en pavimentos con dovelas es absolutamente diferente de los pavimentos sin dovelas. Por lo tanto, estos dos pavimentos son desarrollados a continuación en forma separada.

#### 3.2.5.1 PAVIMENTOS CON DOVELAS.

Las fallas de pavimentos con dovelas son causadas por la erosión del concreto alrededor de las dovelas bajo repeticiones de cargas. Debido que el diseño de dovelas esta basado en soportar la tensión entre la dovela y el concreto, es natural asumir que la falla es debido al exceso de tensión. Se investigó que si los esfuerzos de tensión es mantenido aproximadamente

debajo de 1500 psi (10.4 MPa.), la falla puede ser mantenida en un nivel aceptable.

Usando el método recomendado por el Reporte 1-26 para el cálculo de esfuerzos de tensión de dovelas y asumiendo un módulo de soporte de dovela  $k$  de  $1.5 \times 10^6$  psi (10.4 GPa), la siguiente ecuación de regresión basada en 280 secciones de pavimento en la base de datos de COPES, se obtuvo:

$$F = (N_{18})^{0.5377} \left[ 2.2073 + 0.002171(S)^{0.4918} + 0.0003292(JS)^{1.0793} - 2.1397(k)^{0.01305} \right] \quad (3.42)$$

En donde:

$F$ : Fallas del pavimento en pulgadas.

$N_{18}$ : Número equivalente de eje simple de carga de 18 kip en millones.

$S$ : Máximo esfuerzo de tensión en psi.

$JS$ : Espaciamiento de juntas transversales en pies.

$K$ : Módulo estimado de reacción de la subrasante sobre lo alto de la subbase en pci.

Muchas variables climáticas tales como la precipitación y los índices de congelación fueron introducidos originalmente pero no se mostró ningún significado estadístico y debido a eso, no se incluyó en el modelo. Esto es debido probablemente al número de zonas climáticas incluidas en la base de datos. Debido a la insuficiencia de datos, muchas otras variables tales como base permeable, tipo de subrasante, soporte de borde y subdrenaje no fueron incluidos.

De acuerdo al Complemento de 1998 del método de diseño de pavimentos de AASHTO 1993 el modelo de falla para juntas con dovelas es así:



$$\begin{aligned}
 FaultD = CESAL^{0.25} \times [ & 0.0628 \times 0.0628 C_d + 0.3673 \times 10^{-8} \times B_{stress}^2 \\
 & + 0.4116 \times 10^{-5} \times J_{tspace}^2 + 0.7466 \times 10^{-9} \times FI^2 \times Precip^{0.5} \\
 & - 0.009503 \times B_{asetype} - 0.01917 \times Widenlane + 0.0009217 \times Age ] \quad (3.43)
 \end{aligned}$$

Donde:

*FaultD*: Falla de junta transversal principal en pulgadas.

*CESAL*: Cargas acumuladas de ejes equivalentes de 18 kips (80 KN) en millones.

*C<sub>d</sub>*: Coeficiente de Drenaje modificado de AASHTO, ver siguiente tabla:

**Tabla 3.1. Coeficientes de Drenaje de AASHTO Modificado (1998)<sup>83</sup>**

Drenes Del Borde	Nivel de Precipitación	Subbase Fina-Granular		Subbase Gruesa-Granular	
		Base no Permeable	Base Permeable	Base no Permeable	Base Permeable
No	Mojado	0.70 – 0.90	0.85 – 0.95	0.75 – 0.95	0.90 – 1.00
	Seco	0.90 – 1.10	0.95 – 1.10	0.90 – 1.15	1.00 – 1.15
Si	Mojado	0.75 – 0.95	1.00 – 1.10	0.90 – 1.10	1.05 – 1.15
	Seco	0.95 – 1.15	1.10 – 1.20	1.10 – 1.20	1.15 – 1.20

*BSTRESS*: Esfuerzo máximo de flexión del concreto de la ecuación cerrada, en psi:

$$BSTRESS = f_d P T \left[ \frac{K_d (2 + BETA \times OPENING)}{4 E_s I BETA^3} \right] \quad (3.44)$$

$$BETA = \sqrt[4]{\frac{K_d DOWEL}{4 E_s I}} \quad (3.45)$$

$$f_d: \text{Factor de distribución} = 2 \times \frac{12}{1+12}$$

<sup>83</sup> Tabla 3.1: Diseño de Juntas, Pág. 64. Complemento de AASHTO 1998.

$l$  = Radio de rigidez relativa en pulgadas

$I$ : Momento de inercia de las barras de dovela que cruza la sección en  $\text{in}^4$ :

$$I = 0.25p \left( \frac{DOWEL}{2} \right)^4 \quad (3.46)$$

$P$ : Carga aplicada de la llanta, fijar a 9000 lbf (40 kN).

$T$ : Porcentaje de transferencia, fijar a 0.45.

$K_d$ : Módulo de soporte de dovela, fijar a 1500000 psi/in (405 MPa/mm).

$BETA$ : Rigidez relativa del sistema dovela-concreto.

$DOWEL$ : Diámetro de dovela en pulgadas.

$E_s$ : Módulo de elasticidad de la barra de dovela en psi.

$K$ : Módulo de reacción de la subrasante en psi/in.

$OPENING$ : Abertura de junta transversal promedio en pulgadas.

$$OPENING = 12 \times CON \times Jt_{space} \times \left( \frac{ALPHA \times TRANGE}{2 + e} \right) \quad (3.47)$$

$Jt_{space}$ : Espaciamiento de junta transversal promedio en pies.

$CON$ : Factor de ajuste debido al alojamiento friccional entre base/losa.

: 0.65 si es base estabilizada.

: 0.80 si es base con agregado o base de concreto con agregados triturados.

$ALPHA$ : Coeficiente de expansión térmica de pavimentos de concreto, fijara a 0.000006/°F (0.000003/°C).

$TRANGE$ : Rango de temperatura anual en °F.

$e$ : Coeficiente de contracción al secarse de pavimentos de concreto, fijar a tensión de 0.00015.

$FI$ : Índice principal anual de congelamiento en Grados Fahrenheit-día.

$Precip$ : Precipitación anual en pulgadas.

$Basetype$ : 0 para base inestabilizada, 1 para base estabilizada.

$Widenlane$ : 0 si no es ensanchada, 1 si es ensanchada.

$Age$ : Edad del pavimento en años.

### 3.2.5.2 PAVIMENTOS SIN DOVELAS.

Hasta la fecha ningún análisis mecanicista ha sido logrado para pavimentos sin dovelas. La siguiente ecuación de regresión se derivó de 186 secciones de pavimentos en la base de datos de COPES y presentado en el Reporte 1-26:

$$F = (N_{18})^{0.3157} [ 0.4531 + 0.3367(z)^{0.3322} - 0.5376(100w)^{-0.008437} + 0.0009092(FI)^{0.5998} + 0.004654(B) - 0.03608(ES) - 0.01087(S) - 0.009467(D) ] \quad (3.48)$$

En donde:

*F*: Fallas en pulgadas.

*N<sub>18</sub>*: Número equivalente de eje simple de carga de 18 kip en millones.

*z*: Abertura de juntas en pulgadas.

*w*: Deflexiones de esquinas en pulgadas.

*FI*: Índice de aire congelado medio en grados-días.

*B*: Factor de erosionabilidad para materiales de subbase con 0.5 para subbase de concreto inclinado, 1.0 para base granular tratada con cemento, 1.5 para subbase no granular tratada con cemento, 2.0 subbase tratadas con asfalto y 2.5 para subbase granular sin tratar.

*ES*: condición de soporte de los bordes, con 0 para bordes no soportados y 1 para bordes ancladas a vigas ó a hombres.

*S*: Tipo de suelo para subrasante con 0 para grupos A-4 a A-7 y 1 para grupos A-1 a A-3.

*D*: Índice de drenaje con 0 para bordes no drenados y 1 para bordes drenados.

De acuerdo al Complemento de 1998 del método de diseño de pavimentos de AASHTO 1993 el modelo de falla para juntas sin dovelas es así:

$$\begin{aligned}
 FaultND = CESAL^{0.25} \times [ & 0.2347 - 0.1516 \times C_d - 0.000250 \times Slabthick^2 / Jtspace^{0.25} \\
 & - 0.0155 \times Basetype + 0.7784 \times 10^{-7} \times FI^{1.5} \times Precip^{0.25} \\
 & - 0.002478 \times Days90^{0.5} - 0.0415 \times Widenlane ] \quad (3.49)
 \end{aligned}$$

Donde:

*FaultND*: Falla de la junta transversal sin dovela.

*Days90*: Número de días con temperatura arriba de 90°F (32.2°C).

Todas las otras variables son definidas igual como para *FaultD* (falla de junta con dovela).

### 3.2.6 DETERIORO DE JUNTAS.

El deterioro de juntas incluye peladura y desintegración general del concreto cerca de las juntas. Se han desarrollado métodos no mecanicistas para analizar el deterioro de juntas. El factor más importante que causa el deterioro de juntas es la explosión ó grieta “D” en el concreto el cual el primer requisito para prevenir esta deterioración en la junta es necesario utilizar agregados que no lo causen.

Un modelo basado estadísticamente fue desarrollado usando la base de datos de COPES. Con alrededor de 501 secciones de pavimentos alrededor de Estados Unidos, se obtuvo la siguiente ecuación de regresión:

$$\begin{aligned}
 DETJT = (AGE)^{2.3503} (N_{18})^{0.62974} [ & 0.0021443 + 3.6239 \times 10^{-6} (FI) \\
 & + 7.08597 \times 10^{-5} (JS) + 3.5307 \times 10^{-5} (SCTE) ] \quad (3.50)
 \end{aligned}$$

Donde:

*DETJT*: porcentaje de juntas deterioradas.

*AGE*: Tiempo en años desde que comenzó la construcción.

*N<sub>18</sub>*: Número equivalente de eje simple de carga de 18 kip en millones.

*FI*: Índice principal de aire congelado en grados-días.

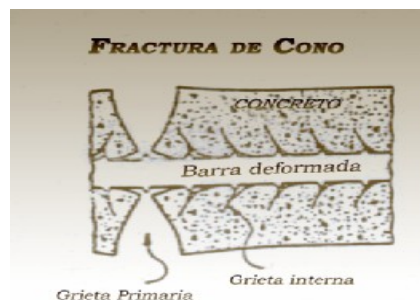
*JS*: Espaciamiento en pies de las juntas transversales.

*SCTE*: Concentración de energía termal en verano.

### 3.2.7 MODELOS DE DESPOSTILLAMIENTO.

Los despostillamientos son los deterioros primarios en CRCP. Si este tipo de deterioro se podría eliminar, los CRCP tendrían un excepcional registro de comportamiento. Se hizo un comprensivo estudio por Zollinger (1989) sobre deterioros de despostillamientos. El describió cuatro modelos de deterioro que eventualmente conducen al despostillamiento.

- a. Cuando la losa de concreto se agrieta, el esfuerzo de tensión en el acero de refuerzo causa la fractura del concreto en los alrededores.



**Figura 3.10. Fractura de Cono.**<sup>84</sup>

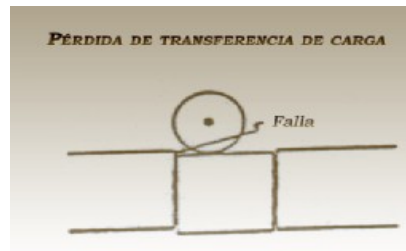
- b. La fractura del concreto reduce la rigidez de la losa y resultan peladuras sobre la grieta en la superficie.

<sup>84</sup> Figura 3.10: Pavement Analysis and Design. Pág. 606.



**Figura 3.11. Peladura sobre la cara de la grieta.<sup>85</sup>**

- c. La peladura sobre la superficie de la grieta hace que la misma se expanda sobre la losa y de cómo resultado perdida de transferencia de carga a través de la grieta.

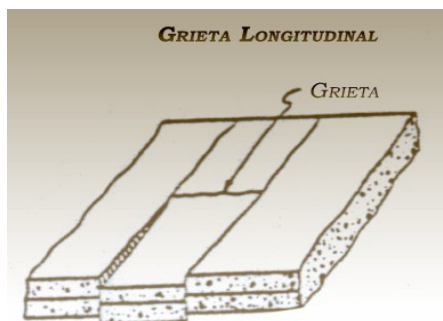


**Figura 3.12. Pérdida de transferencia de carga.<sup>86</sup>**

- d. Sin la transferencia de carga, la losa a través de dos grietas actúa como una viga en Cantilever y el esfuerzo de tensión en la dirección transversal debido al cargado en el borde causa a la losa que se fracture en la parte alta de la misma.

<sup>85</sup> Figura 3.11: Pavement Analysis and Design. Pág. 606.

<sup>86</sup> Figura 3.12: Pavement Analysis and Design. Pág. 606



**Figura 3.13. Grieta Longitudinal.**<sup>87</sup>

Un método mecanicista para el diseño de prevención de despostillamientos requiere el conocimiento de LTE (Eficiencia de Transferencia de Carga), el cual depende del nivel de esfuerzo cortante a través de la grieta y la anchura de la grieta. El nivel de esfuerzo cortante puede ser obtenido de programas de elementos finitos pero la determinación de la anchura de la grieta requiere una predicción exacta del espaciamiento de la grieta. Bajo una condición de construcción normal, el espaciamiento de la grieta varía de anchura como de proceso de diseño para rehabilitación el cual no puede ser archivado. Para el diseño aproximado de rehabilitación, son necesarios algunos controles principales externos sobre el espaciamiento de la grieta.

### **3.3 DETERIOROS EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.**

Los pavimentos de concreto incluyen pavimentos de concreto con juntas (JPCP), pavimentos de concreto con junta reforzada (JRCP) y pavimentos de concreto con refuerzo continuo (CRCP). Los tipos comunes de deterioros en

<sup>87</sup> Figura 3.13: Pavement Analysis and Design. Pág. 606

estos pavimentos son bombeo, fallas y grietas. El deterioro de juntas es un problema mayor en JRCP debido a los largos espaciamientos de juntas el cual el despostillamiento de los bordes es un problema mayor en los CRCP debido al acercamiento de los espacios en las grietas.

Los principales daños en un pavimento de concreto hidráulico de acuerdo a la SIECA para el área centroamericana son los siguientes:

### **1. Fisura Transversal o diagonal.**

Fracturamiento de la losa que ocurre aproximadamente perpendicular al eje del pavimento ó en forma oblicua a este, dividiendo la misma en dos planos.

Son causadas por la repetición de cargas pesadas, pérdida de soporte de la fundación, gradientes de tensiones originados por cambios de temperatura y humedad, o por las deficiencias en la ejecución de éstas y/o sus juntas longitudinales. Con frecuencia la ausencia de juntas longitudinales y/o losas, con relación ancho / longitud excesiva, conducen también al desarrollo de fisuras longitudinales.

Se definen tres niveles de severidad (bajo, mediano, alto) de acuerdo al ancho de la fisura, condición y estado de los bordes, según la siguiente guía:

**B (Bajo):** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras finas, no activas, de ancho promedio menor de 3 mm.
- Fisuras selladas de cualquier ancho, con el material de sello en condición satisfactoria; no hay signos visibles de despostillamiento y/o dislocamiento.

**M (Mediano)** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras activas, de ancho promedio entre 3 y 10 mm.



- Fisuras de hasta 10 mm de ancho acompañadas de despostillamiento y dislocamiento de hasta 10 mm.
- Fisuras selladas de cualquier ancho, con material de sello en condición insatisfactoria y/o despostillamiento y/o dislocamiento menor de 10 mm.

**A (Alto)** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras de ancho mayor de 10 mm.
- Fisuras selladas o no, de cualquier ancho, con despostillamientos severos y/o dislocamiento mayor de 10 mm.



**Figura 3.14. Fisura transversal o diagonal.<sup>88</sup>**

## **2. Fisura longitudinal.**

Fracturamiento de la losa que ocurre aproximadamente paralela al eje de la carretera, dividiendo la misma en dos planos. Son causadas por la repetición de cargas pesadas, pérdida de soporte de la fundación, gradientes de tensiones originados por cambios de temperatura y humedad, o por las deficiencias en la ejecución de éstas y/o sus juntas longitudinales. Con frecuencia la ausencia de juntas longitudinales y/o losas, con relación ancho/longitud excesiva, conducen también al desarrollo de fisuras longitudinales.

Se definen tres niveles de severidad (bajo, mediano, alto) de acuerdo al ancho de la fisura, condición y estado de los bordes, según la siguiente guía:

---

<sup>88</sup> Figura 3.14: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 26.

**B (Bajo)** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- a. Fisuras finas, no activas, de ancho promedio menor de 3 mm.
- b. Fisuras selladas de cualquier ancho, con el material de sello en condición satisfactoria; no hay signos visibles de despostillamiento y/o dislocamiento.

**M (Mediano)** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras activas, de ancho promedio entre 3 y 10 mm.
- Fisuras de hasta 10 mm de ancho acompañadas de despostillamiento y dislocamiento de hasta 10 mm.
- Fisuras selladas de cualquier ancho, con material de sello en condición insatisfactoria y/o despostillamiento y/o dislocamiento menor de 10 mm.

**A (Alto)** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras de ancho mayor de 10 mm.
- Fisuras selladas o no, de cualquier ancho, con despostillamientos severos y/o dislocamiento mayor de 10 mm.



**Figura 3.15. Fisura longitudinal.**<sup>89</sup>

### 3. Fisura de esquina.

Es una fisura que intersecta la junta o borde que delimita la losa a una distancia menor de 1.30 m a cada lado medida desde la esquina. Las fisuras de esquina se extienden verticalmente a través de todo el espesor de la losa.

<sup>89</sup> Figura 3.15: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 27.

Son causadas por la repetición de cargas pesadas (fatiga de concreto) combinadas con la acción drenante, que debilita y erosiona el apoyo de la fundación, así como también por una deficiente transferencia de cargas a través de la junta, que favorece el que se produzcan altas deflexiones de esquina. La presencia de arenas angulosas sueltas, muy próximas a la pista, hace que aumente la abrasión de las llantas que ascienden y descienden del pavimento, provocando peladuras severas que pueden conducir a la desintegración.

Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) considerando la severidad misma de la fisura que la origina, como el estado del pavimento comprendido por la misma y los bordes de la losa, de acuerdo con la siguiente guía:

**B (Bajo)** El fracturamiento es definido por una fisura de severidad baja y el área entre ésta y las juntas no se encuentra fisurado o bien hay alguna pequeña fisura.

**M (Mediano)** El fracturamiento es definido por una fisura de severidad moderada y el área entre ésta y las juntas se encuentra medianamente fisurada.

**A (Alto)** El fracturamiento es definido por una fisura de severidad alta y el área entre ésta y las juntas se encuentra muy fisurada o presenta hundimientos



**Figura 3.16. Fisura de esquina.<sup>90</sup>**

---

<sup>90</sup> Figura 3.16: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 28.

#### 4. Fisura Subdividida.

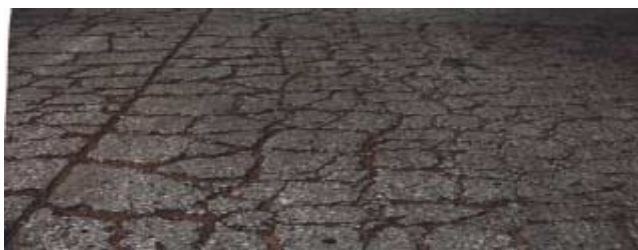
Fracturamiento de la losa de concreto conformando una malla amplia, combinando fisuras longitudinales, transversales y/o diagonales, subdividiendo la losa en cuatro o más planos.

Son originadas por la fatiga del concreto, provocadas por la repetición de elevadas cargas de tránsito y/o deficiente soporte de la fundación, que se traducen en una capacidad de soporte deficiente de la losa. Cuando no se toman medidas preventivas o correctivas oportunas, las "Losas Subdivididas" se degeneran en "Fisuras en Bloque".

Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano, Alto) en base a la severidad de las fisuras que detienen la malla y el número de paños en que queda dividida la losa, de acuerdo a la siguiente tabla:

**Tabla 3.2. Severidad de la fisura subdividida.<sup>91</sup>**

<b>Clase</b>	<b>Nivel de severidad De la fisura</b>	<b>No. De paños en que Se dividen la losa</b>
B	Baja	4 o 5
M	Mediano	De 6 a8
A	Alto	Más de 8



**Figura 3.17. Fisura subdividida.<sup>92</sup>**

<sup>91</sup> Tabla 3.2: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 29.

<sup>92</sup> Figura 3.17: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 29.

### **5. Fisura en bloque.**

Fracturamiento que subdividen generalmente una porción de la losa en planos o bloques pequeños de área inferior a un metro cuadrado.

Son causadas por la repetición de cargas pesadas (fatiga de concreto), el equivocado diseño estructural y las condiciones de soporte deficiente. Es la evolución final del proceso de fisuración, que comienza formando una malla más o menos cerrada; el tránsito y el continuo deflexionar de los planos aceleran la subdivisión en bloques más pequeños, favoreciendo el despostillamiento de sus bordes. De no tomarse medidas correctivas el deterioro progresa formando a corto plazo un bache. Pueden presentar diversas formas y aspectos, pero con mayor frecuencia son delimitados por una junta y una fisura.

Se establecen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) en base a la severidad de las fisuras que detienen la malla, de acuerdo con la siguiente guía:

**M (Mediano)** Bloques definidos por fisuras de severidad moderada; los planos son más pequeños evidenciándose un moderado despostillamiento de los bordes de las fisuras.

**A (Alto)** Bloques definidos por fisuras de severidad alta; los planos son más pequeños evidenciándose un severo despostillamiento de los bordes de las fisuras, con tendencia a formar bache.

**B (Bajo)** Bloques definidos por fisuras de severidad baja; los planos relativamente amplios y se mantienen ligados



**Figura 3.18. Fisura en bloque.<sup>93</sup>**

### **6. Fisuras Inducidas.**

Se incluyen bajo esta denominación un conjunto de fisuras de forma errática cuyo desarrollo en el pavimento es indicado por factores relativos a una inadecuada distribución de juntas o inapropiada inserción de estructuras u otros elementos dentro de las losas.

Cuando el arreglo de juntas en un carril no es respetado en el carril contiguo, es muy probable que induzcan o reflejen en éste, fisuras que den continuidad a las juntas existentes. Esta situación se presenta también con frecuencia cuando se ejecutan parchados y el diseño de sus bordes o juntas, sus dimensionamientos o inclusive distancias mínimas o juntas existentes, no son respetadas; eventualmente este fisuramiento puede continuar subdividiendo los planos resultantes identificándose este caso particularmente como "Fisuras en Bloques". Fisuras alrededor de estructuras pueden inducirse cuando no se proveen elementos de aislamiento que eviten restricción en el movimiento de las losas.

Se establecen tres niveles de severidad (bajo, mediano, alto) considerando ancho, condición y estado de los bordes de la fisura, de acuerdo con la siguiente guía:

**B (Bajo)** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras finas, no activas, de ancho promedio menor de 3 mm.

<sup>93</sup> Figura 3.18: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 30.

- Fisuras selladas de cualquier ancho, con el material de sello en condición satisfactoria.
- No hay signos visibles de despostillamiento y/o dislocamiento

**M (Mediano)** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras de ancho promedio entre 3 y 10 mm.
- Fisuras selladas, de cualquier ancho, con sello en condición satisfactoria.
- No hay signos visibles de despostillamiento y/o dislocamiento menor de 10 mm.

**A (Alto)** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras de ancho promedio mayor de 10 mm.
- Fisuras selladas o no, con despostillamiento severo y/o dislocamiento mayor de 10 mm.



**Figura 3.19. Fisura inducida.<sup>94</sup>**

### **7. Levantamiento de losas.**

Sobre-elevación abrupta de la superficie del pavimento, localizada generalmente en zonas contiguas a una junta o fisura transversal.

Son causadas por falta de libertad de expansión de las losas de concreto, las mismas que ocurren mayormente en la proximidad de las juntas transversales. La restricción a la expansión de las losas puede originar fuerzas de compresión considerables sobre el plano de la junta. Cuando estas fuerzas

<sup>94</sup> Figura 3.19: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 31.

no son completamente perpendiculares al plano de la junta o son excéntricas a la sección de la misma, pueden ocasionar el levantamiento de las losas contiguas a las juntas, acompañados generalmente por la rotura de estas losas. Según la incidencia en la comodidad de manejo, se diferencian tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) de acuerdo con la siguiente guía:

**M (Mediano)** Moderada incidencia en la comodidad de manejo, genera incomodidad y obliga a disminuir velocidad de circulación.

**B (Bajo)** Baja incidencia en la comodidad de manejo, apenas perceptible a velocidad de operación promedio.

**A (Alto)** El levantamiento causa un excesivo salto del vehículo, generando la pérdida de control del mismo, una sustancial incomodidad, y/o riesgo para la seguridad y/o daños al vehículo, siendo necesario reducir drásticamente la velocidad.



**Figura 3.20. Levantamiento de losas.<sup>95</sup>**

### **8. Dislocamiento.**

Es una falla provocada por el tránsito en la que una losa del pavimento a un lado de una junta presenta un desnivel con respecto a una losa vecina; también puede manifestarse en correspondencia con fisuras.

Es el resultado en parte del ascenso a través de la junta o grieta del material suelto proveniente de la capa inferior de la losa (en sentido de la circulación del tránsito) como también por depresión del extremo de la losa

<sup>95</sup> Figura 3.20: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 32.



posterior, al disminuir el soporte de la fundación. Son manifestaciones del fenómeno de bombeo, cambios de volumen que sufren los suelos bajo la losa de concreto y de una deficiente transferencia de carga entre juntas.

La severidad se determina en función del desnivel medido en correspondencia con las juntas, se diferencian tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) de acuerdo con la siguiente guía:

- a. **B (Bajo):** Diferencia de nivel de 3 a 10 mm.
- b. **M (Mediano):** Diferencia de nivel de 10 a 20 mm.
- c. **A (Alto):** Diferencia de nivel mayor de 20 mm.



**Figura 3.21. Dislocamientos.**<sup>96</sup>

### **9. Hundimiento.**

Depresión o descenso de la superficie del pavimento en un área localizada del mismo; puede estar acompañado de un fisuramiento significativo, debido al asentamiento del pavimento.

Este tipo de deformación permanente del pavimento, con o sin agrietamiento puede ocurrir cuando se producen asentamiento o consolidación en la subrasante, por ejemplo, en terraplenes cuando existen condiciones muy desfavorables para la fundación, o bien en zonas contiguas a una estructura de drenaje o de retención donde puede ocurrir el asentamiento del material de relleno por deficiente compactación inicial o bien por movimiento de la propia

---

<sup>96</sup> Figura 3.21: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 33.

estructura. También pueden ser originadas por deficiencias durante el proceso de construcción de las losas.

Siendo en general de gran longitud de onda, se pueden diferenciar tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) según su incidencia en la comodidad de manejo, de acuerdo con la siguiente guía:

**B (Bajo)** El hundimiento causa al vehículo un balanceo o salto característico, sin generar incomodidad.

**M (Mediano)** El hundimiento causa a los vehículos un significativo salto o balanceo, que genera incomodidad.

**A (Alto)** El hundimiento causa un excesivo salto que provoca una pérdida de control de los vehículos, siendo necesario recurrir a una reducción de velocidad.



**Figura 3.22. Hundimiento.**<sup>97</sup>

## **10. Descascaramiento y fisuras capilares.**

Descascaramiento es la rotura de la superficie de la losa hasta una profundidad del orden de 5 a 15 mm, por desprendimiento de pequeños trozos de concreto. Por fisuras capilares se refiere a una malla o red de fisuras superficiales muy finas, que se extiende solo a la superficie del concreto. Las mismas que tienden a intersectarse en ángulos de 120°.

---

<sup>97</sup> Figura 3.22: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 34.

Las fisuras capilares generalmente son consecuencia de un exceso de acabado del concreto fresco colocado, produciendo la exudación del mortero y agua, dando lugar a que la superficie del concreto resulte muy débil frente a la retracción. Las fisuras capilares pueden evolucionar en muchos casos por efecto del tránsito, dando origen al descascaramiento de la superficie, posibilitando un desconchado que progresa tanto en profundidad como en área. También pueden observarse manifestaciones de descascaramiento en pavimentos de concreto armado, cuando las armaduras se colocan muy próximas a la superficie.

Se diferencian tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) según el tipo de daño y el área de la losa afectada, de acuerdo con la siguiente guía:

**B (Bajo)** Fisuras capilares se extienden sobre toda la losa; la superficie se encuentra en buena condición sin descascaramiento.

**M (Mediano)** La losa evidencia descascaramiento, pero estas son de reducida área, afectando menos del 10% de la losa.

**A (Alto)** La losa evidencia descascaramiento en áreas significativas, afectando más del 10% de la losa.



**Figura 3.23. Descascaramiento y fisuras capilares.<sup>98</sup>**

## **11. Pulimiento de la superficie.**

Superficie de rodamiento excesivamente lisa por efecto del pulimiento de los agregados que la componen.

---

<sup>98</sup> Figura 3.23: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 35.

Esta deficiencia es causada principalmente por el tránsito, el mismo que produce el desgaste superficial de los agregados de naturaleza degradable, particularmente cuando el concreto es de calidad pobre y favorece la exposición de los mismos. Cuando el agregado en la superficie favorece la exposición de los mismos. Cuando el agregado en la superficie llega a ser muy suave al tacto, la adherencia con las llantas de los vehículos se reduce considerablemente. La reducción de la fricción o resistencia al deslizamiento, puede alcanzar niveles de riesgo para la seguridad del tránsito. El pulimiento de los agregados puede ser considerado cuando un examen de cerca revela que el número de contactos con el agregado sobre la superficie es muy reducido y este presenta una superficie suave al tacto.

No se definen niveles de severidad. El grado de pulimiento de la superficie debe ser significativo para ser informado.



**Figura 3.24. Pulimiento de la superficie.<sup>99</sup>**

## **12. Peladuras.**

Progresiva desintegración de la superficie del pavimento por pérdida de material fino desprendido de matriz arena-cemento del concreto, provocando una superficie de rodamiento rugosa y eventualmente pequeñas cavidades.

---

<sup>99</sup> Figura 3.24: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 36.

Son causadas por el efecto abrasivo del tránsito sobre concretos de calidad pobre, ya sea por el empleo de dosificaciones inadecuadas (bajo contenido de cemento, exceso de agua, agregados de inapropiada granulometría), o bien por deficiencias durante su ejecución (segregación de la mezcla, insuficiente densificación, curado defectuoso, etc.).

Se diferencian tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) según la magnitud de los desprendimientos, de acuerdo con la siguiente guía:

**B (Bajo)** Pequeñas peladuras muy superficiales, puntuales o concentradas en pequeñas áreas, como remiendos.

**M (Mediano)** Peladuras generalizadas, se extienden en la superficie dando lugar a una textura abierta, pero los desprendimientos se limitan a material fino, solo superficialmente.

**A (Alto)** Peladuras generalizadas, se extienden en la superficie dando lugar a una superficie muy rugosa, con desprendimiento de agregado grueso formando cavidades o pequeños baches superficiales.



**Figura 3.25. Peladuras.**<sup>100</sup>

### **13. Bache.**

Descomposición o desintegración la losa de concreto y su remoción en una cierta área, formando una cavidad de bordes irregulares.

---

<sup>100</sup> Figura 3.25: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 37.

Los baches se producen por conjunción de varias causas: fundaciones y capas inferiores inestables; espesores del pavimento estructuralmente insuficientes; defectos constructivos; retención de agua en zonas hundidas y/o fisuradas. La acción abrasiva del tránsito sobre sectores localizados de mayor debilidad del pavimento o sobre áreas en las que se han desarrollado fisuras en bloque, que han alcanzado un alto nivel de severidad, provoca la desintegración y posterior remoción de parte de la superficie del pavimento, originando un bache.

Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano, Alto) en función del área afectada y de la profundidad del bache, asociada ya sea a hundimientos como a la pérdida de material, de acuerdo a la siguiente tabla:

**Tabla 3.3. Severidad de los baches.<sup>101</sup>**

Profundidad Máxima (cm)	Diámetro Promedio del Bache (cm)		
	Menor a 70	De 70 a 100	Mayor a 100
Menor de 2.5	B	B	M
De 2.5 – 5.0	B	M	A
Mayor de 5.0	M	M	A



**Figura 3.26. Baches.<sup>102</sup>**

#### **14. Deficiencias en material de sello.**

Se refiere a cualquier condición que posibilite la acumulación de material en las juntas o permita una significativa infiltración de agua. La

<sup>101</sup> Tabla 3.3: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 38.

<sup>102</sup> Figura 3.26: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 38.

acumulación de material incompresible impide el movimiento de la losa, posibilitando que se produzcan fallas como levantamiento o despostillamientos de juntas.

Las causas más frecuentes para que el material de sello sea deficiente, son:

1. Endurecimiento por oxidación del material de sello.
2. Pérdida de adherencia con los bordes de las losas.
3. Levantamiento del material de sello por efecto del tránsito y movimientos de las losas.
4. Escasez o ausencia del material de sello.
5. Material de sello inadecuado.

Se diferencian tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) de acuerdo con la siguiente guía:

**B (Bajo)** El material de sello se encuentra en general en buena condición en toda la sección o muestra evaluada; pueden presentarse, pero solo en cantidad reducida, algunos de los defectos arriba indicados, pero no existe riesgo de infiltración de material incompresible.

**M (Mediano)** El material de sello se encuentra en general en condición regular, en toda la sección o muestra; uno o más defectos de la relación arriba indicados ocurren en grado moderado; el material de sello necesita ser reemplazado en un período de dos años.

**A (Alto)** El material de sello se encuentra en general en condición pobre, o bien no existe; en toda la sección o muestra, uno o más defectos de la relación arriba indicada ocurren con grado de severidad alto, las juntas requieren ser selladas o reselladas a la brevedad.



**Figura 3.27. Deficiencias en material de sello.<sup>103</sup>**

### **15. Despostillamiento.**

Rotura, fracturación o desintegración de los bordes de las losas dentro de los 0.60 metros de una junta o una esquina y generalmente no se extiende más allá de esa distancia. Además no se extiende verticalmente a través de la losa sino que intersectan la junta en ángulo.

Los despostillamientos se producen como consecuencia de diversos factores que pueden actuar aislada o combinadamente; excesivas tensiones en las juntas ocasionadas por las cargas del tránsito y/o por infiltración de materiales incompresibles; debilidad del concreto en la proximidad de la junta debido a un sobreacabado y excesiva disturbación durante la ejecución de la junta; deficiente diseño y/o construcción de los sistemas de transferencia de carga de la junta; acumulación de agua a nivel de las juntas.

Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) combinando el estado de las "piezas" que se forman por el fracturamiento en contacto con la junta, así como el ancho y longitud afectadas, de acuerdo con la siguiente guía:

**B (Bajo)** Pequeños fracturamientos, que no se extienden más de 8 cm a cada lado de la junta, dan lugar a pequeñas piezas que se mantienen bien firmes, aunque ocasionalmente algún pequeño trozo puede faltar.

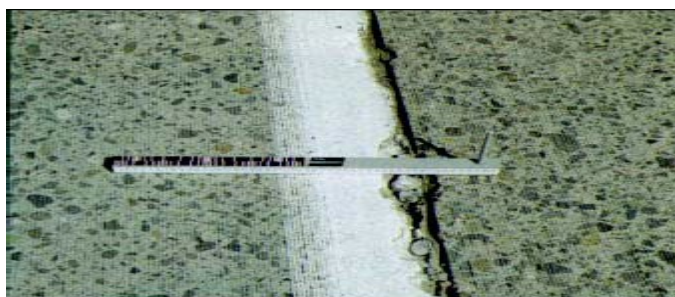
**M (Mediano)** Las fracturas se extienden a lo largo de la junta en más de 8 cm a cada lado de la misma, dando origen a piezas o trozos relativamente

<sup>103</sup> Figura 3.27: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 39.



sueltos, que pueden ser removidos; algunos o todos los trozos pueden faltar, pero su profundidad es menor de 25 mm.

**A (Alto)** Las fracturas se extienden a lo largo de la junta en más de 8 cm a cada lado de la misma, las piezas o trozos han sido removidos por el tránsito y tienen una profundidad mayor de 25 mm.



**Figura 3.28. Despostillamiento.**<sup>104</sup>

## **16. Fisuras por mal funcionamiento de juntas.**

Fisuras sinuosas aproximadamente paralelas a la junta, en algunos casos transversalmente y en forma de arcos erráticos, localizados muy próximas a las mismas.

La falta de verticalidad y la inadecuada inserción de los elementos empleados para inducir el corte de la junta, cortes poco profundos, excesiva disturbación durante la ejecución de las juntas son algunas causas frecuentes que provocan una fisura paralela muy próxima a las mismas (doble junta).

Típicamente, la colocación de barras pasadores mal alineados, el empleo de barras de insuficiente diámetro y/o longitud, o bien la corrosión de éstas, impiden el movimiento normal de las juntas, provocando fisuras próximas a la junta transversal, a una distancia de 0.20 a 0.40 metros.

<sup>104</sup> Figura 3.28: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 40.

Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) según las características de las fisuras y el estado del pavimento entre éstas y la junta correspondiente, de acuerdo con la siguiente guía:

**B (Bajo)** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras finas bien delgadas, de ancho menos de 3 mm.
- Fisuras selladas de cualquier ancho, con sello en condición satisfactoria; no hay signos visibles de despostillamiento y/o dislocamiento.

**M (Mediano)** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras de ancho promedio de 3 a 10 mm.
- Fisuras hasta 10 mm con despostillamiento y/o dislocamiento hasta 10 mm.
- Fisuras selladas de cualquier ancho, con sello en condición insatisfactoria.
- Por despostillamiento, el área entre la fisura y la junta ha comenzado a fracturarse en trozos pequeños.

**A (Alto)** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras de ancho promedio mayor de 10 mm.
- Fisuras, selladas o no, con despostillamiento y/o dislocamiento mayor de 10 mm.
- El área entre las fisuras y la junta se ha fracturado en trozos pequeños que se encuentran sueltos y/o removidos por el tránsito.

La Tabla 3.4 contiene posibles tipos de deterioros o fallas en pavimentos de concreto e indica si son fallas estructurales o funcionales y si son deterioros de carga asociada ó carga no asociada. Las fallas estructurales están asociadas con la habilidad del pavimento de transportar las cargas de diseño, mientras que las fallas funcionales están asociadas con la seguridad y la calidad de la carretera.

Cuando la falla estructural aumenta en severidad, ésta también siempre resulta como una falla funcional. Los deterioros de cargas no asociadas son causados por el clima, materiales o construcción defectuosos. Los deterioros de cargas no asociadas pueden ser aumentados en severidad por las cargas de tráfico.

**Tabla 3.4. Deterioros en Pavimentos de Concreto.<sup>105</sup>**

<b>Tipos de Deterioros</b>	<b>Estructural</b>	<b>Funcional</b>	<b>Carga Asociada</b>	<b>Carga No Asociada</b>
Fisura Transversal o Diagonal	<b>x</b>		<b>x</b>	<b>x</b>
Fisuras Longitudinal		<b>x</b>		<b>x</b>
Fisura de Esquina	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	
Fisura Subdividida	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
Fisura en Bloque	<b>x</b>	<b>x</b>		<b>x</b>
Fisuras Inducidas	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
Levantamiento de Losas	<b>x</b>	<b>x</b>		<b>x</b>
Dislocamiento	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	
Descascaramiento y fisuras capilares	<b>x</b>	<b>x</b>		<b>x</b>
Pulimiento de la Superficie	<b>x</b>	<b>x</b>		<b>x</b>
Peladuras	<b>x</b>	<b>x</b>		<b>x</b>
Bache	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	
Deficiencias en Material de Sello	<b>x</b>	<b>x</b>		<b>x</b>
Despostillamiento	<b>x</b>		<b>x</b>	
Fisuras por mal Funcionamiento de Juntas	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>

<sup>105</sup> Tabla 3.4: Cap. 9 Paviment Performance, Distress. Yang Huang. Pag. 426.

# **CAPITULO 4**

## **ANÁLISIS ESTRUCTURAL, PREDICCIÓN DE DESEMPEÑO MECANICISTA-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES NUEVOS**

## **4.1 MODELO Y RESPUESTA DE COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL.**

### **4.1.1 INTRODUCCIÓN.**

El método de diseño mecanicista esta basado en la mecánica de los materiales, la carga de las llantas que se utilizan como una entrada de datos dando como salida de datos o respuesta del pavimento los esfuerzos o tensión.

Los valores de la respuesta son usados para predecir deterioros basados en pruebas de laboratorio y datos desarrollados en campo. La dependencia sobre los comportamientos observados es necesaria ya que una teoría por si sola no demuestra lo suficiente para diseñar pavimentos.

Kerkhoven y Dormon (1953) fueron los primeros en sugerir el uso de esfuerzos de compresión vertical sobre la superficie de la subrasante como un criterio de falla para reducir las deformaciones permanentes. Así, Saal y Pell (1960) recomendaron el uso de esfuerzos de tensión horizontales en el fondo de la capa de asfalto para minimizar las fracturas por fatiga. El uso de estos conceptos para el diseño de pavimentos fue el primero presentado en los Estados Unidos por Dormon y Metcalf (1965).

El uso de esfuerzos de compresión vertical para controlar la deformación permanente esta basado en el hecho de que los esfuerzos plásticos son proporcionales a los esfuerzos elásticos en los materiales para pavimentos. Por lo tanto para limitar los esfuerzos elásticos sobre las subrasante, los esfuerzos sobre otros componentes de la subrasante deberán ser controlados.

De ahí que la magnitud de la deformación permanente sobre la superficie del pavimento también puede ser controlada. Estos dos criterios han sido adoptados desde entonces por la Petrolera Internacional Shell (Claussen 1977) y el Instituto del Asfalto (Shook 1982) y sus métodos de diseño mecanicista-empíricos. Las ventajas del método mecanicista son los mejoramientos en el diseño de rehabilitación, la habilidad de predecir los tipos de fallas y la factibilidad para extrapolar desde los datos limitados del campo y laboratorio.

#### **4.1.2 TEORÍA DEL SEMI-ESPACIO ELÁSTICO DE BOUSSINESQ.**

La manera más simple de abordar el diseño de un pavimento asfáltico o flexible es mediante la teoría del semi-espacio elástico de Boussinesq, muy conocida en Mecánica de Suelos. De acuerdo a esta teoría, el suelo es un medio elástico, homogéneo e isotrópico, limitado en superficie por un plano horizontal y que se extiende desde allí hacia abajo en forma infinita.

Las deformaciones que sufre el pavimento por las cargas de tránsito son prácticamente elásticas, es decir, casi totalmente recuperables una vez cesa la carga dinámica debida al tránsito. Además, el tiempo de aplicación de la carga es muy pequeño. En efecto, a una velocidad de 60 Km/h, la carga recorre 20 cm. en 1/100 s. Para cargas lentas o estáticas hay fenómenos de creep, por lo que es necesario considerar las propiedades reológicas de los materiales.

Se debe recordar que para los materiales no ligados y suelos finos, los módulos de deformación no son constantes como propone la teoría de elasticidad lineal, sino dependientes de las tensiones actuantes, por lo que el análisis tenso deformacional de un paquete estructural debe hacerse mediante modelos elásticos no lineales (métodos mecanicistas).

### 4.1.3 MASA HOMOGÉNEA.

La forma más simple para caracterizar el comportamiento de un pavimento flexible bajo las cargas de las llantas es considerada como un semi-espacio homogéneo. Un semi-espacio tiene un área larga infinita y una profundidad infinita con un plano en la parte superior sobre la cual las cargas son aplicadas.

La teoría original de Boussinesq (1885) fue basado en la concentración de una carga aplicada sobre un semi-espacio elástico. Los esfuerzos, tensiones y deflexiones son debido a la concentración de carga que pueden ser integrados para obtener esas esperadas áreas circulares cargadas. Antes del desarrollo de la teoría de Burmister (1943) de capas, la mayoría de la atención fue puesta en las soluciones de Boussinesq porque eran las únicas disponibles. La teoría puede ser usada para determinar los esfuerzos, tensiones y deflexiones en la subrasante si la relación de los módulos entre los pavimentos y la subrasante es cerca de la unidad el cual es ejemplificado por una superficie delgada de asfalto y una base granular delgada. Si la relación de los módulos es mayor a la unidad, la ecuación debe ser modificada, tal como ha sido demostrada por el método de diseño de Kansas (1947).

La Figura 4.1 muestra un semi-espacio sometidos a una carga circular con un radio  $a$  y una presión uniforme  $q$ , el semi-espacio tiene un módulo elástico  $E$  y una relación de Poisson  $\nu$ . Un pequeño elemento cilíndrico con centro a una distancia  $z$  abajo de la superficie y  $r$  desde el eje de simetría. Debido a los ejes simétricos, hay solamente tres esfuerzos normales:  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$  y  $\sigma_t$  y un esfuerzo cortante  $\tau_{rz}$  el cual es igual a  $\tau_{zr}$ . Estos esfuerzos son funciones de  $q$ ,  $r/a$  y  $z/a$ .

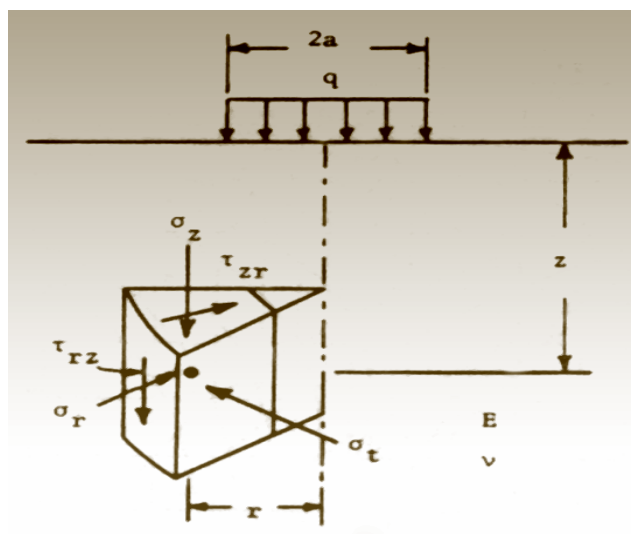


Figura 4.1. Componentes de Esfuerzos bajo cargas de ejes simétricos.<sup>106</sup>

#### 4.1.4 SISTEMA DE CAPAS.

Los pavimentos son un sistema de capas con los mejores materiales en la parte superior y no pueden ser representados por una masa homogénea, así el uso de la teoría de capas de Burmister es la más apropiada. El primer desarrollo de soluciones de Burmister (1943) fue para un sistema de dos capas y luego fue extendido a un sistema de tres capas (1945). Con la ventaja de las computadoras, la teoría puede ser aplicada a un sistema múltiple de capas con cualquier número de capas (Huang 1967, 1968).

La Figura 4.2 muestra un sistema de  $n$  capas. Las funciones básicas para ser satisfactorias son:

- Cada capa es homogénea, isotrópica y linealmente elástica con un módulo elástico  $E$  y un módulo de Poisson  $\nu$ .
- El material es sumamente pesado e infinito en un área extendida.

<sup>106</sup> Figura 4.1: Pavement Analysis and Design. Pág. 49.



- Cada capa tiene una delgadez finita  $h$ , pero las capas mas profundas son infinitas en espesor.
- Una presión uniforme  $q$  es aplicada sobre la superficie a través de una área circular de radio  $a$ .
- Las condiciones de continuidad son satisfactorias en los puntos de contactos de las capas como se indica por el mismo esfuerzo vertical, esfuerzo de cortante, desplazamiento vertical y desplazamiento radial. Para los puntos de contactos friccionantes, la continuidad del esfuerzo de cortante y desplazamiento radial es remplazado por el esfuerzo cortante cero a cada lado de los puntos de contactos.

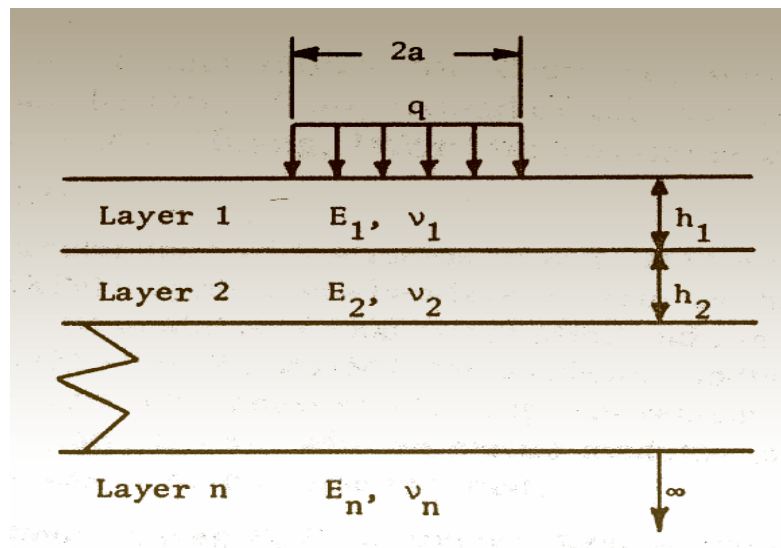


Figura 4.2. Sistema de n capas sujeto a carga circular.<sup>107</sup>

#### 4.1.5 SISTEMAS DE DOBLE CAPA.

El caso exacto de un sistema de doble capa es la construcción de profundidad completa en el cual una capa delgada de HMA (mezcla asfáltica en

<sup>107</sup> Figura 4.2: Pavement Analysis and Design. Pág. 61.

caliente) es colocada directamente sobre la subrasante. Si un pavimento esta compuesto de tres capas: Una superficie de asfalto, una base granular y una subrasante, es necesaria combinar la base y la subrasante en una capa simple para calcular los esfuerzos y tensiones en la capa de asfalto ó combinar la superficie de asfalto con la base para calcular los esfuerzos y tensiones en la subrasante.

#### **4.1.5.1 ESFUERZO VERTICAL.**

El esfuerzo vertical en lo alto de la subrasante es un factor importante en el diseño de pavimentos. La función de un pavimento es reducir el esfuerzo vertical sobre la subrasante para que no ocurran deformaciones perjudiciales en el pavimento. Permitir esfuerzos verticales sobre una subrasante dada, depende del modulo de resistencia en la subrasante. Para combinar los efectos de resistencia y esfuerzo, el esfuerzo vertical de compresión ha sido utilizado más frecuentemente en un criterio de diseño.

Esta simplificación es valida para auto pistas y pavimentos de aeropuerto por que la tensión vertical es causada primordialmente por el esfuerzo vertical y el efecto del esfuerzo horizontal es relativamente pequeño.

Los esfuerzos en un sistema de doble capa dependen de la relación de los módulos  $E_1/E_2$  y la relación de espesor-radio  $h_1/a$ . La Figura 4.3 muestra el efecto de la capa de pavimento sobre la distribución de esfuerzos verticales bajo el centro de un área circular cargada.

Esta carta es aplicada al caso cuando el espesor  $h_1$  de la capa uno es igual al radio de capa de contacto ó  $h_1/a=1$  (el modulo de Poisson es de 0.5 para todas las capas).

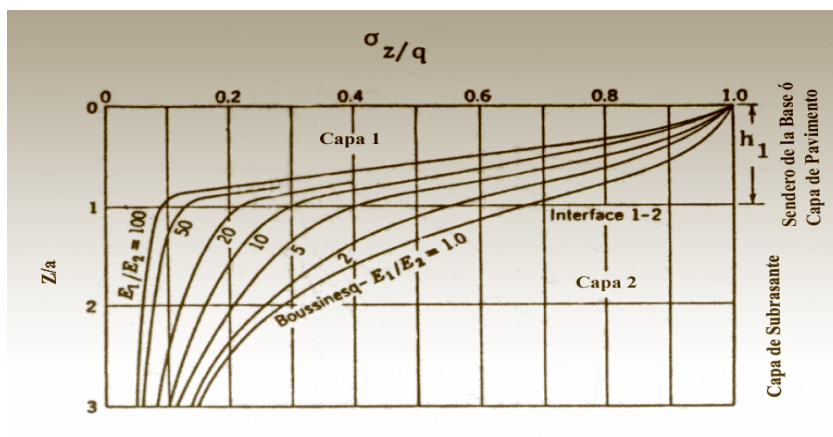


Figura 4.3. Distribución de Esfuerzos Verticales en un sistema de doble capa.<sup>108</sup>

La Figura 4.4 muestra el efecto del espesor de pavimento y la relación de los módulos sobre el esfuerzo vertical  $\sigma_c$  en el punto de contacto pavimento-subrasante bajo el centro de un área circular cargada. Para una presión aplicada  $q$  el esfuerzo vertical incrementa con el aumento del radio de contacto y decrece con el aumento del espesor. La razón que la relación  $a/h_1$  fue usada en vez de  $h_1/a$  fue con el propósito de preparar las cartas de influencia (Huang 1969) para fundaciones elásticas de dos capas.

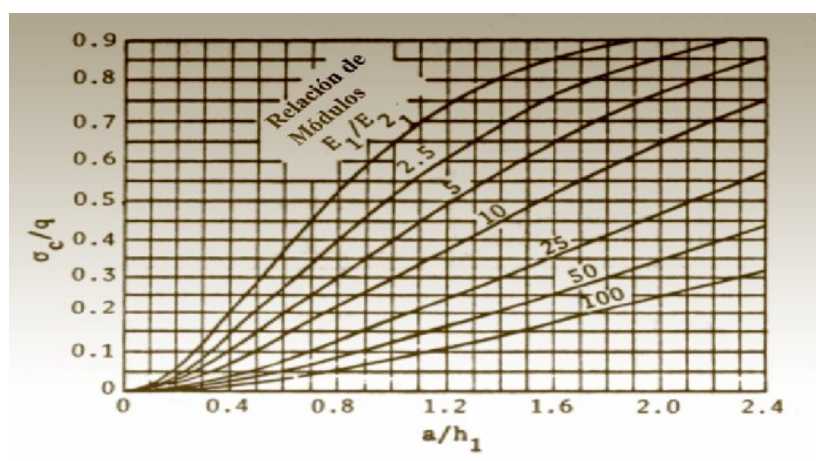


Figura 4.4. Puntos de Contacto de esfuerzos verticales en un sistema de doble capa.<sup>109</sup>

<sup>108</sup> Figura 4.3: Pavement Analysis and Design. Pág. 62.

<sup>109</sup> Figura 4.4: Pavement Analysis and Design. Pág. 62.

#### 4.1.5.2 DEFLEXIÓN VERTICAL DE LA SUPERFICIE.

Las deflexiones verticales en la superficie han sido usadas como un criterio de diseño del pavimento. La Figura 4.5 puede ser usada para determinar la deflexión de la superficie de un sistema de dos capas. La deflexión es expresada en términos del factor de deflexión  $F_2$  por:

$$w_0 = \frac{1.5qa}{E_2} F_2 \quad (4.1)$$

El factor de flexión es una función de  $E_1/E_2$  y  $h_1/a$ . Para un semi-espacio homogéneo con  $h_1/a=0$  y  $F_2=0$  y  $\nu=0$  la ecuación es la siguiente:

$$w_0 = \frac{2(1-\nu^2)qa}{E} \quad (4.2)$$

Si la carga es aplicada por una placa rígida, entonces la ecuación es:

$$w_0 = \frac{1.18qa}{E_2} F_2 \quad (4.3)$$

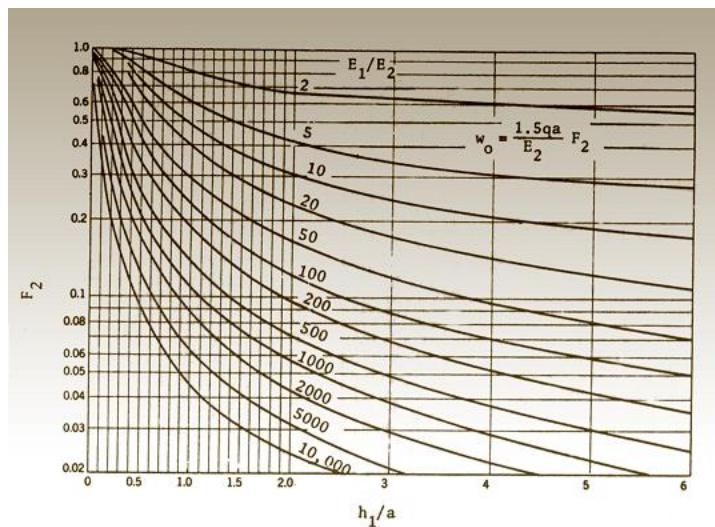


Figura 4.5. Deflexión Vertical en la superficie en un sistema de doble capa<sup>110</sup>

<sup>110</sup> Figura 4.5: Pavement Analysis and Design. Pág. 64.

#### 4.1.5.3 DEFLEXIÓN VERTICAL EN EL PUNTO DE CONTACTO DE LAS DOS CAPAS.

La deflexión vertical ha sido utilizada también como criterio de diseño para pavimentos. Varias cartas pueden ser utilizadas también para determinar la deflexión en el punto de contacto en un sistema de doble capa (Huang 1969). La deflexión es expresada en términos del factor de deflexión  $F$  así:

$$w = \frac{qa}{E_2} F \quad (4.4)$$

Nótese que el factor  $F$  es diferente de  $F_2$  por un factor de 1.5. El factor de deflexión es una función de  $E_1/E_2$ ,  $h_1/a$  y  $r/a$  donde  $r$  es la distancia radial del centro del área cargada. Siete juegos de cartas con relación de módulos de 1, 2.5, 5, 10, 25, 50 y 100 se muestran a continuación, así la deflexión de algún valor intermedio de la relación de módulos puede encontrarse haciendo una interpolación. En el caso de  $E_1/E_2=1$ , se utiliza la solución de Boussinesq.

#### **Esfuerzos de tensión crítica.**

Los esfuerzos de tensión crítica en el fondo de la capa de asfalto han sido usados como un criterio para prevenir fatigas por grietas. Dos tipos de esfuerzos de tensión principal pueden ser considerados:

1. El esfuerzo de tensión principal basado en los seis componentes de los esfuerzos normal y esfuerzos de cortante.
2. El esfuerzo de tensión principal basado en los esfuerzos normal horizontal y esfuerzos de cortante solamente.

Huang (1973) desarrolló cartas para determinar los esfuerzos de tensión críticos en el fondo de la capa uno para un sistema de doble capa. El esfuerzo de tensión crítica es el esfuerzo principal y puede ser determinado así:

$$e = \frac{q}{E_1} F_e \quad (4.5)$$

Donde:

$e$ : es el esfuerzo de tensión crítico y

$F_e$ : Es el factor de esfuerzo el cual puede ser determinado de las cartas.

*Llantas Simples.*

La figura 4.6 representa el factor de esfuerzo de un sistema de doble capa bajo un área circular cargada. En la mayoría de los casos, el esfuerzo de tensión crítico ocurre bajo el centro del área cargada donde el esfuerzo de cortante es cero. Sin embargo, cuando  $h_1/a$  y  $E_1/E_2$  son pequeños, el esfuerzo de tensión crítico ocurre a la misma distancia del centro debido a los efectos predominantes del esfuerzo de cortante. Bajos estas situaciones, el esfuerzo de tensión principal a distancias radiales de 0,  $0.5a$ ,  $a$  y  $1.5a$ , fueron calculadas desde el centro y el valor crítico fue obtenido y dibujado de la figura 4.6.

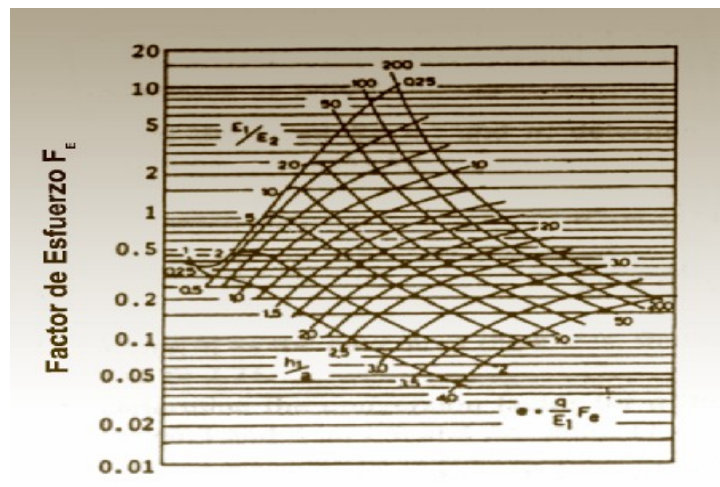


Figura 4.6. Factor de Esfuerzo para Llanta Simple.<sup>111</sup>

<sup>111</sup> Figura 4.6: Pavement Analysis and Design. Pág. 68.

### Llantas Dobles.

El factor de esfuerzo para llantas duales con un radio de contacto  $a$  y un espaciamiento dual  $S_d$  depende de  $S_d/a$  en adición a  $E_1/E_2$  y  $h_1/a$  en la cual, la mayor parte del método directo es para presentar cartas similares a las de la Figura. 4.7, una para cada valor de  $S_d/a$ . Sin embargo, esto requiere una serie de cartas y la interpolación podría consumir mucho tiempo. Para evitar estas dificultades, fue desarrollado un método único que requiere solamente una carta que es mostrada en la Figura. 4.7.

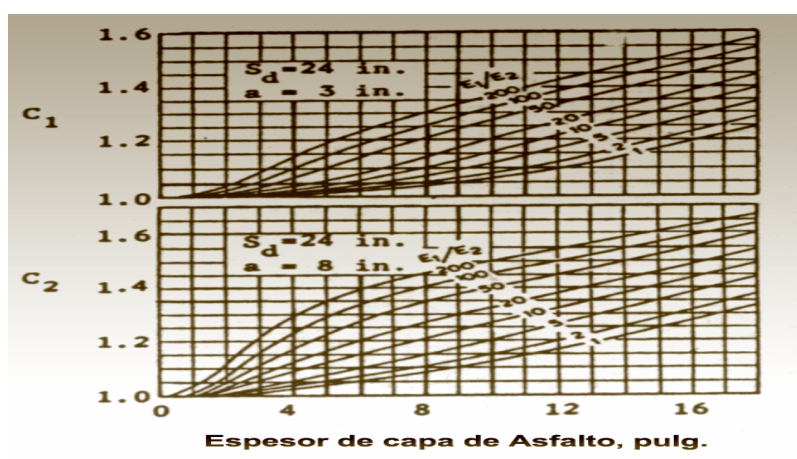


Figura 4.7. Factores de Conversión para Llanta Doble.<sup>112</sup>

En este método, las llantas dobles son reemplazadas por llantas simples con el mismo radio de contacto  $a$  así como en la Figura. 4.7 que puede ser usada todavía. Debido a que el factor de esfuerzo para llantas dobles es generalmente más grande que para el de llantas simples, un factor de conversión  $C$ , el cual es la relación entre los factores de esfuerzos de llantas dobles y simples debe ser determinado. El producto del factor de conversión por el factor de esfuerzos obtenido de la Figura. 4.7 producirá el factor de esfuerzos para llantas dobles.

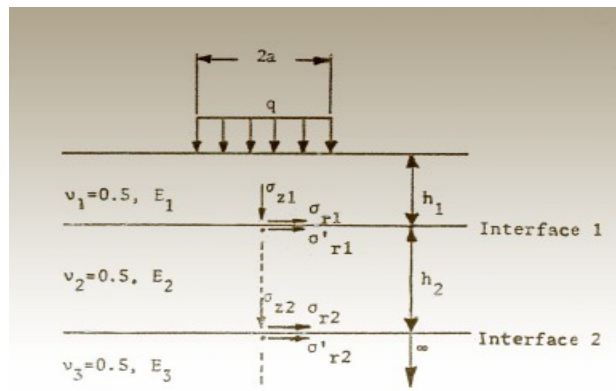
La teoría de capas dobles indica que el factor de esfuerzo para llantas dobles depende de  $E_1/E_2$ ,  $h_1/a$  y  $S_d/a$ . A lo largo de las relaciones entre  $h_1/a$  y

<sup>112</sup> Figura 4.7: Pavement Analysis and Design. Pág. 70.

$S_d/a$  no cambian, el factor de esfuerzos será el mismo, no importa que tan largo o pequeño pueda ser el radio de contacto  $a$ .

#### 4.1.6 SISTEMAS DE TRES CAPAS.

La Figura. 4.8 muestra a un sistema de tres capas y los esfuerzos en los puntos de contactos en los ejes de simetría. Estos esfuerzos incluyen esfuerzo vertical en el punto de contacto 1:  $\sigma_{z1}$ , esfuerzo vertical en el punto de contacto 2:  $\sigma_{z2}$ , esfuerzo radial en el fondo de la capa 1:  $\sigma_{r1}$ , esfuerzo radial en lo alto de la capa 2:  $\sigma'_{r1}$ , esfuerzo radial en el fondo de la capa 2:  $\sigma_{r2}$  y esfuerzo radial en lo alto de la capa 3:  $\sigma'_{r2}$ . Nótese que sobre los ejes de simetría, los esfuerzos tangencial y radial son idénticos y el esfuerzo de cortante es igual a cero.



**Fig. 4.8. Esfuerzos en las interfaces en un sistema de tres capas.**<sup>113</sup>

Cuando la relación de Poisson es igual a 0.5 tenemos:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \sigma_r) \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2E}(\sigma_r - \sigma_z)$$

Las ecuaciones anteriores indican que el esfuerzo radial equivale a la mitad del esfuerzo vertical y es de signo opuesto:

<sup>113</sup> Figura 4.7: Pavement Analysis and Design. Pág. 74.



$$\varepsilon_z = -2\varepsilon_r \quad (4.7)$$

La ecuación 4.7, puede ser visualizada físicamente desde el hecho que cuando un material es incompresible con una relación de Poisson de 0.5, el esfuerzo horizontal es igual a la mitad del esfuerzo vertical y la sumatoria de  $\varepsilon_z$ ,  $\varepsilon_r$  y  $\varepsilon_t$  deben ser igual a cero.

## **4.2      MODELOS DE PREDICCIÓN DE FALLAS ESTRUCTURALES.**

### **4.2.1    INTRODUCCIÓN.**

Los modelos de deterioro son algunas veces llamadas funciones de transferencias los cuales relacionan la respuesta estructural con los distintos tipos de deterioros o fallas. Los modelos de deterioro son el punto débil en el método mecanicista-empírico, verificaciones y calibraciones en campo muy costosas han sido necesitadas para establecer confianza en las predicciones de deterioros.

Las funciones de transferencias utilizadas para la fatiga en la HMA (mezcla asfáltica en caliente) y ahuellamiento en la subrasante están disponibles, pero las funciones para el ahuellamiento de HMA y materiales granulares son marginales y requieren un desarrollo adicional. El Reporte 1-26 indicaba que el uso de “ahuellamiento estimado” concepto desarrollado por la Universidad del Estado de Ohio (Majidzadeh, 1976), parece ser muy prometedor porque puede ser aplicado para todos los materiales de pavimento incluyendo HMA, materiales granulares y suelos de material fino.

Debido a que el ahuellamiento es la mayor causa de deformación permanente sobre pavimentos de alto tráfico con HMA densas, el proceso de diseño puede ser simplificado chequeando el ahuellamiento potencial después que el diseño de espesor esta completo. Si es insatisfactorio, la selección de diferentes procesos de diseño y de prácticas de mezclas debe ser hecha hasta que la profundidad de la huella es reducida a un límite aceptable.

#### **4.2.2 MODELOS DE GRIETAS POR FATIGA.**

El concepto del daño acumulado de Miner (1945) ha sido extensamente usado para predecir grietas por fatiga. Es generalmente acordado que el número permitido de repetición de cargas está relacionado al esfuerzo de tensión en el fondo de la capa de asfalto. El aumento de daño es expresado como una relación de daño el cual es la relación entre lo predicho y la repetición del número de cargas permitidas. El daño ocurre cuando la sumatoria de la relación de daños alcanza el valor de 1. Si el promedio de los valores de parámetros son usados para el diseño, un promedio de daño de 1 indica que la probabilidad de falla es de 50% ó que el 50% del área experimentará fractura por fatiga. Asumiendo la relación de daño para ser un registro de distribución normal, la probabilidad de falla ó el porcentaje de área agrietada, puede ser calculado o chequeado con comportamientos en el campo.

La mayor diferencia en los varios métodos de diseño es la función de transferencia, la cual relaciona el esfuerzo de tensión de la HMA a la repetición de cargas permitidas. En los métodos de diseño del Instituto del Asfalto y Shell, el número de cargas repetidas  $N_f$  que causa las grietas por fatiga, está relacionado al esfuerzo de tensión  $\epsilon_t$  al fondo de la HMA y al módulo  $E_1$  de la HMA así:

$$N_f = f_1(\epsilon_t)^{-f_2} (E_1)^{-f_3} \quad (4.8)$$

Para la mezcla estándar usada en el diseño, la ecuación del Instituto del Asfalto para un 20% del área agrietada es:

$$N_f = 0.0796(\varepsilon_t)^{-3.291} (E_1)^{-0.854} \quad (4.9)$$

Y para el método Shell, la ecuación es la siguiente:

$$N_f = 0.0685(\varepsilon_t)^{-5.671} (E_1)^{-2.363} \quad (4.10)$$

Debido a que el exponente  $f_2$  es mucho mayor que el de  $f_3$ , el efecto de  $\varepsilon_1$  sobre  $N_f$  es mucho mayor que el de  $E_1$ . Por lo tanto, el término  $E_1$  puede ser obviado:

$$N_f = f_1(\varepsilon_t)^{-f_2} \quad (4.11)$$

La ecuación anterior ha sido usada por varias Instituciones como son:

- El Departamento de Transporte de Illinois (Thompson, 1987):

$$N_t = 5 \times 10^{-6} (\varepsilon_t)^{-3.0} \quad (4.12)$$

- El Laboratorio de Investigación de Camino y Transporte (Powell, 1984):

$$N_t = 1.66 \times 10^{-10} (\varepsilon_t)^{-4.32} \quad (4.13)$$

- El Centro de Investigación Belga de Caminos (Verstraeten, 1982):

$$N_t = 4.92 \times 10^{-14} (\varepsilon_t)^{-4.76} \quad (4.14)$$

Se ha visto que el exponente  $f_2$  de las ecuaciones de fatiga varía de 3.0 a 5.671, pero el coeficiente  $f_1$  varía a través de varias órdenes de magnitud desde  $5 \times 10^{-6}$  a  $4.92 \times 10^{-14}$ . Los exponentes  $f_2$  y  $f_3$  son usualmente determinados de las pruebas de fatiga en los especímenes de laboratorio, el cual  $f_1$  debe cambiar de valores de laboratorio a valores de campo por medio de la calibración. Pell (1987) indicó que el factor de cambio puede variar de 5 a 700. Debido a las

diferencias en los materiales, métodos de prueba, condiciones de campo y modelos estructurales, se espera una larga variedad de funciones de transferencia.

No importa que funciones de transferencia es usada pero si es importante calibrar cuidadosamente la función aplicando un apropiado factor de cambio hasta que el deterioro predicho pueda cambiar con las observaciones de campo.

Las ecuaciones usadas en el PDMAP (modelo probabilístico que utiliza la variación estadística de las características de los materiales y sus ecuaciones están basadas en las Pruebas Viales de AASHTO) para la predicción de un número permitido de repetición de cargas cuando las grietas ocurren entre el 10 y el 45% del área de contacto de la llanta son (Finn 1986):

$$\begin{aligned} \log N_f (10\%) &= 15.947 - 3.291 \log\left(\frac{e_t}{10^{-6}}\right) - 0.894 \log\left(\frac{E_1}{10^3}\right) \\ \log N_f (45\%) &= 16.086 - 3.291 \log\left(\frac{e_t}{10^{-6}}\right) - 0.894 \log\left(\frac{E_1}{10^3}\right) \end{aligned} \quad (4.15)$$

Donde  $N_f$  es el número permitido de repeticiones para las grietas por fatiga,  $e_t$  es el esfuerzo de tensión horizontal en el fondo de la capa de asfalto en pulg./pulg. y  $E_1$  es el modulo resiliente de la capa de asfalto en psi. La primera ecuación es un criterio del Instituto del Asfalto presentado en una diferente forma y al 45% del área en el punto de contacto de la llanta, es equivalente alrededor del 20% del área total.

### 4.2.3 MODELOS DE AHUELLAMIENTO.

Dos procesos han sido usados para limitar el ahuellamiento: Una es para limitar el esfuerzo de compresión en lo alto de la subrasante y el otro es

para limitar la deformación permanente total acumulada en la superficie del pavimento basado en las propiedades de deformación permanente de cada capa.

En los métodos de diseño del Instituto del Asfalto y Shell, el número de repeticiones de carga permitidas  $N_d$  para limitar el ahuellamiento esta relacionado al esfuerzo de compresión vertical  $\varepsilon_c$  en lo alto de la subrasante por:

$$N_d = f_4 (\varepsilon_c)^{-f_5} \quad (4.16)$$

La ecuación anterior es usada por varias agencias con los valores de  $f_4$  y  $f_5$  mostrados en la Tabla 4.1:

**Tabla 4.1. Criterio de esfuerzo de subrasante usado por varias agencias <sup>114</sup>**

<b>Agencia</b>	$f_4$	$f_5$	<b>Profundidad de la huella (pulg.)</b>
Instituto del Asfalto	1.365x10 <sup>-9</sup>	4.47 7	0.5
Shell (revisado en 1985)			
50% rehabilitado	6.15x10 <sup>-7</sup>	4.0	
85% rehabilitado	1.94x10 <sup>-7</sup>	4.0	
95% rehabilitado	1.05x10 <sup>-7</sup>	4.0	
Laboratorio de Investigación de Caminos y Transporte de Reino Unido (85% rehabilitado)	6.18x10 <sup>-8</sup>	3.95	0.4
Centro de Investigación Belga de Caminos	3.05x10 <sup>-9</sup>	4.35	

En el método de esfuerzo en la subrasante, si es asumido que el esfuerzo de compresión de la subrasante es controlado, es lógico que la profundidad de la huella en la superficie no será excedida. Por ejemplo, el diseño por el método del Instituto del Asfalto no se espera tener una huella con profundidad mayor de 12.7 mm. (0.5 pulg.) y para el diseño por el

<sup>114</sup> Tabla 4.1: Flexible Pavement Design. Cap. 11. Pág. 540.

procedimiento del Laboratorio de Investigación de Caminos y Transporte de Reino Unido, no se espera también tener una profundidad de huella menor a 10.2 mm. (0.4 pulg.).

El método Shell tiene un proceso sugerido para la estimación de la deformación permanente mostrado por la siguiente ecuación:

$$\text{Profundidad de Huella} = C_m h_1 \left( \frac{\sigma_{av}}{S_{mezcla}} \right) \quad (4.17)$$

Donde:

$C_m$ : Factor de corrección para efectos dinámicos.

$h_1$ : Espesor de la capa de asfalto.

$\sigma_{av}$ : Esfuerzo vertical promedio en la capa de asfalto.

$S_{mezcla}$ : Modulo de tiesura de la mezcla.

Sin tales procesos, el ahuellamiento de la HMA puede ser tratado por el mejoramiento de la selección de los materiales y el diseño de la mezcla.

Bajo un tráfico pesado con HMA más denso, la mayoría de la deformación permanente ocurre en la HMA más que en la subrasante. Debido que el ahuellamiento es causado por la acumulación de de deformaciones permanentes sobre todas las capas, es más razonable determinar la deformación permanente en cada capa y hacer la sumatoria de todos los resultados así:

$$PD_{Total} = PD_{AC} + PD_{GB} + PD_{SG} \quad (4.18)$$

Donde:

PD: Deformación del Pavimento.

AC: Concreto Asfáltico.

GB: Base Granular.

SG: Subrasante.

Hay muchos métodos disponibles para determinar la profundidad de la huella. El método VESYS esta basado en la presunción de que la tensión permanente es proporcional a la tensión resiliente así:

$$\varepsilon_p(N) = \mu \varepsilon N^{-\alpha} \quad (4.19)$$

En la ecuación anterior  $\varepsilon_p(N)$  es la tensión permanente ó plástica debido a la aplicación de una carga simple de  $N$  ava aplicación;  $\varepsilon$  es el esfuerzo elástico ó resiliente a la ducentésima repetición;  $N$  es el número de la aplicación de carga;  $\mu$  es un parámetro de deformación permanente que representa la constante de proporcionalidad entre la tensión permanente y la tensión elástica;  $\alpha$  es el parámetro de deformación permanente que indica el valor de disminución en la deformación permanente como el número de incremento de cargas aplicadas. La deformación permanente total puede ser obtenida por la integral siguiente:

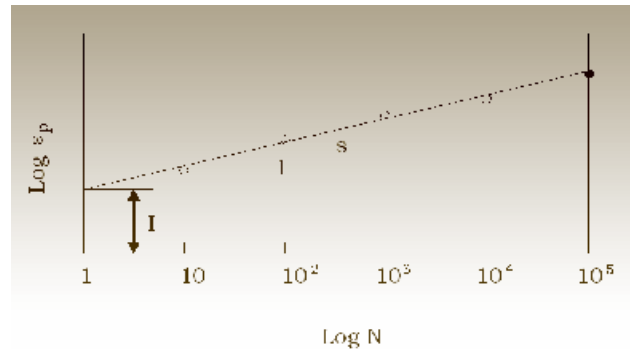
$$\begin{aligned} \varepsilon_p &= \int_0^N \varepsilon_p(N) dN \\ &= \varepsilon \mu \frac{N^{1-\alpha}}{1-\alpha} \end{aligned} \quad (4.20)$$

La ecuación anterior indica que un diagrama del  $\log \varepsilon_p$  versus  $\log N$  resulta en una línea continua mostrada en la figura 4.8. De la ecuación 4.20, se tiene:

$$\log \varepsilon_p = \log \left( \frac{\varepsilon \mu}{1-\alpha} \right) + (1-\alpha) \log N \quad (4.21)$$

Así, la pendiente de la línea continua  $S = 1 - \alpha$  ó  $\alpha = 1 - S$ .

El intercepto a  $N=1$ ,  $I = \frac{\varepsilon \mu}{(1-\alpha)}$  ó  $\mu = \frac{IS}{\varepsilon}$



**Figura 4.8. Esfuerzo Permanente vs. Número de repetición de cargas<sup>115</sup>**

Para determinar el parámetro de deformación permanente del sistema de capas  $\alpha_{\text{sistema}}$  y  $\mu_{\text{sistema}}$  de las capas individuales, es adicional asumir que la sumatoria de las tensiones permanentes y tensiones recuperables debido a la aplicación de cada carga es una constante y equivale a la tensión elástica de la ducentésima repetición. Esto significa que después de la ducentésima repetición:

$$\varepsilon = \varepsilon_p(N) + \varepsilon_r(N) \quad (4.22)$$

El cual  $\varepsilon_r(N)$  es la tensión recuperable debido a la aplicación de cada carga. Sustituyendo la ecuación  $\varepsilon_p(N) = \mu\varepsilon N^{-\alpha}$  en la ecuación anterior, se obtiene:

$$\varepsilon_r(N) = \varepsilon(1 - \mu N^{-\alpha}) \quad (4.23)$$

Bajo los mismos esfuerzos y tensiones son inversamente proporcionales al módulo, así la ecuación anterior puede ser escrita como sigue:

$$\begin{aligned} E_r(N) &= \frac{E}{1 - \mu N^{-\alpha}} \\ &= \frac{EN^{\alpha}}{N^{\alpha} - \mu} \end{aligned} \quad (4.24)$$

<sup>115</sup> Figura 4.8: Pavement Analysis and Design. Cap. 7. Pág. 357



En donde  $E_r(N)$  es el módulo elástico debido al descargado y  $E$  es el módulo elástico debido al cargado. Note que  $E_r(N)$  es el módulo de descarga para cada capa individual, no es constante pero aumenta con el incremento de las repeticiones de carga. Estos módulos de descarga son usados para determinar la deformación recuperable  $w_r(N)$  a diferentes valores de  $N$ . la deformación permanente  $w_p(N)$  puede ser calculada entonces así:

$$w_p(N) = w - w_r(N) \quad (4.25)$$

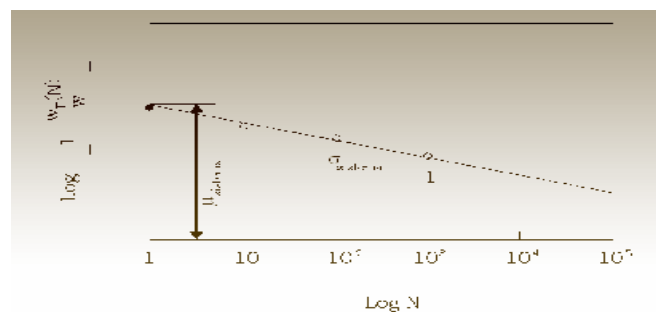
En donde  $w$  es la deformación elástica debido al cargado.  $w_p(N)$  puede ser expresada por:

$$w_p(N) = \mu_{\text{sistema}} w N^{-\alpha_{\text{sistema}}} \quad (4.26)$$

Combinando las dos ecuaciones anteriores, se tiene:

$$1 - \frac{w_r(N)}{w} = \mu_{\text{sistema}} N^{-\alpha_{\text{sistema}}} \quad (4.27)$$

La ecuación anterior muestra un diagrama del  $\log \left[ 1 - \frac{w_r(N)}{w} \right]$  vs.  $\log N$  que resulta en una línea continua como se muestra en la Fig. 4.9. La pendiente de la línea continua es  $\alpha_{\text{sistema}}$  y el intercepto a  $N=1$  es el  $\log \mu_{\text{sistema}}$ .



**Figura 4.9.**  $\log \left[ 1 - \frac{w_r(N)}{w} \right]$  vs. número de cargas repetitivas<sup>116</sup>

<sup>116</sup> Figura 4.8: Pavement Analysis and Design. Cap. 7. Pág. 358.

En el PDMAP, para la construcción convencional con la mezcla asfáltica en caliente menor de 6 pulgadas:

$$\log RR = -5.617 + 4.343 \log w_o - 0.167 \log(N_{18}) - 1.118 \log S_c \quad (4.28)$$

Para una profundidad completa de mezcla asfáltica en caliente igual o mayor a 6 pulgadas:

$$\log RR = -1.173 + 0.717 \log w_o - 0.658 \log(N_{18}) + 0.666 \log S_c \quad (4.29)$$

En donde RR es la relación de ahuellamiento en micropulgadas (1  $\mu$ pulg.= $10^{-6}$  pulg.) por repetición de eje cargado,  $w_o$  es de deflexión de la superficie en mil. (1 mil.= $10^{-3}$  pulg.),  $S_c$  es el esfuerzo de compresión vertical en una mezcla asfáltica en caliente en psi, y  $N_{18}$  es el equivalente de 18 kip (80 kN) de eje simple cargado a la  $10^5$ . Para predicciones de profundidad llena, todo el tráfico durante el período de congelamiento es descuidado.

#### 4.2.4 MODELOS DE GRIETAS POR BAJAS TEMPERATURAS.

El índice de grietas debido a las bajas temperaturas pueden ser calculadas por (Hajek y Haas, 1972):

$$10^I = 2.497 \times 10^3 \times (0.1S_{bit})^{(6.7966 - 0.8740h + 1.3388a)} \times (7.054 \times 10^{-3})^d \times (3.193 \times 10^{-13})^{(0.1m)} \times d^{(0.06026S_{bit})} \quad (4.30)$$

Ó

$$I = 30.3974 + (6.7966 - 0.8741h + 1.3388a) \times \log(0.1S_{bit}) - 2.1516d - 1.2496m + 0.06026S_{bit} \times \log d \quad (4.31)$$

Donde:

I: Índice de grieta ( $\geq 0$ ) en términos de los números de grietas llenas más la mitad de las medias grietas transversales por 500 pies de sección de carretera de dos carriles. Las grietas más cortas que las medias anchas no son debido a las grietas por bajas temperaturas y no son consideradas en la ecuación de regresión.

$S_{bit}$ : El módulo de rigidez de un asfalto original en  $\text{Kg}/\text{cm}^2$  determinado de los nomogramas de Van der Piel usan un tiempo de cargado de 20,000 seg. Tomando la temperatura de diseño de invierno.

h: Espesor total de la capa de asfalto en pulgadas.

a: Edad del pavimento en años.

m: Temperatura de diseño de invierno en  $^{\circ}\text{C}$ , el signo negativo para negligencia y positivo solamente para los valores.

d: Tipo de subrasante en términos de códigos dimensionales: 5 para arena, 3 para marga y 2 para arcilla.

### **4.3 DETERIOROS EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.**

La mayoría de las fallas en los compuestos del pavimento asfálticos ó sobrecapas asfálticas sobre concreto hidráulico, son similares a las fallas del pavimento asfáltico.

Un patrón típico de deterioro en pavimentos asfálticos es el ahuellamiento, el cual se desarrolla algo rápido durante sus primeros años y luego su nivel disminuye en su mayoría por una tasa de deterioro más lenta.

Los principales daños en un pavimento asfáltico de acuerdo a la SIECA para el área centroamericana son los siguientes:

### **1. Fisura Piel de Cocodrilo (Alligator Cracking):**

Serie de fisuras interconectadas formando pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos, generalmente con un diámetro promedio menor a 30 cm. El fisuramiento empieza en la parte inferior de las capas asfálticas, donde las tensiones y deformaciones por tracción alcanzan su valor máximo, cuando el pavimento es solicitado por una carga.

Las fisuras se propagan a la superficie, inicialmente, como una serie de fisuras longitudinales paralelas; luego por efecto de la repetición de, evolucionan interconectándose y formando una malla cerrada, que asemeja el cuero de un cocodrilo.

Ocurren necesariamente en áreas sometidas al tránsito, como las huellas de canalización del tránsito. Si la base y la subbase son débiles, el fisuramiento será acompañado por ahuellamientos.

Cuando el drenaje es inadecuado, el fisuramiento se presentará en primera estancia, en las huellas de canalización exteriores. En su etapa final, el agrietamiento se transforma en bache. La misma sección del pavimento presentara fisuras y grietas de cocodrilo, ahuellamiento y baches.



**Figura 4.10. Fisura Piel de Cocodrilo<sup>117</sup>.**

### **2. Fisuras en Bloque (Block Cracking):**

---

<sup>117</sup> Figura 4.10: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 10.

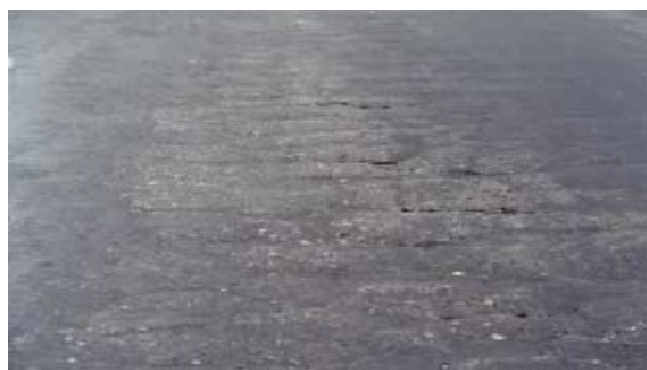
Serie de fisuras interconectadas formando piezas aproximadamente rectangulares, de diámetro promedio mayor de 30 cm, con un área variable de 0.10 a 9.0 m<sup>2</sup>. La fisura en bloque se presenta normalmente en una gran área del pavimento y algunas veces ocurren solamente en las áreas no afectadas por el tráfico.



**Figura 4.11. Fisura en Bloque<sup>118</sup>.**

### **3. Fisura en Arco (Arc Cracking):**

Son fisuras en forma de media luna (o más precisamente de cuarto creciente) que apuntan en la dirección de las fuerzas de tracción de las ruedas sobre el pavimento. Las fisuras en arco no necesariamente apuntan en el sentido del tránsito. Por ejemplo, si se frena el vehículo cuesta abajo, la dirección de la fisuras está cuesta arriba.



**Figura 4.12. Fisura en Arco<sup>119</sup>.**

---

<sup>118</sup> Figura 4.11: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 11.

<sup>119</sup> Figura 4.12: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 12.

#### **4. Fisura Transversal (Transverse Cracking):**

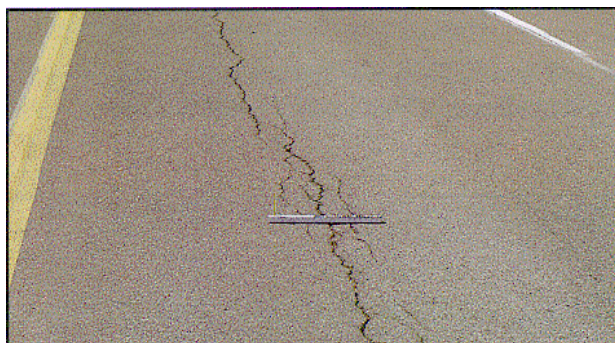
Fracturación de longitud variable que se extiende a través de la superficie del pavimento, formando un ángulo aproximadamente recto con el eje de la carretera. Puede afectar todo el ancho del carril como limitarse a los 0.60 m próximos al borde del pavimento.



**Figura 4.13. Fisura Transversal<sup>120</sup>.**

#### **5. Fisura Longitudinal (Longitudinal Cracking):**

Fracturación que se extiende a través de la superficie del pavimento, paralelamente al eje de la carretera, pudiendo localizarse en las huellas de canalización de tránsito, en el eje o en los bordes del pavimento. La ubicación de la fisura es indicativa de la causa más probable.



**Figura 4.14. Fisura Longitudinal<sup>121</sup>.**

<sup>120</sup> Figura 4.13: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 13.

<sup>121</sup> Figura 4.14: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 14.

### **6. Fisura por Reflexión de Junta (Reflective Cracking):**

Se presentan sólo en pavimentos mixtos constituidos por una superficie asfáltica sobre un pavimento de concreto con juntas. Consiste en la propagación ascendente hacia la superficie asfáltica, de las juntas del pavimento de concreto. Como consecuencia, por efecto de la reflexión, se observan en la superficie fisuras longitudinales y/o transversales que tienden a reproducir las juntas longitudinales y transversales de las losas inferiores.



**Figura 4.15. Fisura por reflexión de Junta<sup>122</sup>.**

### **7. Ahuellamiento (Rutting):**

Depresión longitudinal continua a lo largo del rodamiento del tránsito, de longitud mínima de 6 m. Las repeticiones de las cargas de tránsito conducen a deformaciones permanentes en cualquiera de las capas del pavimento o en la subrasante.

Cuando el radio de influencia de la zona ahuellada es pequeño, las deformaciones ocurren en las capas superiores del pavimento; cuando el radio de influencia es amplio, las deformaciones ocurren en la subrasante. Las deformaciones resultan de una compactación o movimiento lateral de los materiales (fluencia plástica o punzonamiento por corte), ambos por efecto de tránsito.

---

<sup>122</sup> Figura 4.15: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 15.

El ahuellamiento indica una insuficiencia estructural del pavimento o una deficiente estabilidad del sistema subrasante-pavimento. En algunos casos se hace más evidente cuando la mezcla asfáltica se desplaza formando un cordón a cada lado del área deprimida. Las causas posibles incluyen:

- Las capas estructurales pobremente compactadas.
- Inestabilidad en bases y subbases granulares, creada por la presión del agua o saturación de la misma.
- Mezcla asfáltica inestable.
- Falta de apoyo lateral por erosión del hombro.
- Capacidad estructural del pavimento con espesores deficientes de las capas que lo integran.
- Técnica de construcción pobre y un bajo control de calidad.
- Utilización de materiales no apropiados o de mala calidad.
- La acción del tránsito (sobrecargas y altos volúmenes de tránsito no previstos en el diseño original).
- El acompañamiento por levantamiento adyacente a los ahuellamientos, que indica que hay fallas en las capas superiores del pavimento.
- Estacionamiento prolongado de vehículos pesados.
- Exceso de ligantes de riegos.



**Figura 4.16. Ahuellamiento<sup>123</sup>.**

---

<sup>123</sup> Figura 4.16: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 16.



### **8. Corrimiento (Shoving):**

Distorsiones de la superficie del pavimento por desplazamiento de la mezcla asfáltica, a veces acompañados por levantamientos de material formando "cordones", principalmente laterales, o bien por desplazamiento de la capa asfáltica sobre la superficie subyacente, generalmente acompañada de un levantamiento hacia el eje de la carretera. Típicamente puede identificarse a través de la señalización horizontal del pavimento, observando demarcación de los carriles, por efecto de corrimiento.



**Figura 4.17. Corrimiento<sup>124</sup>.**

### **9. Corrugación (Corrugations):**

Serie de ondulaciones, constituidas por crestas y depresiones, perpendiculares a la dirección del tránsito, las cuales se suceden muy próximas unas de otras, a intervalos aproximadamente regulares, en general menor de 1 m entre ellas, a lo largo del pavimento.



**Figura 4.18. Corrugación<sup>125</sup>.**

---

<sup>124</sup> Figura 4.17: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 17.

<sup>125</sup> Figura 4.18: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 18.

### **10. Hinchamiento (Bumps):**

Abultamiento o levantamiento localizado en la superficie del pavimento, generalmente en la forma de una onda que distorsiona el perfil de la carretera.



**Figura 4.19. Hinchamiento<sup>126</sup>.**

### **11. Hundimiento (Depression):**

Depresión o descenso de la superficie del pavimento en un área localizada del mismo.



**Figura 4.20. Hundimiento<sup>127</sup>.**

### **12. Bache (Pothole):**

Desintegración total de la superficie de rodadura que puede extenderse a otras capas del pavimento, formando una cavidad de bordes y profundidades irregulares.

---

<sup>126</sup> Figura 4.19: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 19.

<sup>127</sup> Figura 4.20: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 20.



**Figura 4.21. Bache<sup>128</sup>.**

### **13. Peladura (Stripping):**

Desintegración superficial de la carpeta asfáltica como consecuencia de la pérdida de ligante bituminoso y del desprendimiento del agregado pétreo, aumentando la textura del pavimento y exponiendo cada vez más los agregados a la acción del tránsito y clima.



**Figura 4.22. Peladura<sup>129</sup>.**

### **14. Desintegración de Bordes (Edge Distress):**

Consiste en la progresiva destrucción de los bordes del pavimento por la acción del tránsito. Se hace particularmente manifiesto en pistas con hombros no pavimentados, en las que existe una significativa porción de vehículos que acceden del hombro al pavimento o en el sentido contrario.

---

<sup>128</sup> Figura 4.21: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 21.

<sup>129</sup> Figura 4.22: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 22.



**Figura 4.23. Desintegración de Bordes<sup>130</sup>.**

### **15. Exudación de Asfalto (Bleeding of Bitumen):**

Consiste en el afloramiento de un material bituminoso de la mezcla asfáltica a la superficie del pavimento, formando una película continua de ligante, creando una superficie brillante, reflectante, resbaladiza y pegajosa durante el tiempo cálido.



**Figura 4.24. Exudación de Asfalto<sup>131</sup>.**

### **16. Parche (Patch):**

Un parche es un área donde el pavimento original ha sido removido y reemplazado, ya sea con material similar o diferente, para reparar el pavimento existente. También un parchado por reparación de servicios públicos es un parche que se ha ejecutado para permitir la instalación o mantenimiento de algún tipo de servicio público subterráneo. Los parchados disminuyen el nivel de servicio de la carretera, al tiempo que puede constituir un indicador tanto

<sup>130</sup> Figura 4.23: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 23.

<sup>131</sup> Figura 4.24: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 24.

de la intensidad de mantenimiento demandado por una carretera, como de la necesidad de reforzar la estructura de la misma.

En general las áreas parchadas tienen un comportamiento inferior al pavimento original y en muchos casos son el origen de una mayor rugosidad del pavimento o de nuevas fallas en el mismo o en el área adyacente, particularmente cuando su ejecución es defectuosa.



**Figura 4.25. Parche<sup>132</sup>.**

La Tabla 4.2 contiene posibles tipos de deterioros o fallas en pavimentos asfálticos e indica si son fallas estructurales o funcionales y si son deterioros de carga asociada ó carga no asociada. Las fallas estructurales están asociadas con la habilidad del pavimento de transportar las cargas de diseño, mientras que las fallas funcionales están asociadas con la seguridad y la calidad de la carretera.

Cuando la falla estructural aumenta en severidad, ésta también siempre resulta como una falla funcional. Los deterioros de cargas no asociadas son causados por el clima, materiales o construcción defectuosos. Los deterioros de cargas no asociadas pueden ser aumentados en severidad por las cargas de tráfico.

---

<sup>132</sup> Figura 4.25: Catálogo de Daños. SIECA. Pág. 25.

**Tabla 4.2. Deterioros en Pavimentos Asfálticos<sup>133</sup>**

<b>Tipos de Deterioros</b>	<b>Estructural</b>	<b>Funcional</b>	<b>Carga Asociada</b>	<b>Carga No Asociada</b>
Fisura Piel de Cocodrilo	<b>x</b>		<b>x</b>	
Fisuras en Bloque	<b>x</b>			<b>x</b>
Fisura en Arco	<b>x</b>			<b>x</b>
Fisura Transversal	<b>x</b>			<b>x</b>
Fisura Longitudinal	<b>x</b>			<b>x</b>
Fisura por Reflexión de Junta	<b>x</b>			<b>x</b>
Ahuellamiento		<b>x</b>	<b>x</b>	
Corrimiento		<b>x</b>		<b>x</b>
Corrugación		<b>x</b>		<b>x</b>
Hinchamiento		<b>x</b>		<b>x</b>
Hundimiento		<b>x</b>		<b>x</b>
Bache	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	
Peladura		<b>x</b>	<b>x<sup>a</sup></b>	
Desintegración de Bordos		<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
Exudación de Asfalto		<b>x</b>		<b>x</b>
Parche	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	

<sup>a</sup> Abrasión de las Llantas

<sup>133</sup> Tabla 4.2: Cap. 9 Paviment Performance, Distress. Yang Huang. Pag. 414.

# **CAPITULO 5**

## **DISEÑO DE PAVIMENTOS**

### **FLEXIBLES NUEVOS**

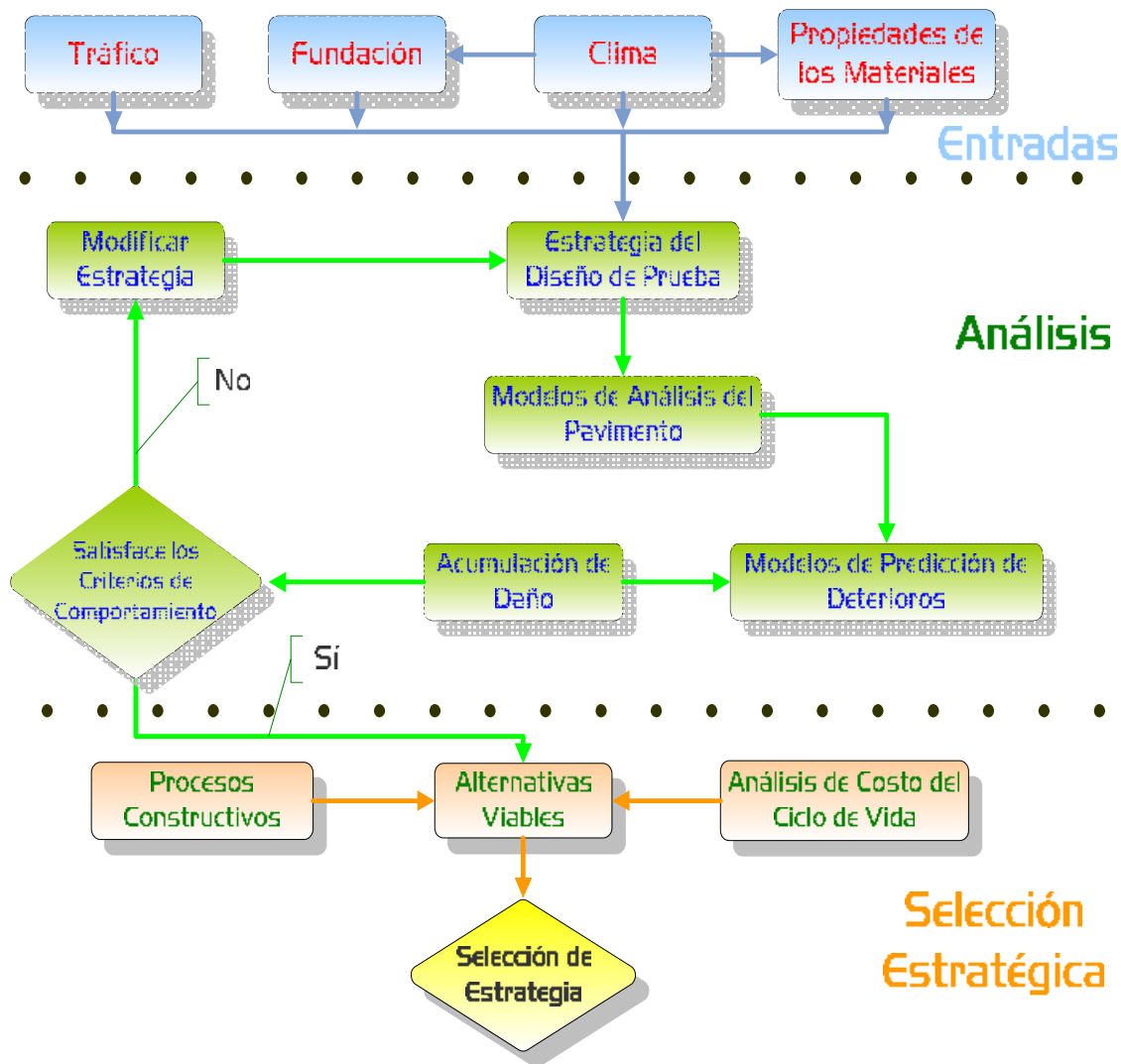
## **5.1 VISIÓN GENERAL DEL PROCESO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES NUEVOS.**

La visión general iterativa del proceso de diseño de pavimentos asfálticos es ilustrada en el Esquema 5.1. El término pavimentos asfálticos se refiere a sistemas de pavimentos nuevos, reconstruidos ó rehabilitación que tienen concreto asfáltico como capa en la superficie.

Los principales pasos en el proceso de diseño incluyen lo siguiente:

1. Ensamblar un diseño de prueba para condiciones específicas del sitio: Definir soporte de la subrasante, concreto asfáltico y otras propiedades de materiales para pavimentar, cargas de tráfico, clima, tipo de pavimento y características de diseño y construcción.
2. Establecer criterios para el comportamiento aceptable del pavimento hasta el final del período de diseño (niveles aceptables de ahuellamiento, fracturas por fatiga, grietas por temperatura e IRI).
3. Seleccionar el nivel deseado de confiabilidad para cada una de las aplicables indicadores de comportamiento (seleccionar niveles de confiabilidad para ahuellamiento, grietas e IRI).
4. Procesar entradas para obtener valores mensuales de estradas de tráfico, variaciones estacionales de los materiales y entradas de clima necesarias en el diseño para la evaluación en todo el período de diseño.
5. Calcular las respuestas estructurales (esfuerzos y tensiones) usando la teoría de multicapas elásticas ó modelos de respuesta de pavimentos basados en elementos finitos para cada tipo de eje, carga y para el cálculo del incremento de daño a través del período de diseño.





**Esquema 5.1. Visión general del proceso de diseño de pavimentos flexibles nuevos.**<sup>134</sup>

6. Calcular los deterioros y/o daños acumulados al final de cada período de análisis para todo el período de diseño.
7. Predecir deterioros claves (ahuellamiento, grietas por fatiga de la superficie hacia abajo y viceversa, grietas por temperatura) al

<sup>134</sup> Parte 3, Capítulo 3: Design of New and Reconstructed Flexible Pavements. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 3.3.3.

final de cada período de análisis a través de la vida de diseño utilizando los modelos de comportamiento mecanicista-empírico calibrados, provistos en la Guía.

8. Predecir la rugosidad (IRI) como función del IRI inicial, deterioros que se acumulan a través del tiempo y factores del sitio al final de cada análisis de incremento.
9. Evaluar el comportamiento esperado de la prueba de diseño al nivel de confiabilidad dado.
10. Si el diseño de prueba no satisface los criterios iniciales de comportamiento, modificar el diseño y repetir del paso 4 al 9 hasta que el diseño satisfaga los criterios.

Los diseños que satisfacen los criterios de comportamiento son considerados factibles desde el punto de vista estructural (deterioros) y funcional (rugosidad) y pueden ser además considerados para otras evaluaciones tales como el análisis de costo del ciclo de vida.

Los deterioros y el IRI pronosticados de las alternativas de diseño factibles pueden ser utilizados en las estimaciones de la vida promedio de las alternativas de diseño y sus desviaciones estándar, junto con una política del diseñador, definida en el mantenimiento y la rehabilitación, para conducirse en el Análisis de Costo del Ciclo de Vida (LCCA).

## **5.2 ENTRADA DE DATOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES NUEVOS.**

Los datos de entrada para el diseño de pavimentos flexibles nuevos se pueden clasificar de acuerdo a las siguientes categorías:

- Información general.

- Identificación del sitio/proyecto.
- Análisis o asignación de parámetros.
- Tráfico.
- Clima.
- Propiedades de drenaje y superficie.
- Estructura de Pavimento.

### 5.2.1 INFORMACIÓN GENERAL.

Las siguientes entradas definen el tipo de diseño y el periodo de análisis:

- ***Vida de diseño***: La vida esperada de diseño del pavimento (años).
- ***Mes de construcción de la base/subrasante***: Es el mes aproximado en el cual la base y la subrasante son anticipadas para su construcción. Esta entrada establece el tiempo  $t=0$  para el modelo climático.
- ***Mes de construcción del pavimento (HMA)***: Esta entrada define el tiempo  $t=0$  para el modelo de envejecimiento de los modelos de HMA y el modelo de grieta por temperatura. Si esta entrada es completamente desconocida, el diseñador debe usar el mes en el cual ocurrirá la construcción de la mayor parte de los pavimentos en el área.
- ***Mes de apertura al tráfico***: Es el mes esperado en el cual el pavimento será abierto al tráfico. Este valor define las condiciones climáticas en el tiempo de apertura al tráfico, los cuales afectan la temperatura y los gradientes de humedad así como también a los valores de los módulos de las capas incluyendo la subrasante. El análisis comienza con la entrada del mes (el primer día del mes es asumido). Esta entrada establece el tiempo  $t=0$  para los cálculos de los incrementos de daños y para el incremento de deterioros. Si esta entrada es completamente desconocida, el

diseñador debe usar el mes en el cual la construcción de la mayor parte de los pavimentos fueron completados en el sitio.

- **Tipo de pavimento, Flexible:** Esta entrada determina la evaluación del método de diseño y los modelos de comportamiento aplicables.

### 5.2.2 IDENTIFICACIÓN DEL SITIO/PROYECTO.

Este grupo de entradas de datos, incluye lo siguiente:

- Localización del proyecto.
- Identificación del proyecto. El ID del proyecto, la identificación de la sección, comienzo y fin de las estaciones del tramo en construcción y dirección del tráfico.
- Clase funcional del pavimento al ser diseñado. Las opciones bajo esta opción incluyen lo siguiente:
  - Arteria principal. Interestatal y rutas de defensa.
  - Arteria principal. Otros.
  - Arterias menores.
  - Colectores mayores.
  - Colectores menores.
  - Rutas locales y calles.

La localización del proyecto define las condiciones climáticas para el diseño de pavimento. La clase funcional influye en el criterio de diseño por defecto (nivel aceptable de deterioro y confiabilidad), ayuda a determinar la distribución de la clasificación vehicular por defecto (Nivel 3) y también ayuda en la selección en la entrada de la velocidad de diseño.

## **5.2.3 ANÁLISIS DE PARÁMETROS.**

### **5.2.3.1 IRI INICIAL.**

El IRI inicial se define como la suavidad permisible construida en el pavimento. Este parámetro es altamente dependiente de las especificaciones de rugosidad del proyecto y tiene un impacto significativo en la calidad a largo plazo al recorrer sobre el pavimento. El rango de valores típicos va desde 50 a 100 pulg/milla (de acuerdo a la Guía de Diseño).

### **5.2.3.2 CRITERIOS DE COMPORTAMIENTO.**

El diseño de pavimento flexible está basado en las grietas por fatiga de la superficie hacia abajo y del fondo hacia arriba de la superficie asfáltica, grietas por temperatura de HMA, grietas por fatiga en capas estabilizadas químicamente, deformación permanente del pavimento completo y de las capas asfálticas y la rugosidad del pavimento (IRI). El diseñador debe seleccionar alguno o todos estos indicadores de comportamiento y establecer criterios para evaluar un diseño y hacer modificaciones si es necesario. Los criterios de comportamiento para cada deterioro dependerán de la tolerancia de la institución encargada del diseño de la carretera para la cantidad de grietas sobre el período del diseño. Los criterios de comportamiento también dependerán del nivel de confiabilidad del diseño, el cual en forma alterna depende de la clase funcional del camino.

#### **Grietas por fatiga de la superficie hacia abajo.**

Esto se manifiesta como las grietas longitudinales sobre las orillas del paso de las llantas. Las grietas de la superficie hacia abajo, permite la infiltración del agua a través de las capas de pavimento subyacentes que pueden causar fallas estructurales. Estas grietas también contribuyen a la pérdida de alisado en la superficie del pavimento.

El criterio de comportamiento de las grietas por fatiga de la superficie hacia abajo es definido como la máxima longitud de grietas longitudinales por milla de pavimento permitido que ocurra a través del período de diseño. Los valores típicos permitidos son los del orden de 1000 pies por milla de pavimento de acuerdo a la Guía de Diseño.

### **Grietas por fatiga del fondo hacia arriba.**

Las grietas clásicas por fatiga desde el fondo hacia arriba, se manifiestan como las fallas piel de cocodrilo en la carretera. Las grietas del fondo hacia arriba permiten la infiltración del agua en las capas subyacentes del pavimento que pueden causar fallas estructurales en el pavimento. Estas grietas también contribuyen directamente a la pérdida de alisado en el pavimento. El inadecuado diseño para controlar estas grietas puede dar como resultado fallas prematuras en el pavimento.

El criterio de comportamiento para las grietas por fatiga del fondo hacia arriba se define como el área máxima de fallas de piel de cocodrilo expresada como porcentaje del área total del carril que se permite que ocurra en el período de diseño. Los valores típicos están en el orden de 25 a 50 por ciento del área total del carril de acuerdo a la Guía de diseño.

### **El agrietamiento por temperatura.**

El agrietamiento termal aparece regularmente mientras emergen las grietas transversales espaciadas a través del pavimento completo. El agrietamiento termal ambientalmente es inducido por las gotas agudas y rápidas en el pavimento a una temperatura que causa la contracción termal y fracturas extremas de la superficie del asfalto. El agrietamiento termal permite la infiltración del agua en las capas subyacentes del pavimento que pueden causar la falla estructural del pavimento. Esto contribuye directamente a una pérdida del alisado.

El criterio de comportamiento para este agrietamiento se define como la longitud máxima por milla de agrietamiento transversal del pavimento que se permite que ocurra en el período del diseño. Los valores típicos permisibles están en la orden de 1000 pies por milla de pavimento de acuerdo a la Guía de Diseño.

**Fractura por fatiga de capas estabilizadas químicamente.**

Estas grietas por fatiga reducen la ayuda proporcionada a las capas superiores del pavimento. Esto acelerará la manifestación de deterioros en la superficie, especialmente en las fracturas por fatiga de la superficie hacia abajo y del fondo hacia arriba en las capas superficiales del asfalto. Esto conducirá a una pérdida de rugosidad (IRI) y puede conducir a la falla prematura del sistema del pavimento. El criterio de funcionamiento para esta tipo de fatiga se define en términos de un índice de daños. Los valores típicos del índice de daños del diseño, está en el orden del 25 por ciento.

**Deformación permanente total.**

La deformación permanente (ó ahuellamiento) se manifiesta típicamente como roderas dentro de las trayectorias de la llanta. La deformación permanente total en la superficie, es la acumulación de la deformación permanente en todo el asfalto y de las capas no ligadas en el sistema de pavimento.

El ahuellamiento es un contribuidor importante a la pérdida de rugosidad en el pavimento. Puede también crear problemas funcionales tales como acumulación de agua y problemas de manejo para los vehículos durante los cambios de carril.

El criterio de funcionamiento para la deformación permanente total se define en términos de la profundidad máxima de la rodera en la trayectoria de

la rueda. Las profundidades máximas típicas de la rodera están en el orden de 0.3 a 0.5 pulgadas. Este valor límite es una función directa de la política específica usada por cada agencia institución encargada del diseño.

### **Rugosidad.**

Una adecuada funcionalidad es cuantificada muy a menudo por la suavidad del pavimento. Caminos ásperos no solamente conducen a la incomodidad del usuario sino también al incremento de tiempo de recorrido y a elevados gastos de operación del vehículo. Aunque el comportamiento estructural de un pavimento en términos de deterioro es importante, los reclamos públicos generados debido a caminos ásperos que contribuyen a menudo a una gran parte de las decisiones de rehabilitación que son tomadas por las agencias de caminos. De manera simplista la suavidad se puede definir como "la variación en la elevación superficial que induce vibraciones en atravesar los vehículos." El Índice Internacional de Rugosidad (IRI) es una de las maneras más comunes de medir suavidad en los pavimentos.

Como con el deterioro estructural, el criterio de comportamiento para la suavidad es definido por el IRI, aceptable al final de la vida de diseño. Los valores terminales de IRI son elegidos por el diseñador y no se deben exceder en el nivel de confiabilidad del diseño. Típicamente los valores que se utilizan para el IRI final esta en el rango de 150 a 250 pulg/milla, dependiendo de la clase funcional de la carretera de la confiabilidad del diseño, la región y de las instituciones encargadas del diseño.

## **5.2.4 TRAFICO.**

Los datos de tráfico es uno de los elementos clave requerido para el análisis y diseño de estructuras de pavimento. La opción de tráfico estándar para pavimento flexible es para especificar el espectro de carga real para eje simple, tandem, tridem y cuádruple.



La segunda opción de tráfico para los pavimentos flexibles es la configuración especial de ejes. Esta opción permite el análisis del comportamiento del pavimento debido a sistemas de vehículos de caminos como especial, pesado, no convencional que están a menudo conforme a requisitos de permisos especiales. Ésta es una característica muy importante de la guía porque provee información al diseñador de la cantidad de daño que se podría causar por los pasos simples o múltiples del vehículo especial a la estructura del pavimento.

#### **5.2.4.1 INFORMACIÓN BÁSICA.**

- Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) para el año base, el total de número de vehículos pesados (clase 4 a 13) en la gama del tráfico.
- Porcentaje de vehículos en la dirección de diseño (factor de distribución direccional).
- Porcentaje de vehículos en el carril de diseño (factor de distribución de carril).
- Velocidad operacional del vehículo. Esta entrada es usada en el cálculo del módulo de las capas ligadas de asfalto.

#### **Velocidad operacional del vehículo.**

La velocidad operacional es una entrada importante para el diseño del pavimento flexible pues influye directamente en la respuesta de la rigidez de las capas de concreto asfáltico dentro de la estructura de pavimento. Mientras que el tráfico se mueve a lo largo de la carretera, una gran cantidad de pulsos de tensión son aplicados rápidamente a cada elemento del material dentro del sistema del pavimento. Típicamente, estos pulsos de tensión duran solamente un período de tiempo corto, la magnitud y la duración dependen de la velocidad del vehículo, del tipo, y de la geometría de la estructura del pavimento, y de la localización del elemento bajo consideración.

Para la Guía de Diseño, la única propiedad de material que será afectada por la duración del pulso de cargas es la rigidez del asfalto. Esto incluye capas de concreto asfáltico y cualquier capa de base tratada con asfalto. Puesto que las capas de asfalto están generalmente cerca de la superficie, la profundidad de la capa puede no ser un factor significativo. Sin embargo, la velocidad del vehículo puede dar lugar a diversas frecuencias de cargas, dando por resultado diversos valores de módulo para el asfalto en el análisis.

En la Tabla 5.1 se presentan algunas recomendaciones para velocidades operacionales típicas de vehículos de acuerdo al tipo de serviciabilidad de la carretera. Nótese que las frecuencias que corresponden a varias velocidades también están notificadas en la tabla en las localizaciones a una profundidad de la mitad de la capa.

**Tabla 5.1. Recomendaciones para seleccionar la velocidad operacional del vehículo.**<sup>135</sup>

Tipo de servicio de la carretera	Velocidad Operacional (mph)	Frecuencia estimada a una profundidad media de la capa (Hz).		
		Capa representativa de HMA (4-12 pulg)	Espesor de capa de HMA a usarse en la superficie (1-3 pulg)	Capas densas de HMA para carpeta/base (3-12 pulg)
Interestatal	60	15-40	45-95	10-25
Primaria	45	10-30	35-70	15-20
Calle urbana	15	5-10	10-25	5-10
Intersección	0.5	0.1-0.5	0.5-1.0	0.1-0.25

#### 5.2.4.2 AJUSTE DEL VOLUMEN DE TRÁFICO.

##### Factor de ajuste mensual.

Los factores de distribución mensual, se utilizan para determinar la variación mensual en el tráfico de vehículos dentro del año base. Estos valores

<sup>135</sup> Parte 3, Capítulo 3: Design of New and Reconstructed Flexible Pavements. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 3.3.20.

son simplemente la relación del tráfico mensual de vehículos al TPDA. Naturalmente, el promedio de las relaciones para los 12 meses del año base debe igualar 1.0. Si no hay información disponible, asumir la distribución uniforme (es decir, 1.0 por todos los meses y para todas las clases de vehículo).

#### **Distribución de la clase vehicular.**

La distribución normalizada de la clase vehicular representa el porcentaje de cada clase de vehículo (clases 4 a 13) dentro del TPDA para el año base. La suma de los porcentajes de TPDA de todas las clases de vehículos debe ser igual a 100. Es importante observar que si el sitio específico (Nivel 1) ó datos regionales (Nivel 2) no están disponibles, la Clasificación del Tráfico de vehículos (TTC) se puede utilizar conjuntamente con la clase funcional de la carretera para estimar la distribución de la clase del vehículo. Cada TTC representa una corriente de tráfico con características únicas de tráfico del vehículo, y una distribución de la clase vehicular por defecto, fue establecida para cada TTC usando una base de datos del tráfico nacional (Estados Unidos) para su uso en el nivel 3.

#### **Distribución horaria del tráfico de vehículos.**

Los factores horarios representan el porcentaje del TPDA dentro de cada hora del día. Estos factores son importantes sobre todo para el análisis del pavimento rígido.

#### **Factores del crecimiento de tráfico.**

La función del crecimiento de tráfico permite el crecimiento o el decrecimiento a través del tiempo. Hay tres funciones disponibles para estimar los volúmenes de tráfico futuros de los vehículos:

- Ningún crecimiento.
- Crecimiento lineal.

- Crecimiento compuesto.

Se pueden utilizar diversas funciones de crecimiento para diversas clases funcionales. De acuerdo con la función elegida, la fecha de apertura de la carretera al tráfico y la vida de diseño, el tráfico se proyecta en el futuro.

#### **5.2.4.3 FACTORES DE DISTRIBUCIÓN DE CARGA POR EJE.**

Los factores de distribución de carga por eje representan simplemente el porcentaje total de aplicaciones en cada intervalo de carga para un tipo y una clase específica de vehículo (de clase 4 a la 13). Estos datos necesitan ser proporcionados para cada mes y para cada clase de vehículo. Una definición de los intervalos de la carga para cada tipo de eje se proporciona a continuación:

- Ejes simples: 3000 lb. a 41000 lb. en intervalos de 1.000 lb.
- Ejes tándem: 6000 lb. a 82000 lb. en intervalos de 2.000 lb.
- Ejes tridem y cuádruples: 12000 lb. a 102000 lb. en intervalos de 3000 lb.

#### **5.2.4.4 ENTRADAS DE DATOS GENERALES DE TRÁFICO.**

La mayoría de las entradas bajo esta categoría definen la configuración de carga del eje y detalles de cargado para los cálculos de respuesta del pavimento. Las excepciones son el "número de tipos de ejes por clase vehicular" y la "distancia entre ejes" del vehículo, que se utilizan en los cálculos del tráfico.

##### **Localización principal de la llanta.**

Es la distancia del borde externo de la llanta a la marca del pavimento. Esta entrada es muy importante en el cálculo predicciones de daño por grietas

por fatiga en JPCP y despostillamiento en CRCP pero no es utilizado para los análisis del pavimento flexible.

**Desviación estándar del tráfico alejado de la trayectoria normal de la llanta en el pavimento (alejado de las roderas).**

Son las aplicaciones del cargado de los ejes en el desvío lateral de las influencias del tráfico a través de un punto para predecir deterioros y comportamiento. Este parámetro afecta la predicción de la fatiga y de la deformación permanente dentro del sistema de pavimento. Un aumento en el desvío dará lugar más vida a la fatiga y menos deformación permanente dentro del sistema de pavimento. Aunque el desvío afecta directamente la progresión del daño para la fatiga y el ahuellamiento, se utiliza un acercamiento levemente diferente para cada señal de deterioro. La estimación de daño por fatiga es basada en la Ley de Miner el cual indica que los daños son dados por la siguiente relación:

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i} \quad (5.1)$$

Donde:

$D$ : Daño.

$T$ : Número total de períodos.

$n_i$ : tráfico real para el período  $i$ .

$N_i$ : Tráfico permitido bajo condiciones predominantes en  $i$ .

Debido a que la Ley de Miner es con tráfico lineal, la distribución de daños con desvío se puede calcular desde el perfil de daños de la fatiga obtenido de que no exista desvío (desvío=0 pulg). Esto no puede ser hecho cuando se relaciona a la deformación permanente ya que el ahuellamiento no es relacionado linealmente con el tráfico y el desvío se aplica al comportamiento del pavimento, no al deterioro.

**Ancho de carril de diseño.**

Esta es la distancia entre la marca de carril y cada uno de los lados de los carriles de diseño. Esto es usado primordialmente para el diseño de pavimentos rígidos y tiene pequeños efectos sobre el análisis de pavimentos flexibles. El valor por defecto para el ancho de carril estándar es de 12 pies.

**Número de tipos de ejes para la clasificación vehicular.**

Esta entrada representa el número promedio de ejes para cada clase de vehículos (clase 4 a 13) para cada tipo de ejes (simple, tandem, tridem y cuádruple).

**Configuración de eje.**

Son necesarios una serie de datos para describir los detalles de la llanta y carga por eje para usar en el modelo de respuesta del pavimento. Los valores típicos son provistos para cada uno de los siguientes elementos, sin embargo, los valores del sitio específico pueden ser usados si están disponibles:

- Ancho de eje promedio: Es la distancia entre dos bordes de afuera de un eje. Para vehículos típicos puede ser asumido el valor de 8.5 pies para ancho de ejes.
- Espaciamiento de llanta doble: Es la distancia entre los centros de las llantas dobles. Los espaciamientos típicos de las llantas duales es de 12 pulg.
- Presión de las llantas: Es la presión de inflado ó la presión de contacto de una llanta simple o doble. Para vehículos pesados, la presión típica de inflado es de 120 psi.
- Espaciamiento de ejes: Es la distancia entre los dos ejes consecutivos de un tandem, tridem ó cuádruple. El

espaciamiento del eje promedio es de 51.6 pulg para tandem y de 49.2 pulg. en los ejes tridem.

#### **Distancia entre ejes.**

Esta información es usada primordialmente para el diseño de pavimentos rígidos y tiene un efecto muy pequeño sobre el análisis de pavimentos flexibles.

#### **5.2.4.5 PROCESO DE ENTRADA DE DATOS.**

Las entradas de tráfico son procesados para producir las siguientes entradas procesadas para cada mes a través de todo el periodo de diseño:

- Número de ejes simples bajo cada categoría de carga.
- Número de ejes tandem bajo cada categoría de carga.
- Número de ejes tridem bajo cada categoría de carga.
- Número de ejes cuádruple bajo cada categoría de carga.
- Número de camiones con remolques (clase 8 en adelante) bajo cada categoría de carga. (para las grietas de arriba y abajo del pavimento).

Los factores de distribución de tráfico horario son aplicados para el proceso de entradas de tráfico (los conteos de tráfico por tipo de eje para cada mes del periodo de diseño) para la obtención del tráfico horario en el tiempo del cálculo de daño para cada deterioro.

#### **5.2.5 CLIMA.**

Las condiciones ambientales tienen un efecto significativo en el comportamiento de los pavimentos flexibles. La interacción de los factores

climáticos con los materiales de pavimento y las cargas que éste soporta es bastante complejo. Los factores tales como precipitación, temperatura, ciclos de hielo-deshielo (no aplicables en nuestro país) y la profundidad del nivel freático afectan al pavimento, a la temperatura de la subrasante y al contenido de humedad el cual, en forma alterna, afecta directamente la capacidad de soportar cargas a las capas de pavimento y al comportamiento del mismo.

#### **5.2.5.1 ENTRADA DE DATOS PARA EL CLIMA.**

La siguiente información relacionada al tiempo es requerida para el diseño de pavimentos flexibles:

- Temperatura del aire horaria en todo el período de diseño.
- La precipitación horaria en todo el período de diseño.
- La velocidad del viento horaria en todo el período de diseño.
- El porcentaje de la luz del sol horaria para todo el período de diseño.
- Valores de la humedad relativa horario del ambiente.
- Profundidades del nivel freático constantes o estacionales en el sitio del proyecto.

Nótese que al menos son requeridos datos estacionales de tiempo de alrededor de 24 meses para que el software de la Guía de Diseño tenga una solución razonable y lógica.

#### **5.2.5.2 PROCESOS DE ENTRADA DE DATOS.**

Las entradas del clima son combinadas con las propiedades de los materiales del pavimento, espesores de capa y entradas relacionadas al drenaje por el EICM (Mejoramiento del Modelo Climático Integrado) para producir la



siguiente información y poder utilizarla en el análisis de diseño de pavimentos flexibles:

- Perfiles de distribución de temperatura horaria a través de las capas de asfalto.
- Perfiles de humedad y temperatura horaria a través de otras capas de pavimento.
- Número de días mojados anual.

## **5.2.6 ESTRUCTURA DE PAVIMENTO.**

Los valores de entrada para las propiedades de la estructura de pavimento son organizados en las siguientes categorías:

- Características de drenaje y superficie.
- Propiedades de las capas.
- Deterioro potencial.

### **5.2.6.1 CARACTERÍSTICAS DE DRENAJE Y DE LA SUPERFICIE.**

Hay propiedades generales de estructuras de pavimento requerido para el análisis de diseño. La información requerida bajo esta categoría incluye lo siguiente:

- La absorbencia de onda corta en la capa superficial de pavimento.
- Potencial para infiltración.
- Pavimento de pendiente transversal.
- Longitud de la trayectoria del drenaje.

#### **Absorbencia de onda corta en pavimentos.**

La absorbencia de onda corta de la superficie del pavimento depende de la composición, color y textura del pavimento. La absorbencia es la relación de la cantidad de energía solar absorbida por la superficie del pavimento del total de energía que fue expuesta en la superficie, el cual afecta naturalmente la

temperatura en la estructura del pavimento y a la respuesta estructural asociada. Los rangos de valores para entrada van de 0 a 1.

Generalmente la superficie más iluminada y reflexiva será la de más baja absorbencia. Para el Nivel 1, este valor debe ser determinado a través de pruebas directas. Los rangos de valores para asfalto viejo van de 0.8 a 0.9 y para asfalto fresco van de 0.9 a 0.98. El valor recomendado por defecto es de 0.85 para el diseño de pavimentos nuevos.

### **Infiltración.**

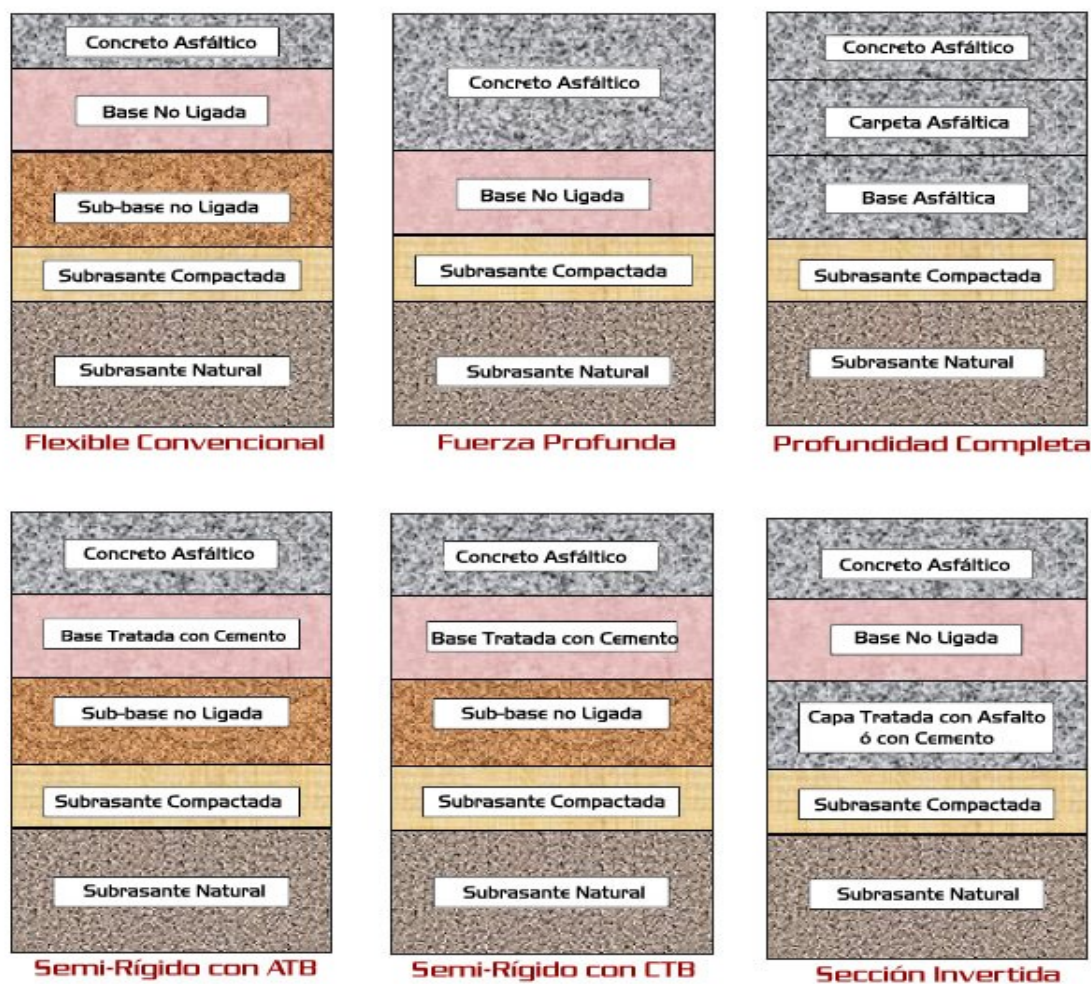
Esta entrada cuantifica la cantidad de agua infiltrada en la estructura de pavimento. La calibración de los modelos de deterioro de pavimentos flexibles asume que ocurre infiltración de humedad a lo largo del período de diseño. Así, el proceso de diseño de pavimentos flexibles no permite al diseñador escoger algún nivel de infiltración. Sin embargo, se deben otorgar adecuadas consideraciones para subdrenar cuando se esté diseñando.

### **5.2.6.2 PROPIEDADES DE LAS CAPAS.**

El proceso de diseño de pavimentos flexibles permite una amplia variedad de propiedades de los materiales para asfalto, base y subbase, además espesores de las capas mostrados en la Figura 5.1. Por ejemplo una estructura de pavimento puede consistir de una ó más capas superficiales de concreto asfáltico, una base tratada con asfalto, una subbase de agregados, subrasante compactada, subrasante natural y lecho de rocas.

La estructura de pavimento original definida por el usuario usualmente tiene 4 ó 6 capas. Sin embargo, el software de la Guía de Diseño puede subdividir la estructura de pavimento entre 12 a 15 subcapas para modelar las variaciones de temperatura y humedad. El software desarrolla las subcapas

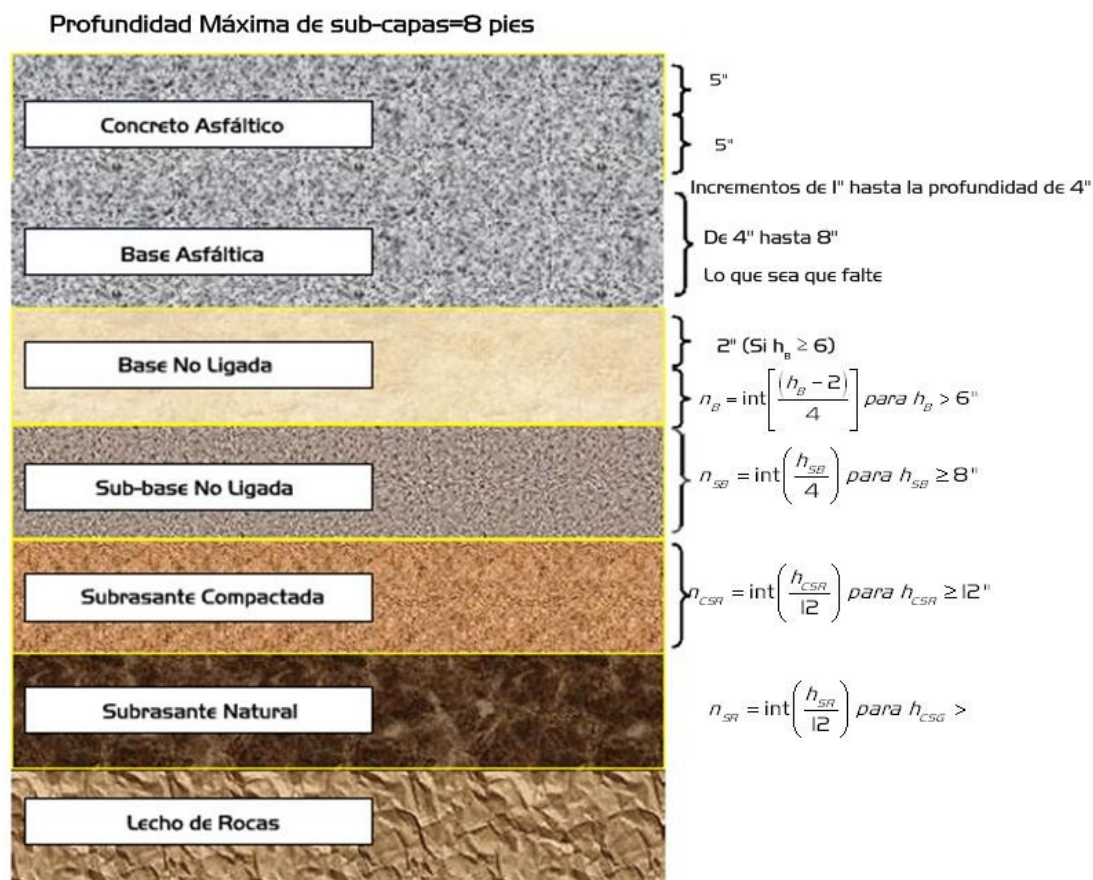
internamente basado en el tipo de material, espesores de capa y de la localización de la capa en la estructura de pavimento.



**Figura 5.1. Ilustración de los posibles sistemas de capas de un pavimento asfáltico.<sup>136</sup>**

El software puede analizar un máximo de 19 capas. Sin embargo, debido a la automatización de las subcapas de capas determinadas, es recomendado un máximo de 10 entradas de capas. La Figura 5.2 muestra el criterio sobre el cual está basado las subcapas.

<sup>136</sup> Parte 3, Capítulo 3: Design of New and Reconstructed Flexible Pavements. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 3.3.4.



**Figura 5.2. Pavimento en capas de sección transversal para sistema de pavimentos flexibles (no hay subcapas más allá de 8 pies).<sup>137</sup>**

### **Concreto asfáltico y capas estabilizadas con asfalto.**

La capa de la superficie de concreto asfáltico es dividida en subcapas para estimar gradientes por temperatura y vejez. En el programa, el usuario puede especificar un máximo de tres capas asfálticas (superficie, carpeta y base) para la construcción de estructuras nuevas. Esto requiere de las propiedades de los materiales para cada capa asfáltica individual. La vejez del asfalto es modelado solamente para la subcapa de encima. Los cambios más largos en la rigidez debido al envejecimiento ocurren solamente a media

<sup>137</sup> Parte 3, Capítulo 3: Design of New and Reconstructed Flexible Pavements. Guide for Mechanistic-Empiric Design of Pavement Structures. Pág. 3.3.30.

pulgada de la capa superior y el gradiente por envejecimiento para otras capas en la parte superior de la capa no es significativo. La parte superior de la capa es más susceptible a gastarse debido a períodos largos de envejecimiento afectado por procesos de oxidación.

La Figura 5.2 muestra una estructura original de pavimento típica de HMA. La capa superior de asfalto es dividida en dos subcapas de 0.5 pulg. y el remanente. En la Figura 5.2,  $h_{CA}$  se refiere al espesor de la capa original de asfalto y  $h'_{CA}$  es la segunda subcapa encima de la capa de asfalto. Es decir, sin tomar en cuenta el grosor de la capa superior de asfalto, este se divide siempre en dos capas secundarias (0.5 pulg. y el espesor remanente).

Las entradas requeridas de los materiales para las capas de concreto asfáltico son agrupados bajo tres categorías: Entradas generales de los materiales, entradas requeridas para la construcción de la curva maestra del Módulo Dinámico ( $E^*$ ) y entradas requeridas para la predicción de grietas por temperatura.

### **1. Entrada general de las propiedades de los materiales.**

- Espesor de capa.
- Relación de Poisson.
- Conductividad térmica. El valor típico para material de base estabilizado con asfalto es de 0.67 BTU/h-pies-°F.
- Capacidad de calor. El valor típico para base estabilizada con asfalto es de 0.23 BTU/lb-°F.
- Peso específico total. El rango típico para HMA densamente graduado es de 134 a 148 lb/pie<sup>3</sup>.

### **2. Entradas requeridas para construir la curva maestra de $E^*$ .**

El modulo dinámico  $E^*$  es la propiedad de los materiales primaria de interés para las capas estabilizadas con asfalto. Para la entrada del Nivel 1,  $E^*$ ,

es determinado en laboratorio usando protocolos de pruebas estándar para varias frecuencias e índices de cargas. Para las entradas del Nivel 2 y 3, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\log(E^*) = d + \frac{a}{1 + e^{b+g(\log t_r)}} \quad (5.2)$$

Donde:

$E^*$ : Módulo dinámico.

$t_r$ : Tiempo de cargado a la temperatura de referencia.

$\delta$ ,  $a$ : Parámetros de ajuste. Para datos dados,  $\delta$  representa el valor mínimo de  $E^*$  y  $\delta+a$  representa el valor máximo de  $E^*$ .

$\beta$ ,  $\gamma$ : Parámetros que describen la forma de la función sigmoidea.

La ecuación anterior es usada para construir la curva maestra de la información siguiente:

- Propiedades de la mezcla asfáltica:
  - Para la entrada de nivel 1: Especificar los valores medidos en laboratorio del módulo dinámico en el laboratorio a varias temperaturas e índices de cargas.
  - Para las entradas del nivel 2 y 3: Especificar las propiedades de mezcla requeridas por la ecuación del módulo dinámico de Witczak (ecuación anterior):
    - Porcentaje retenido en la malla de 3/4. El valor típico es de 5% a 16% para agregado graduado denso y 30% para permeable.
    - Porcentaje retenido en la malla de 3/8. El valor típico es de 27% a 49% para agregado graduado denso y 70% para permeable.
    - Porcentaje retenido en la malla de #4. El valor típico es de 38% a 61% para agregado graduado denso y 95% para permeable.

- Porcentaje retenido en la malla de #200. El valor típico es de 3% a 8% para agregado graduado denso y 1% para permeable.
- Carpeta de asfalto.
  - Para la entrada de nivel 1: Especificar cada dato de prueba de Superpave ó de carpeta convencional de laboratorio.
  - Para la entrada de nivel 2: Especificar el grado de comportamiento ó grado de viscosidad de la carpeta asfáltica.
  - Para la entrada de nivel 3: Especificar el grado de comportamiento, grado de viscosidad ó grado de penetración (PG) de la carpeta asfáltica.
- Asfalto en general.
  - Contenido volumétrico efectivo de carpeta asfáltica (porcentaje).
  - Porcentaje de vacíos.
  - Temperatura de referencia para el desarrollo de la curva maestra (valor típico de 70°F).

### ***3. Entradas requeridas por la predicción de grietas por temperatura.***

Esta entrada esta referida para temperaturas bajo cero en grados Celsius (no aplicable a nuestra región).

#### **Capas estabilizadas químicamente.**

Las siguientes entradas son requeridas para definir una capa estabilizada químicamente:

- Diseño del modulo resiliente máximo.
- Módulo resiliente mínimo (después de que el daño por fatiga propague completamente la capa).
- Módulo de ruptura.

- Peso específico del material.
- Relación de Poisson.
- Conductividad térmica. El valor típico para base estabilizada químicamente es de 1.0 BTU/h-pie-°F.
- Capacidad calorífica. El valor típico para base estabilizada químicamente es de 0.28 BTU/lb-°F.

**Base no ligada/subbase/subrasante.**

Las capas de base no ligadas con espesor mayor a 6 pulg. y la capa no ligada de subbase con espesor mayor a 8 pulg. son divididas en subcapas internamente en el software de la Guía para propósitos de análisis. Para la capa de base (primera capa no ligada), la primera subcapa es siempre de 2 pulg. El espesor restante de la capa de base y cualquier capa de subbase se transforman en subcapas con un espesor mínimo de 4 pulg. Para las subrasantes naturales y compactadas, el espesor mínimo de subcapas es 12 pulg. Una estructura de pavimento es dividida en subcapas solamente a una profundidad de 8 pies. Cualquier subrasante restante es tratada como una capa infinita. Si se presenta un lecho de roca, la subrasante restante es tratada como una capa más allá de 8 pies. El lecho de roca no es dividida en subcapas y siempre es tratada como una capa infinita. El esquema de subcapas para las capas no ligadas dentro de la estructura de pavimento se resume en la Figura 5.2.

Las principales entradas requeridas para base/subbase no ligadas y capas de subrasante son:

- Espesor de capa (solamente para capa de base y subbase). Si para capas de subrasante de limo estabilizado (no modificado) ó compactado necesitan ser considerados separadamente de la subrasante natural, pueden ser definidos como una capa estructural.
- Capa de módulo de resiliencia.



- Para la entrada del nivel 1: Especificar el esfuerzo dependiente no lineal de los parámetros del módulo resiliente  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$ . Se debe observar que la entrada del nivel 1 requiere el uso del código de elemento finito no lineal para la predicción de comportamiento el cual es actualmente recomendado solamente para ser usado en propósitos de análisis e investigación.
  - Para la entrada del nivel 2: Especificar directamente el valor del módulo resiliente elástico lineal. En forma alterna, el valor del módulo resiliente puede ser determinado de la relaciones empíricas en términos de otras propiedades índices.
  - Para la entrada del nivel 3: Especificar un modulo de resiliencia por defecto como una función de AASHTO ó de la Clasificación Unificada del Suelo.
- Relación de Poisson.
  - Coeficiente de presión lateral de la tierra,  $K_0$ . Un valor típico para esta entrada es de 0.5 para material sin compactar ó natural.

### **Análisis estacional.**

El diseñador tiene la opción de incluir o no el análisis estacional para los materiales de base no ligado y el suelo. Las siguientes opciones son disponibles para el análisis estacional de los niveles 1 y 2 como entradas de materiales no ligados:

1. Entrar un diseño representativo del módulo resiliente ( $M_r$ ) con el contenido de humedad óptimo u otro parámetro disponible de fuerza/rigidez del suelo (CBR, el valor de R, coeficiente de capa estructural de AASHTO ó índice plástico y granulometría) y usar el módulo de EICM encajado en el software de la Guía de Diseño para estimar variaciones estacionales basado en cambios de perfiles de humedad y temperatura a través de la estructura de

pavimento. Las entradas adicionales para la EICM incluye el índice plástico, porcentaje que pasan la malla No. 4 y No. 200 y el tamaño de grano efectivo correspondiente al 60 por ciento que pasa en peso ( $D_{60}$ ) para la capa bajo consideración.

2. En lugar de usar la EICM, el módulo estacional (para cada  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  para la entrada del nivel 1 ó  $M_r$  para los niveles 2 y 3), CBR, el valor de R u otros valores pueden ser introducidos directamente. Para la introducción directa, es requerido estimar valores de laboratorio de 12 meses para  $M_r$  (u otras pruebas disponibles de suelos).
3. La variación estacional puede ser ignorado en la rigidez de materiales no ligados. En este caso, es requerido representar el valor del módulo de diseño (u otro valor de pruebas).

Para el nivel 3, la entrada requerida es el módulo de resiliencia de la capa con el contenido óptimo de humedad (valor por defecto basado en AASHTO ó en la Clasificación Unificada del Suelo) y realizar los ajustes estacionales de la EICM. Si el análisis estacional no es deseado, es introducido un sólo módulo de resiliencia que es sostenido a través de todo el año (no es introducido el contenido de humedad).

### **Lecho de rocas.**

La presencia de lechos de rocas a 10 pies de la superficie del pavimento influye en la respuesta estructural de las capas del pavimento. Las entradas requeridas para esta capa incluyen lo siguiente:

- Espesor de capa (infinitesimal si es la última capa).
- Peso específico.
- Relación de Poisson.
- Módulos de las capas.

Las entradas para los niveles 1 y 2 no son aplicables para el lecho de rocas.

#### **5.2.6.3 DETERIORO POTENCIAL.**

Esta propiedad suplementaria es requerida por los modelos de predicción de rugosidad (IRI). Ellos son usados con relaciones empíricas para predecir el desarrollo de deterioros adicionales que afectan al alisado y que no son considerados mecanísticamente en la Guía. Las dos propiedades requeridas de deterioros potenciales son:

- Grietas por bloque, definido como el porcentaje total del área del carril.
- Grietas del sellado longitudinal fuera de la trayectoria de la llanta, definido en términos de pies por milla.

### **5.3 REGLAS DE SIMULACIÓN.**

Lo que sigue proporciona algunas reglas generales de la simulación o de la dirección para crear la estructura de pavimento flexible que se analizará usando el software de la Guía de Diseño. Observar que estas reglas son meras sugerencias y el diseñador tiene la opción de usar experiencias locales en modelo real de la estructura que se analizará.

Para comenzar, el diseñador debe simular la estructura y la fundación del pavimento en forma detallada, y después comenzar a combinar capas, según lo necesitado. Según lo observado anteriormente, el software toma la estructura definida por el diseñador y las divide todas esas capas en subcapas para calcular en forma más exacta las respuestas a través de la estructura de pavimento. El número de las subcapas que el programa crea depende del número de capas y del espesor de esas capas. La figura 3.3.9 ilustra

gráficamente las subcapas que son creadas por el programa. Cuanto mayor es el número de capas, mayor es el número de subcapas y más tiempo se requerirá para calcular las respuestas del pavimento para analizar la estructura y predecir los deterioros usando el software de la Guía.

### **5.3.1 NOTAS GENERALES.**

- El diseñador debe intentar combinar primero las capas más inferiores y tratar las capas superiores con más detalle.
- Las capas delgadas no estructurales se deben combinar con otras capas. Cualquier capa que sea menor de 1 pulg. de espesor se debe combinar con la capa de soporte. Por ejemplo, una capa de HMA de agregado friccionante de granulometría abierta se debe combinar con la capa de soporte de HMA.
- Los materiales similares de capas adyacentes se deben combinar en una capa. Se define similar como los materiales o capas con las características de respuesta estructurales y características físicas similares que son necesarias para el modelo climático.

### **5.3.2 CAPAS DE SUBRASANTE.**

- El diseñador debe dividir los suelos de la subrasante o fundación en dos capas especialmente cuando el lecho de rocas u otras capas duras no se encuentren. La capa inferior será de suelo natural mientras que la capa superior debería ser suelo compactado. Si el diseñador no elige usar dos capas de subrasantes, el programa creará una capa adicional para los cálculos de la EICM.
- Lecho de rocas u otros suelos duros que se encuentra más cerca de veinte pies debajo de la superficie, tendrán un efecto

insignificante en las respuestas calculadas del pavimento para predecir varios deterioros. Muchos programas, sin embargo, proporcionarán mejores resultados si esa capa dura se encuentra a 600 pulg. de la superficie. Así, la roca de fondo o la capa dura se puede ser ignorada cuando esa profundidad excede 20 pies para el diseño del pavimento, pero no para el cálculo del módulo de la capa.

- Las fábricas de filtros usados para los propósitos de drenaje entre un suelo de grano fino y una materiales de agregado de base no pueden ser simulados en la estructura del pavimento y deben ser ignorados en la sección del diseño estructural analizada.

### **5.3.3 MATERIALES DE AGREGADO NO LIGADO.**

- En la mayoría de los casos, el número de capas de bases granulares no ligadas y subbases no deberían exceder de dos, especialmente cuando una de estas capas es gruesa (más de 18 pulg. de espesor). La arena y otros materiales de agregado del suelo deben ser simulados separadamente de la piedra triturada ó de materiales agregados triturados para base.
- Si son usadas capas gruesas de material de agregado no ligado (que exceda 18 pulg.), esta capa puede ser tratada como la capa de subrasante superior sin comprometer la calidad de la solución (con el cambio en la nomenclatura solamente afecta a la subcapa en el software de la Guía de Diseño y no a la respuesta del cálculo).
- Inversamente, si una capa delgada de agregado de base se utiliza entre dos materiales no ligados gruesos, la capa delgada se debe combinar con la capa más débil o la más inferior. Por ejemplo, una capa de subbase de arena de 6 pulg. colocada entre el suelo de la subrasante y una base de piedra triturada de 15pulg.,

puede ser combinada con la capa superior de la subrasante. Si el diseñador cree que el límite de 20 subcapas no será excedido, la capa de subbase de arena de 6 pulg. se podría simular por sí misma.

- Cuando se utilizan los materiales agregados similares de base y subbase, esos materiales se pueden combinar en una capa, especialmente cuando el grosor combinado de las capas excede 18 pulg. Las propiedades de materiales usadas para esa capa deben ser de la capa más gruesa. No se recomienda hacer un promedio de las propiedades de los materiales. Cuando los materiales similares tienen un grosor casi igual, se debe utilizar el material con el valor más bajo de módulo.
- las geo-mallas y otros materiales de refuerzo usados en capas de agregados no ligados no se pueden simular en la respuesta estructural del programa.
- Cuando las capas no ligadas están presentes en la estructura de pavimento, se debe tomar cuidado para asegurar de que la relación de módulos de capas adyacentes, es decir, el  $M_r$  de la capa no ligada superior dividida por el  $M_r$  de una capa no ligada más baja (incluyendo capas de la subrasante), no exceda un valor de 3 para evitar la decompactación y la acumulación de esfuerzos de tensión en estas capas.

#### **5.3.4 MATERIALES ESTABILIZADOS Y TRATADOS.**

- El asfalto tratado o las capas de bases estabilizadas deben tratadas como una capa separadora y no combinar con las bases grano grueso graduados de mezclas de HMA. Típicamente, éstas son materiales de base de piedra triturada que tiene una cantidad pequeña de asfalto y/o de emulsión que pueden ser producidos en una planta ó mezclados en el lugar. Si es

necesario, las mezclas de base tratadas con asfalto deben ser combinadas con los materiales de piedra triturada de base o considerarlos como mezcla de agregados no ligados. Sin embargo, los materiales de bases tratados con asfalto que son diseñados usando el compactador giratorio u otro dispositivo de compactación debe ser tratado ó considerado como material de base de HMA y combinado con esa mezcla o capa.

- El cemento tratado y otros materiales estabilizados con puzolana que se utilizan como capa de base para soporte estructural deben ser tratados como capa separadora. En algunos casos, una porción pequeña de cemento, cal ó ceniza volcánica pueden ser agregado a los materiales de base para mejorar la fuerza y/o disminuir el índice de plasticidad de estos materiales para los procesos constructivos. Si estos materiales no han sido planeados para proporcionar fuerza y durabilidad a largo plazo, deben ser considerados como material no ligado y ser combinados con esas capas no ligadas, en caso de necesidad. Por otra parte, si estas capas han sido planeadas para proporcionar soporte estructural, pueden ser tratadas como capas estructurales químicamente estabilizadas.
- Suelos de subrasantes estabilizados con cal y/o cal-ceniza volcánica se deben también tratar como capa separada, si es posible. En algunos casos, una cantidad pequeña de cal o la cal-ceniza volcánica se agrega a los suelos en la subrasante superior para disminuir el índice de plasticidad desde un punto de vista constructivo. Para estos casos, el suelo estabilizado con cal ó cal-ceniza volcánica deben ser tratados como la subrasante y no como una capa estructural en el pavimento. Si estos materiales no han sido planeados para proporcionar fuerza y durabilidad a largo plazo, deben ser considerados como material no ligado y ser combinados con estas capas no ligadas, si es necesario. Por otra

parte, si estas capas han sido planeadas para proporcionar estructural, pueden ser tratadas como capas estructurales insensible a la humedad, capas estructurales de módulo constante ó capas químicamente estabilizadas.

### **5.3.5 CAPAS/MATERIALES DE DRENAJE.**

- Capas de base para drenaje tratadas con asfalto deben ser tratadas como una capa separadora y no como capas de agregado grueso graduado de HMA ó capas de base tratadas con asfalto.

### **5.3.6 MATERIALES Y MEZCLA DE HMA.**

- El número de capas de HMA no deben exceder de tres, en ningún caso. Sin embargo, puede ser necesario para limitar el número de capas de HMA a dos cuando son usadas capas gruesas de HMA y de agregados no ligados.
- Los materiales de HMA similares pueden ser combinados en una capa.
- Capas delgadas de HMA pueden ser combinadas con una capa adjunta de HMA. Delgado es definido como menor a 1.5 pulg. de espesor.
- Los tramos delgados de HMA o para la condición cuando los espesores de los tramos son altamente variable a lo largo de la carretera pueden ser ignorados sin afectar la exactitud total de los resultados.



## **5.4 EJEMPLO DE DISEÑO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE UTILIZANDO EL MÉTODO DE DISEÑO AASHTO 2002.**

### **5.4.1 INFORMACIÓN GENERAL.**

El pavimento de concreto asfáltico convencional tiene un una vida de diseño de 20 años. La construcción de la base y la subbase tomará lugar desde Enero del 2005, el cual la superficie será colocada en el mes de Septiembre del 2005, así el pavimento puede ser abierto al tráfico en Diciembre del 2005.

### **5.4.2 CRITERIOS DE COMPORTAMIENTO.**

El valor inicial del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) a cumplir es de 101.4 pulg/mi (1.6 m/km). Se espera que al final de los 20 años de la vida de diseño, el pavimento tendrá no más de 316.8 pulg/mi (5 m/Km) en el IRI, 800 pies/mi (151.52 m/Km) de grieta longitudinal ó debajo de la superficie del pavimento asfáltico, el 35% de grietas hacia arriba causada por fatiga, 100 pies por milla (18.94 metros por kilómetro) de fracturas termales en el pavimento asfáltico (grietas transversales). El total de deformación en la capa de concreto asfáltico no excederá de 1.0 pulg. (2.54 cm) y el total en todo el pavimento no excederá 2.0 pulg (5.08 cm). En adición, si es usada una capa estabilizada químicamente, la fractura por fatiga no deberá exceder el 25%. Estos criterios son para satisfacer al nivel de confiabilidad de 90%.

Nótese que los criterios de diseño para ahuellamiento es solamente el ahuellamiento total en el pavimento. Sin embargo, el modelo de ahuellamiento

requiere el nivel de confiabilidad en el cálculo del mismo solamente como un parámetro de entrada de datos en la capa de concreto asfáltico. De esta forma, el nivel de confiabilidad y el ahuellamiento son entrada de datos para la capa de concreto asfáltico.

### **5.4.3 LOCALIZACIÓN.**

El pavimento se encuentra en El Salvador dentro de la región central del país. Está localizado en la cercanía de San Salvador. La profundidad del nivel freático en el sitio es de 32.8 pies.

La prolongación de 5 millas (8.05 Km) de pavimento para ser diseñada en el carril con rumbo norte llamado AC2005 está entre la estación 05+00 a la estación 10+00.

### **5.4.4 TRÁFICO.**

El TPDA de doble sentido promedio para esta carretera es estimado para ser de 12053 vehículos durante el primer año de servicio. Habrá dos carriles en la dirección de diseño con el 80% de los vehículos en el carril de diseño. El tráfico de vehículos es igualmente distribuido en ambas direcciones (el 50% de los vehículos manejan en la dirección de diseño). La velocidad operacional es de 55.92 mph (90.0 Km/h).

Este pavimento ha sido diseñado para el tráfico de vehículos pesados sobre una carretera principal de categoría arterial/interestatal, por lo tanto, el tráfico consiste de un alto porcentaje de vehículos de camiones simples de dos ejes y seis llantas (vehículo tipo C3). La información recolectada en el sitio específico muestra que el porcentaje del TPDA en cada una de las clases de

vehículo es la misma tal como la clasificación del tráfico de vehículos 14 por defecto basado en los datos de tráfico del LTPP:

<b>Clase Vehicular</b>	<b>Porcentaje de TPDA en cada clase</b>
Clase 4	2.9
Clase 5	56.9
Clase 6	10.4
Clase 7	3.7
Clase 8	9.2
Clase 9	15.3
Clase 10	0.6
Clase 11	0.3
Clase 12	0.4
Clase 13	0.3

La distribución del tráfico vehicular horario para el sitio en estudio es el siguiente:

<b>Medianoche</b>	0.7%	<b>Mediodía</b>	5.7%
<b>1:00 a.m.</b>	0.4%	<b>1:00 p.m.</b>	5.4%
<b>2:00 a.m.</b>	0.4%	<b>2:00 p.m.</b>	5.4%
<b>3:00 a.m.</b>	0.5%	<b>3:00 p.m.</b>	5.6%
<b>4:00 a.m.</b>	1.2%	<b>4:00 p.m.</b>	5.8%
<b>5:00 a.m.</b>	4.0%	<b>5:00 p.m.</b>	6.2%
<b>6:00 a.m.</b>	7.3%	<b>6:00 p.m.</b>	5.7%
<b>7:00 a.m.</b>	6.7%	<b>7:00 p.m.</b>	5.0%
<b>8:00 a.m.</b>	5.9%	<b>8:00 p.m.</b>	4.1%
<b>9:00 a.m.</b>	5.8%	<b>9:00 p.m.</b>	3.1%
<b>10:00 a.m.</b>	5.7%	<b>10:00 p.m.</b>	2.3%
<b>11:00 a.m.</b>	5.7%	<b>11:00 p.m.</b>	1.4%

Después del año base, sobre la vida de diseño del pavimento, el tráfico incrementa un 4.5% del tráfico del año precedente (compuesto anualmente).

La distribución de carga por eje es idéntica a los valores por defecto (derivados del LTPP) provistos en el software de la Guía de Diseño para cada clase de vehículos, tipo de eje, categoría de carga y meses del año.

Asumir que el desvío promedio de las llantas está localizada a 18 pulg (45.72 cm) desde el borde del pavimento. La desviación estándar para el desvío

de la rodadura es de 10 pulg (25.4cm). El pavimento tiene un diseño de ancho de carril estándar de 12 pies (3.66 m). El número de ejes simples, tandem, tridem y cuádruple para cada clase de vehículo es el mismo por defecto derivado de los datos del LTPP (provistos en el software).

La configuración de eje es la siguiente:

Promedio de ancho de eje (dimensiones externas de borde a borde): 8.5.pies (2.59 m).

Espaciamiento de llanta dual: 12 pulg (30.48 cm).

La presión de las llantas simples y duales es de 120 psi (827.37 KPa). El carril de diseño es de 12 pies de ancho (3.65 m). El espaciamiento de eje promedio para tandem, tridem y cuádruple son los siguientes:

<b>Tipo de eje</b>	<b>Espaciamiento entre ejes (pulg.)</b>
Tandem	51.6
Tridem	49.2
Cuádruple	49.2

#### **5.4.5 PROPIEDADES DE DRENAJE Y DE SUPERFICIE.**

El diseño geométrico de la carretera requiere una sección transversal del 2%. La trayectoria del drenaje tendrá una longitud de 12 pies (3.65 m) desde la línea central del dren lateral hasta la junta de carril-hombro y la infiltración dependerá del tipo de hombro que se ha escogido. Asumir una superficie con absorbencia de onda corta de 0.85.

#### **5.4.6 PROPIEDADES DEL MATERIAL ASFÁLTICO.**

La mezcla de concreto asfáltico para ser usada en este proyecto tiene información de las propiedades de materiales en conformidad con el nivel 3 de

las entradas de datos de la Guía de Diseño. El análisis de las mallas que resulta de los agregados para ser usados en la mezcla sugerida es de las mallas  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{3}{8}$ " y #4 con 5%, 30% y 46% de agregado retenido respectivamente. El 4% pasa por la malla #200. Una carpeta con grado de penetración (PG) de 60-20 se utilizará para el diseño de la mezcla asfáltica.

El diseño volumétrico de la mezcla incluye el 5% de contenido de carpeta asfáltica, 3.5% de vacíos de aire y la mezcla tiene un peso específico de 139.2 lb/pie<sup>3</sup> (2230.77 Kg/m<sup>3</sup>). Asumir un valor de conductividad térmica de 0.67 BTU/h-pie-°F y un calor específico de 0.23 BTU/lb-°F (valores por defecto de la Guía de Diseño). Asumir también una relación de Poisson de 0.3. La temperatura de referencia es de 70°F (21.11°C).

#### **5.4.7 SUBRASANTE.**

La subrasante en esta localización es clasificada como un A-2-4 por la clasificación AASHTO y tiene un valor estimado de  $M_R$  de 28000 psi (42.13% de CBR) en condiciones óptimas (en versión demo del programa de AASHTO, es el valor mínimo que permite utilizar para este tipo de suelo). El índice de plasticidad del suelo es 6. Los resultados del análisis de las mallas de este suelo de subrasante indican que el 23% del material pasa la malla #200 y el 70% la malla #4. El  $D_{60}$  (60% que pasa en peso) de este material es de 0.15 mm.

#### **5.4.8 OTRAS CAPAS.**

El material de base disponible para este proyecto esta clasificado como suelo-cemento, con una relación de Poisson de 0.28, un peso específico de 100 lb/pie<sup>3</sup> (1601.85 kg/m<sup>3</sup>) y un módulo elástico/resiliente de 600000 psi (413.69 MPa). El material para la subbase es de tipo granular compuesto de grava

triturada que tiene un módulo de 41867 psi (79.0% de CBR), tiene un PI (Índice Plástico) de 0, tiene 5% que pasa la malla #200, 30% que pasa la malla #4 y además tiene un valor de  $D_{60}$  de 7 mm.

### **5.4.9 DISEÑO DE PRUEBA.**

La Guía de Diseño se origina en un proceso iterativo y requiere que el usuario desarrolle un diseño de prueba para comenzar el proceso de diseño.

El diseño de prueba es analizado a través del período de diseño especificado por el diseñador, el software de la Guía predice el comportamiento de este diseño de prueba.

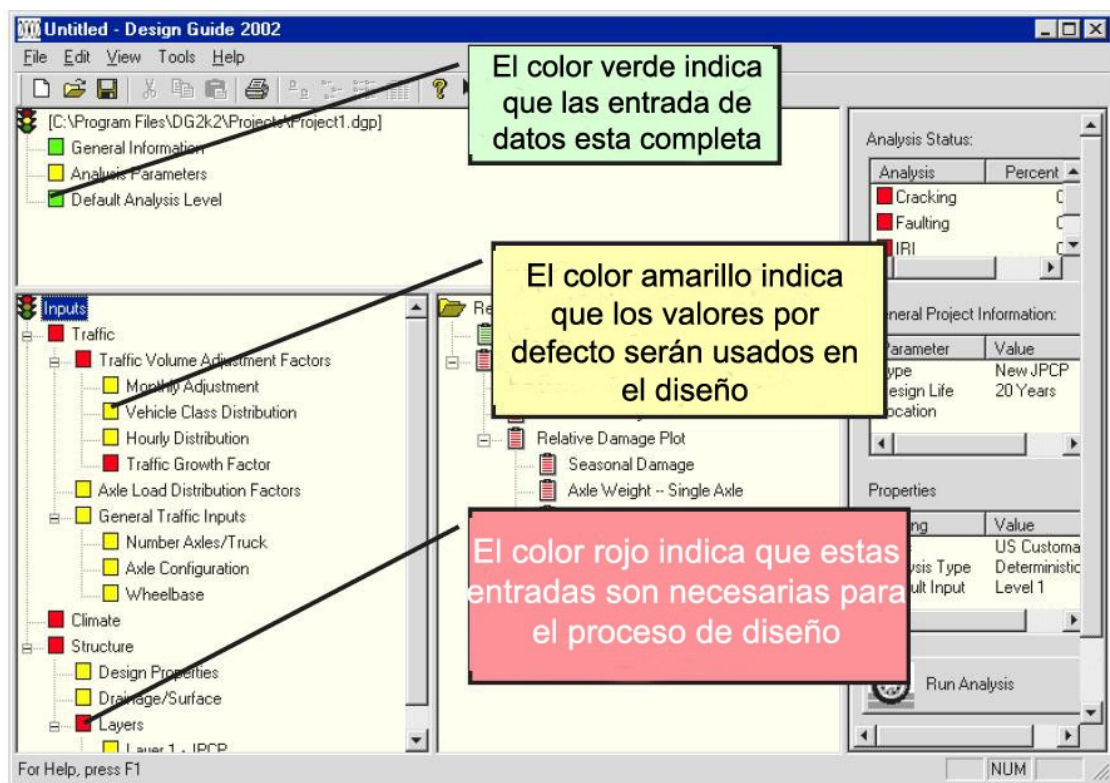
Si los criterios de diseño no cumplen, entonces el diseño es apropiadamente modificado hasta que es logrado el diseño final. El proceso de diseño requiere los siguientes pasos:

1. Crear un nuevo proyecto.
2. Entrada de datos generales.
3. Entrada de datos de tráfico.
4. Entrada de datos de clima.
5. Entrada de datos estructural.
6. Entrada de datos de potencial de deterioros.
7. Corrida del análisis.
8. Análisis sensitivo ó susceptible.
9. Modificar el diseño de prueba (si es necesario).

## INTERPRETACIÓN DE COLORES EN LOS INDICADORES DE ENTRADA DE DATOS DEL SOFTWARE DE LA GUÍA DE DISEÑO.

En la Figura 6.5, se muestra como es la interpretación de colores de los indicadores de entrada de datos en el software de la Guía de Diseño, indicando el significado de cada uno de ellos, así, de esa manera tomar el criterio necesario en el momento del diseño ya sea de pavimentos nuevos ó rehabilitación de pavimentos.

Es de suma importancia esta interpretación de colores para poder llevar un control de cuales entradas de datos están disponibles y cuales se utilizaran por defecto de acuerdo a la base de datos con la que cuenta el software de la Guía de Diseño.

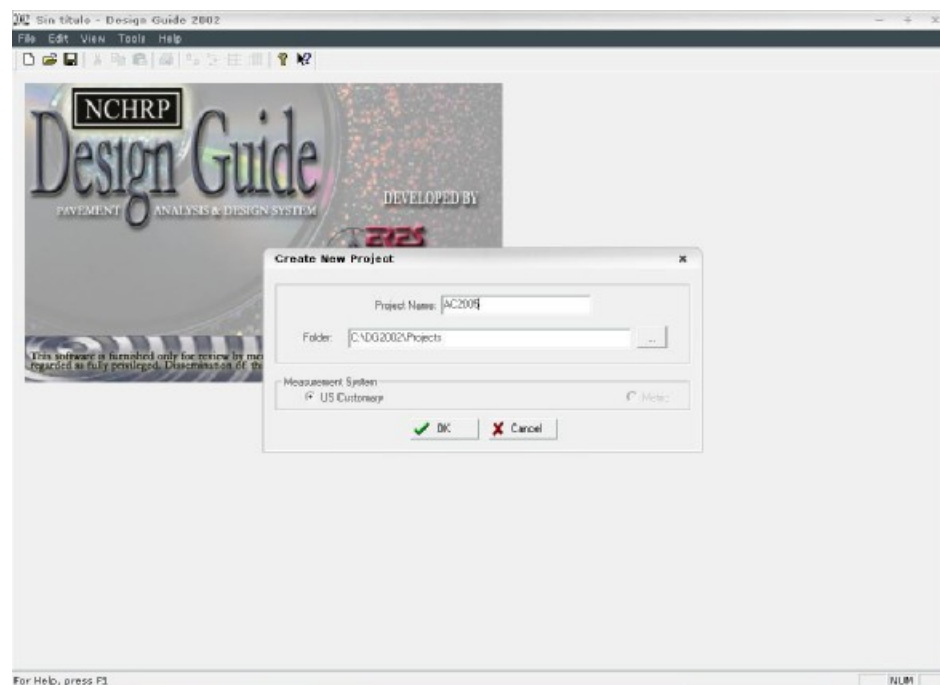


**Figura 5.3. Interpretación de colores en el software de la Guía de Diseño.**

### 5.4.9.1 CREACIÓN DE UN PROYECTO NUEVO.

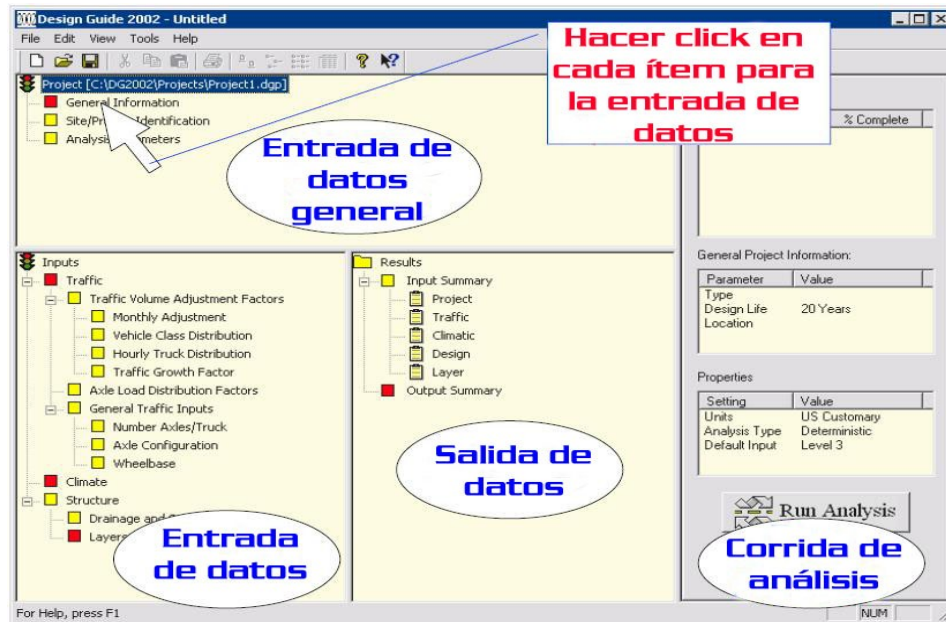
#### 1. Crear un proyecto de diseño nuevo en el programa de la Guía de Diseño.

Abrir el programa de la Guía de Diseño del menú *Programas* de su sistema operativo (Windows 98, 2000, XP, NT). Luego, abrir un nuevo archivo y asignar un nombre al proyecto, “AC2005” como es mostrado en la Figura 5.4. Seleccionar la carpeta para guardar el archivo del diseño en “C:\DG2002\Projects”. Seleccionar el sistema de unidades (en versión de evaluación sólo se puede seleccionar la opción US Customary). Después hacer clic en “OK” y el programa abrirá la pantalla principal donde se introducirán los datos de entrada para diseño del nuevo proyecto como es mostrado en la Figura 5.5.



**Figura 5.4. Crear un archivo de un nuevo proyecto.**





**Figura 5.5. Presentación del programa de diseño.**

#### **5.4.9.2 ENTRADAS DE DATOS GENERALES.**

##### **1. Información general.**

En la ventana principal del proyecto, hacer clic en la entrada de datos *información general (general information)* para abrir la ventana de las entradas generales. La ventana de las entradas de datos de información general es mostrada en la Figura 5.6.

- i. Diseño de Vida: 20 años.
- ii. Mes de construcción de la base/subrasante: Enero 2005.
- iii. Mes de construcción del pavimento: Septiembre del 2005.
- iv. Mes de apertura al tráfico: Diciembre del 2005.
- v. Tipo de diseño: Pavimento nuevo flexible.

**Figura 5.6. Pantalla de información general.**

Hacer clic en *OK* y regresar a la pantalla principal del programa.

## **2. Identificación del sitio/proyecto.**

Hacer clic en *identificación del sitio/proyecto (general information)* para abrir la ventana de identificación del sitio/proyecto. Las entradas de datos hechas en esta ventana son solo para proveer la identificación del proyecto. Las entradas de datos proporcionados para este proyecto son mostrados en la Figura 5.7:

- i. Localización: El Salvador.
- ii. Identificación del proyecto: TESIS AC2005.
- iii. Identificación de la sección: AC2005-1.
- iv. Clase funcional (seleccionar desde menú): Arteria-Interestatal principal y de defensa.

- v. Fecha: Fecha de ejecución del diseño.
- vi. Formato de la estación/marca: 00+00.
- vii. Comienzo de estación/marca: 05+00.
- viii. Fin de estación/marca: 10+00.
- ix. Dirección del tráfico: Rumbo norte.

The screenshot shows a dialog box titled "Site/Project Identification". It contains the following fields and values:

- Location: El Salvador
- Project ID: TESIS AC2005
- Section ID: AC2005-1
- Date: 15/09/2005
- Station/milepost format: Miles: 0.000
- Station/milepost begin: 5
- Station/milepost end: 10
- Traffic direction: North bound

At the bottom of the dialog are two buttons: "OK" (with a green checkmark icon) and "Cancel" (with a red X icon).

**Figura 5.7. Pantalla de la identificación del sitio/proyecto.**

Hacer clic en *OK* y regresar a la pantalla principal del programa.

### **3. Análisis de parámetros.**

Esta ventana permite al usuario hacer entrada de datos estimando los criterios de diseño escogidos por la institución encargada. Para este ejemplo en particular, las entradas de datos son las siguientes y se muestran a continuación en la Figura 5.8:

- i. IRI inicial (pulg/mi): 101.4.
- ii. Tipo de análisis: Probabilístico.

iii. Criterios de Comportamiento (introducir criterio y nivel de confiabilidad):

IRI Final (pulg/mi): 316.8 con una confiabilidad del 90%.

Agrietado debajo/longitudinal de la superficie del concreto asfáltico: 800 pie/milla con una confiabilidad del 90%.

Agrietado superficie/piel de cocodrilo en el fondo del concreto hidráulico del 35% con una confiabilidad del 90%.

Fractura por temperatura del concreto hidráulico: 100pies/milla con una confiabilidad del 85%.

Fractura por fatiga de capa estabilizada químicamente: del 25% con una confiabilidad del 85%.

Deformación permanente: 2.0 pulg. con una confiabilidad del 90%.

**Analysis Parameters**

Project Name: AC2005

Initial IRI (in/mi): 101.4

Performance Criteria

Rigid Pavement  Flexible Pavement

	Limit	Reliability
<input checked="" type="checkbox"/> Terminal IRI (in/mile)	316.8	90
<input checked="" type="checkbox"/> AC Surface Down Cracking Long. Cracking (ft/mi)	800	90
<input checked="" type="checkbox"/> AC Bottom Up Cracking Alligator Cracking (%)	35	90
<input checked="" type="checkbox"/> AC Thermal Fracture (ft/mi)	100	90
<input checked="" type="checkbox"/> Chemically Stabilized Layer Fatigue Fracture(%)	25	90
<input checked="" type="checkbox"/> Permanent Deformation - Total Pavement (in)	2.00	90
<input checked="" type="checkbox"/> Permanent Deformation - AC Only (in)	1.00	90

OK Cancel

**Figura 5.8. Pantalla de análisis de parámetros para el diseño de pavimento flexible.**

Hacer clic en *OK* y regresar a la pantalla principal del programa. Note que los iconos de las entradas de datos generales ahora todos son verdes. Se aconseja que sean salvados los archivos de la entrada de datos haciendo clic en el icono del disco flexible (*diskette*) en la barra de herramientas ó hacer clic en *salvar (save)* en el menú.

### **5.4.9.3 ENTRADA DE DATOS DE TRÁFICO.**

#### **1. Tráfico.**

En esta ventana se permite al usuario hacer las entradas de los volúmenes de tráfico y también de proporcionar un enlace a otras ventanas del tráfico como ajuste de volúmenes, factores de distribución de carga por eje y entrada de datos generales. Note que estas ventanas también pueden ser accedidas desde la ventana principal del programa de diseño. La entrada de datos son los siguientes y se muestran en la Figura 5.9:

- i. Tráfico promedio diario anual de doble sentido: 12053.
- ii. Número de carriles en la dirección de diseño: 2.
- iii. Porcentaje de vehículos en la dirección de diseño: 50.
- iv. Porcentaje de vehículos en el carril de diseño: 80.
- v. Velocidad operacional del vehículo: 55.92.

Nótese que la vida de diseño escogida y la fecha de apertura al tráfico aparecen en esta pantalla. Nótese también los enlaces de las ventanas de *ajuste de volúmenes de tráfico (traffic volume adjustment)*, *distribución de carga por eje (axle load distribution)* y *entradas de datos de tráfico generales (general traffic inputs)*. Hay tres categorías principales de entrada de datos requeridas para el diseño y los enlaces individuales de estas ventanas están también disponibles en la ventana principal del programa.

**Traffic**

Design Life (years): 20

Opening Date: December, 2005

Initial two-way AADTT: 12058

Number of lanes in design direction: 2

Percent of trucks in design direction (%): 50.0

Percent of trucks in design lane (%): 80.0

Operational speed (mph): 55.92

Traffic Volume Adjustment:  Edit

Axle load distribution factor:  Edit

General Traffic Inputs:  Edit

Traffic Growth: Compound, 4.5%

OK Cancel

**Figura 5.9. Pantalla de tráfico.**

Hacer clic en *OK* y regresar a la pantalla principal del programa.

## **2. Factores de ajuste de volúmenes de tráfico.**

La ventana de los factores de ajuste de volúmenes de tráfico (*traffic volume adjustment factors*), tiene 4 pestañas (ó sub-ventanas), denominadas:

- Ajuste mensual (*monthly adjustment*).
- Distribución de la clase vehicular (*vehicle class distribution*).
- Distribución horaria (*hourly distribution*).
- Factores de crecimiento de tráfico (*traffic growth factors*).

### **2.1 Ajuste mensual.**

La entrada de datos en esta ventana, indica la distribución del tráfico a través de los diferentes meses del año para cada clase vehicular. El factor de

ajuste mensual (MAF) es la proporción del TPDA que ocurre a través de un período de 24 horas en cada mes para cada clase vehicular.

Para este ejemplo, debido a que la publicación de distribución de tráfico es la misma hasta el final del año, el tráfico no cambia entre los diferentes meses del año, puede ser usado el factor de ajuste mensual por defecto.

Hacer clic en el botón de círculo de la opción de nivel 3 para la entrada de datos por defecto mostrada en la Figura 5.10. Nótese que el valor por defecto para el MAF es de 1.0 para todos los meses en cada clase vehicular.

**Traffic Volume Adjustment Factors**

Monthly Adjustment
  Vehicle Class Distribution
  Hourly Distribution
  Traffic Growth Factors

Load Monthly Adjustment Factors (MAF)

Level 1: Site Specific - MAF
  Level 3: Default MAF

Monthly Adjustment Factors

Month	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7	Class 8	
January	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
February	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
March	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
April	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
May	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
June	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
July	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
August	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
September	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
October	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
November	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
December	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1

**Figura 5.10. Pantalla de los factores de ajuste mensual.**

Hacer clic en *OK* y regresar a la pantalla principal del programa.

## 2.2 Distribución de la clase vehicular.

Los datos de la distribución de la clase vehicular del sitio específico son disponibles para el diseño de este proyecto. Hacer clic en el botón de círculo del nivel 3: *distribución por defecto (default distribution)* y hacer clic en el botón de la *distribución de carga por defecto (load default distribution)*. Seleccionar la categoría del pavimento como *Principal/Arterials-Interstate and Defense* y escoger la Clasificación de Tráfico de Vehículos (TTC) #14 listado en la fila 16 de la tabla mostrada en la Figura 5.11. Este TTC tiene un alto porcentaje de vehículos en la clase 9 (vehículos de remolque simple).

Select general category: Principal Arterials - Interstate and Defense

AADTT distribution for the selected General Category:

\* = recommended value

	*	TTC	Bus %	Multi-Trailer %	Single-trailer and Single-unit(SU) Trucks	Vehicle Class	Percent(%)
<input type="checkbox"/>	*	5	(<2%)	(>10%)	Predominately Single-trailer trucks.	Class 4	2.9
<input type="checkbox"/>	*	8	(<2%)	(>10%)	"High percentage of single-trailer truck with some single	Class 5	56.9
<input type="checkbox"/>	*	11	(<2%)	(>10%)	Mixed truck traffic with a higher percentage of single-tr	Class 6	10.4
<input type="checkbox"/>	*	13	(<2%)	(>10%)	Mixed truck traffic with about equal percentages of sing	Class 7	3.7
<input type="checkbox"/>		16	(<2%)	(>10%)	Predominantly single-unit trucks.	Class 8	9.2
<input type="checkbox"/>	*	3	(<2%)	(2 - 10%)	Predominantly single-trailer trucks	Class 9	15.3
<input type="checkbox"/>		7	(<2%)	(2 - 10%)	Mixed truck traffic with a higher percentage of single-tr	Class 10	0.6
<input type="checkbox"/>		10	(<2%)	(2 - 10%)	Mixed truck traffic with about equal percentages of sing	Class 11	0.3
<input type="checkbox"/>		15	(<2%)	(2 - 10%)	Predominantly single-unit trucks.	Class 12	0.4
<input type="checkbox"/>	*	1	(>2%)	(<2%)	Predominantly single-trailer trucks	Class 13	0.3
<input type="checkbox"/>	*	2	(>2%)	(<2%)	"Predominantly single-trailer trucks with a low percenta		
<input type="checkbox"/>	*	4	(>2%)	(<2%)	Predominantly single-trailer trucks with a low to moder		
<input type="checkbox"/>		6	(>2%)	(<2%)	Mixed truck traffic with a higher percentage of single-ur		
<input type="checkbox"/>		9	(>2%)	(<2%)	Mixed truck traffic with about equal percentages of sing		
<input type="checkbox"/>		12	(>2%)	(<2%)	Mixed truck traffic with a higher percentage of single-ur		
<input checked="" type="checkbox"/>		14	(>2%)	(<2%)	Predominantly single-unit trucks		
<input type="checkbox"/>		17	(>25%)	(<2%)	Mixed truck traffic with about equal single-unit and singl		

OK  Cancel

**Figura 5.11. Pantalla de cargas por defecto para TPDA.**











Hacer clic en *OK* y regresar a la ventana de la *distribución de la clase vehicular (vehicle class distribution)*. Como se muestra en la Figura 5.12, el TTC 14 para la clase vehicular es visto en la pantalla. Lo siguiente es, hacer clic en la pestaña de la *distribución horaria (hourly distribution)*.



**Traffic Volume Adjustment Factors**

Monthly Adjustment
  Vehicle Class Distribution
  Hourly Distribution
  Traffic Growth Factors

AADTT distribution by vehicle class

Class 4	2.9	
Class 5	56.9	
Class 6	10.4	
Class 7	3.7	
Class 8	9.2	
Class 9	15.3	
Class 10	0.6	
Class 11	0.3	
Class 12	0.4	
Class 13	0.3	
Total	100.0	

Note: AADTT distribution must total 100%.

Load Default Distribution

Level 1: Site Specific Distribution  
 Level 2: Regional Distribution  
 Level 3: Default Distribution

Load Default Distribution

OK Cancel

**Figura 5.12. Pantalla de distribución de clase vehicular.**

### 2.3 Distribución horaria.

Ingresar la distribución horaria del TPDA como es mostrado en la Figura 5.13. Lo siguiente es hacer clic en la pestaña de *factores de crecimiento de tráfico (Traffic Growth Factors)*.

**Traffic Volume Adjustment Factors**

Monthly Adjustment
  Vehicle Class Distribution
  Hourly Distribution
  Traffic Growth Factors

Hourly truck traffic distribution by period beginning:

Midnight	0.7	Noon	5.7
1:00 am	0.4	1:00 pm	5.4
2:00 am	0.4	2:00 pm	5.4
3:00 am	0.5	3:00 pm	5.6
4:00 am	1.2	4:00 pm	5.8
5:00 am	4.0	5:00 pm	6.2
6:00 am	7.3	6:00 pm	5.7
7:00 am	6.7	7:00 pm	5.0
8:00 am	5.9	8:00 pm	4.1
9:00 am	5.8	9:00 pm	3.1
10:00 am	5.7	10:00 pm	2.3
11:00 am	5.7	11:00 pm	1.4

Note: The hourly distribution must total 100%

Total: 100.0

OK Cancel

**Figura 5.13. Pantalla de distribución horaria.**

### 2.4 Factores de crecimiento de tráfico.

Los datos dados sugieren que el tráfico crece 4.0% con una tasa compuesta. El programa usará una función por defecto para el crecimiento de la tasa compuesta. Seleccionar *crecimiento compuesto (compound growth)* e ingresar la tasa del 4.0% como es mostrado en la Figura 5.14.

The screenshot shows a dialog box titled "Traffic Volume Adjustment Factors". At the top, there are four tabs: "Monthly Adjustment", "Vehicle Class Distribution", "Hourly Distribution", and "Traffic Growth Factors". The "Traffic Growth Factors" tab is active. Below the tabs, there are several input fields and a section for the default growth function. The "Opening Date" is set to "December, 2005" and "Design Life (years)" is set to "20". The "AADTT" is "12053", "% Traffic Design Direction" is "50", and "% Traffic Design Lane" is "80". There is a checkbox for "Vehicle-class specific traffic growth" which is unchecked. The "Default Growth Function" section has three radio buttons: "No Growth", "Linear Growth", and "Compound Growth", with "Compound Growth" selected. Below this, the "Default growth rate (%)" is set to "4.5". A "View Growth Plots" button is located at the bottom right of the dialog. At the very bottom, there are "OK" and "Cancel" buttons.

**Figura 5.14. Pantalla de factores de crecimiento de tráfico.**

Lo siguiente es hacer clic en *ver la gráfica de crecimiento (view growth plots)* para abrir una hoja de Microsoft Excel el cual muestra el crecimiento del TPDA para cada clase vehicular en toda la vida de diseño (no aplicable en la versión demo).

Cerrar las hojas de Excel y hacer clic en *OK* sobre la ventana de *ajustes de volúmenes (volume adjustments)* para regresar a la ventana principal.

### **3. Factores de distribución de carga por eje (axle load distribution factors).**

Esta ventana permite al usuario especificar el porcentaje de vehículos en cada clase vehicular, para cada nivel de carga y para cada tipo de eje. Este ejemplo de diseño usa los valores de la distribución del LTPP por defecto y por lo tanto, se utilizará la entrada de datos del nivel 3 por defecto. Hacer clic en el botón de círculo para el nivel 3 de los factores de distribución de carga mostrados en la Figura 5.15. El programa automáticamente carga los valores por defecto para esta entrada de datos. Hacer *OK* para regresar a la ventana principal.

Nótese que el programa también permite exportar un archivo salvado previamente si el usuario así lo escoge.

Season	Veh. Class	Total	3000	4000	5000	6000	7000
January	4	100.00	1.8	0.96	2.91	3.99	6.8
January	5	100.00	10.05	13.21	16.42	10.61	9.22
January	6	100.00	2.47	1.78	3.45	3.95	6.7
January	7	100.00	2.14	0.55	2.42	2.7	3.21
January	8	100.00	11.65	5.37	7.84	6.99	7.99
January	9	100.00	1.74	1.37	2.84	3.53	4.93
January	10	100.00	3.64	1.24	2.36	3.38	5.18
January	11	100.00	3.55	2.91	5.19	5.27	6.32
January	12	100.00	6.68	2.29	4.87	5.86	5.97
January	13	100.00	8.88	2.67	3.81	5.23	6.03

**Figura 5.15. Pantalla de factores de distribución carga por eje.**

### **4. Entrada de datos generales (general traffic inputs).**

Esta ventana permite al usuario proporcionar las entradas de tráfico para el desvío de la rodadura y tiene 3 pestañas de propiedades, denominados:

*Número de ejes/vehículo (number of axles/truck).*

*Configuración del eje (axle configuration).*

*Distancia entre ejes (wheelbase).*

La entrada de datos para las siguientes consideraciones del desvío lateral del tráfico son mostrados en la Figura 5.16.

- i. Localización promedio de la llanta: 18 pulg.
- ii. Desviación estándar de la rodadura: 10
- iii. Ancho de carril de diseño: 12 pies.

#### **4.1 Número de ejes/vehículo.**

La entrada del número de ejes por vehículo es mostrado en la Figura 5.15.

	Single	Tandem	Tridem	Quad
Class 4	1.62	0.39	0	0
Class 5	2	0	0	0
Class 6	1.02	0.99	0	0
Class 7	1	0.26	0.83	0
Class 8	2.38	0.67	0	0
Class 9	1.13	1.93	0	0
Class 10	1.19	1.09	0.89	0
Class 11	4.29	0.26	0.06	0
Class 12	3.52	1.14	0.06	0
Class 13	2.15	2.13	0.35	0

**Figura 5.16. Entrada general de datos de tráfico – pantalla de número de eje/vehículo.**

#### 4.2 Configuración de ejes.

Las siguientes entradas de la configuración de ejes son mostradas en la Figura 5.17:

1. Ancho promedio de ejes: 8.5 pies.
2. Espaciamiento de llantas duales: 12 pulg.
3. Presión de llantas:
  - Llanta simple: 120 psi.
  - Llanta doble: 120 psi.
4. Espaciamiento de ejes:
  - Eje tandem: 51.6 pulg.
  - Eje tridem: 49.2 pulg.
  - Eje cuádruple: 49.2 pulg.

Figura 5.17. Entrada general de datos de tráfico – pantalla de configuración de eje.

#### 4.3 Distancia entre ejes.

Las siguientes entradas de la distancia entre ejes (*wheelbase*) son mostradas en la Figura 5.18:

1. Espaciamiento promedio del eje:

Corto: 12 pies.

Mediano: 15 pies.

Largo: 18 pies.

2. Porcentaje de vehículos:

Corto: 2.0%

Mediano: 20.0%

Largo: 78.0%

Hacer clic en *OK* para regresar a la ventana principal del programa. El usuario, en esta etapa, ha hecho todas las entradas de datos del tráfico y está listo para continuar con las entradas de datos del Clima para el proyecto. Es recomendable salvar el archivo antes de proceder.

**General Traffic Inputs**

Lateral Traffic Wander

Mean wheel location (inches from the lane marking): 18

Traffic wander standard deviation (in): 10

Design lane width (ft): (Note: This is not slab width): 12

Number Axles/Truck  Axle Configuration  Wheelbase

Wheelbase distribution information for JPCP top-down cracking. The wheelbase refers to the spacing between the steering and the first device axle of the truck-tractors or heavy single units.

	Short	Medium	Long
Average Axle Spacing (ft)	12	15	18
Percent of trucks (%)	33.0	33.0	34.0

OK Cancel

**Figura 5.18. Entrada general de datos de tráfico – pantalla de distancia entre ejes.**

#### 5.4.9.4 ENTRADA DE DATOS DEL CLIMA.

##### 1. Clima.

Hay varios métodos para introducir la entrada de datos del clima en el programa, dependiendo de la información disponible y las consideraciones del tipo de pavimento.

Este ejemplo de diseño, aunque no especifique la localización exacta del proyecto, proporciona detalles generales del vecindario del proyecto. El usuario puede importar archivo de datos generados de clima ó generar uno para una localización específica. En este caso, el usuario tiene que generar un nuevo archivo. El usuario tiene que cargar los datos del clima para que el software de la Guía de Diseño pueda predecir los gradientes de humedad y temperatura en el diseño de prueba.

Hacer clic en *Clima (climate)* en la ventana principal del programa. En la ventana principal del *clima*, como es mostrado en la Figura 5.19, hacer clic en *Generar (generate)* para generar un nuevo archivo de datos de clima. Lo siguiente es hacer clic en el botón de círculo correspondiente a *datos del clima para una estación de tiempo específica (climatic data for a specific weather station)*. Escoger Miami, FL de la lista de los datos de las estaciones del tiempo. Ingresar la *profundidad del nivel freático (pies) (depth of water table)* como 15 pies como es mostrado en la Figura 5.20.

**Environment/Climatic**

Current climatic data file: C:\ADG2002\Projects\Mi clima.icm

Import previously generated climatic data file.

Generate new climatic data file.

Latitude (degrees.minutes): 25.43

Longitude (degrees.minutes): 80.18

Elevation (ft):

Seasonal

Depth of water table (ft)	
Annual average	32.8

Note: Ground water table depth is a positive number measured from the pavement surface.

**Figura 5.19. Pantalla de clima.**

**Environment/Climatic**

Climatic data for a specific weather station.  
 Interpolate climatic data for given location.

Latitude (degrees.minutes): 25.43

Longitude (degrees.minutes): 80.18

Elevation (ft):

Seasonal

Depth of water table (ft)	
Annual average	32.8

Note: Ground water table depth is a positive number measured from the pavement surface.

Select weather station:

- KEY WEST, FL
- LEESBURG, FL
- MARATHON, FL
- MARIANNA, FL
- MAYPORT, FL
- MELBOURNE, FL
- MIAMI, FL
- MIAMI, FL
- MIAMI, FL
- NEW PORT RITCHIE, FL
- ORLANDO, FL
- ORLANDO, FL

Station Location:  
INTERNATIONAL AIRPORT

Months of available data:66

**Figura 5.20. Generando el archivo de datos del clima para la localización del proyecto.**



El programa crea el archivo de los datos de clima para el proyecto. Después de que es creado este archivo, el programa da un aviso al usuario para salvarlo. Salvar el archivo en el directorio del proyecto “C:\DG2002\Projects\AC2005\Mi clima.icm”.

Nótese también que el programa automáticamente crea un archivo llamado *climate.tmp* en el directorio donde se ha guardado el proyecto. Este es el archivo que el programa lee durante la etapa de análisis de la información horaria del clima. Este archivo contiene el tiempo de la salida del sol, tiempo de la puesta del sol y de la radiación para cada día del período de vida de diseño. Además, por cada período de 24 horas para cada día de la vida de diseño, la temperatura, precipitación, velocidad del aire, rayos del sol y la profundidad del nivel freático, son guardados en el archivo de clima.

Para esta etapa, el usuario tiene completo la entrada de datos del clima requeridos por el programa. El icono de codificación del color tendrá un color verde para el tráfico y el clima, y tendrá un color rojo para la estructura, indicando que la entrada de datos del tráfico y el clima están completos y que la entrada de datos de la estructura todavía no es colocada.

#### **5.4.9.5 ENTRADA DE DATOS ESTRUCTURAL.**

En esta etapa el usuario necesita escoger los parámetros estructurales y la combinación de capas que pueden ser evaluadas para su comportamiento estructural. Como una explicación, el proceso es un proceso iterativo en el cual el usuario tendrá que desarrollar un diseño de prueba y hacer varias modificaciones para hacerlo, antes de alcanzar un diseño factible y económico (ó final).

Basado en los materiales disponibles para las diferentes capas, escoger las siguientes capas en el diseño de prueba:

1. Capa de concreto asfáltico de 3.0 pulg.
2. Capa de base estabilizada químicamente de suelo cemento de 6.0 pulg.
3. Capa de subbase compactada de grava triturada de 6.0 pulg.
4. Capa de subrasante compactada A-2-4 semi-infinita.

La entrada de datos estructural es de tres categorías: *Propiedades de superficie y drenaje (drainage and surface properties)*, y *propiedades de las capas (layer properties)* y *grietas por temperatura (thermal cracking)*. Estas tres categorías de entrada de datos tienen vínculo directo a la pantalla principal del programa.

### **1. Propiedades de la superficie y drenaje.**

De la ventana principal del programa hacer clic en *propiedades de la superficie y drenaje (drainage and surface properties)* y se abrirá la ventana para la introducción de datos mostrada en la Figura 5.21.

**Figura 5.21. Pantalla de las propiedades de la superficie y drenaje.**

Introducir 0.85 para la *absorbencia de la superficie de onda corta (surface shortwave absorptivity)*, 12 pies para la *longitud de la trayectoria del*

*drenaje (drainage path length)* y 2 por ciento para la *sección transversal del pavimento (pavement cross slope)*. Nótese que el diseño de pavimento flexible no requiere el uso de la entrada de datos de *infiltración (infiltration)*. Hacer clic en *OK* y regresar a la ventana principal.

## **2. Capas.**

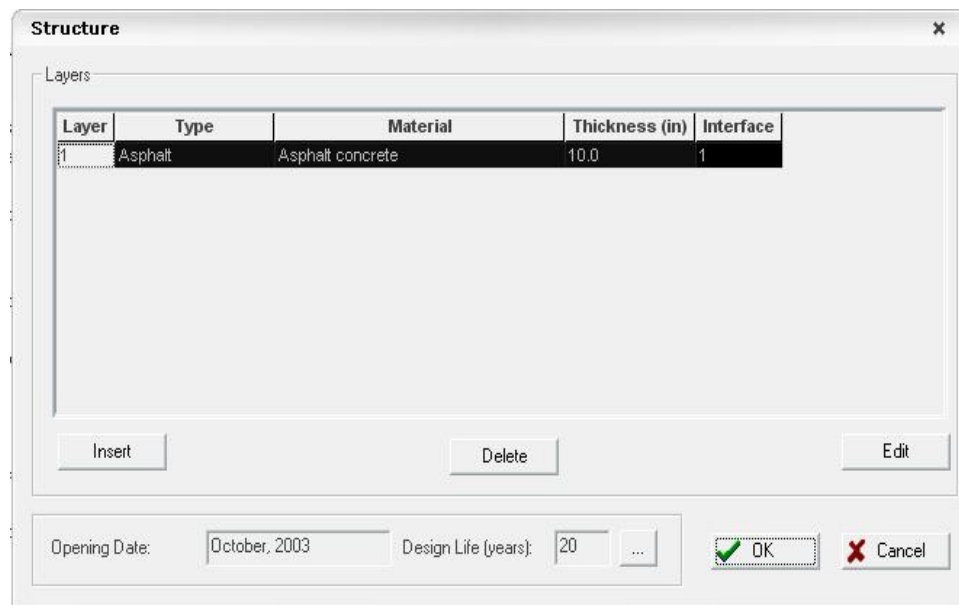
En la ventana principal del programa, hacer clic en *capas (layers)* para agregar y editar las capas del pavimento en la prueba de diseño. El programa abre la ventana de capas como es mostrado en la Figura 5.22. Las tres funciones principales de esta ventana, permite al usuario realizarse lo siguiente:

- Insertar una capa después de haber seleccionado una capa haciendo clic en el botón *insertar (insert)*.
- Borrar una capa seleccionada haciendo clic en el botón *borrar (delete)*.
- Editar las propiedades de la capa de una capa seleccionada haciendo clic en el botón *editar (edit)*.

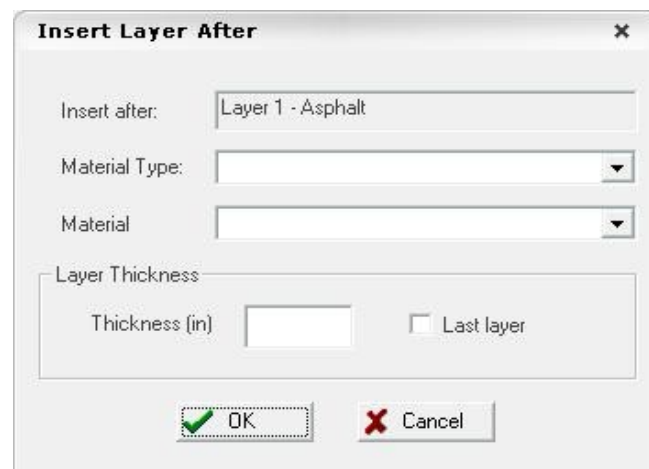
La primera capa de pavimento, la capa de concreto asfáltico es mostrada en la Figura 5.22. Luego, el usuario tiene que agregar una capa (por debajo) de la capa de concreto asfáltico. Para agregar una capa después de la capa de concreto asfáltico, seleccionar la capa 1 haciendo clic en la fila de la capa 1 y luego insertar una capa haciendo clic en el botón *insertar (insert)*. El programa abre ahora una ventana que se muestra en la Figura 5.23a que permite al usuario seleccionar la capa a ser agregada.

Como es mostrado en la Figura 5.23b, del menú desplegable, seleccionar *base estabilizada (stabilized base)* para el *tipo de material (material type)*, *suelo cemento (soil cement)* para el *material* e introducir el valor de 5.0 para el espesor (*thickness*). Luego, hacer clic en *OK* para regresar a la ventana

de *capas (layers)* mostrada en la Figura 5.24. Esa ventana ahora muestra la nueva capa de base estabilizada químicamente.



**Figura 5.22. Pantalla de las capas de la estructura.**



**Figura 5.23a. Pantalla inicial para insertar una capa.**

**Insert Layer After**

Insert after: Layer 1 - Asphalt

Material Type: Stabilized Base

Material: Soil Cement

Layer Thickness

Thickness (in) 5.0  Last layer

OK Cancel

**Figura 5.23b. Entrada de datos para insertar la capa estabilizada con cemento.**

**Structure**

Layers

Layer	Type	Material	Thickness (in)	Interface
1	Asphalt	Asphalt concrete	10.0	1
2	Chemically Stabilized	Soil Cement	5.0	1

Insert Delete Edit

Opening Date: October, 2003 Design Life (years): 20 ... OK Cancel

**Figura 5.24. Pantalla de capas después de insertar la capa de suelo cemento.**

Luego, seleccionar la capa 2 y hacer clic en *insertar (insert)* para agregar una capa después de la capa de suelo cemento. Seleccionar *base granular (granular base)* para el *tipo de material* y *grava triturada (crushed gravel)* para *material* mostrado en la Figura 5.25. Introducir un *espesor (thickness)* de 6 pulg., hacer clic en *OK* y regresar a la ventana de *capas (layers)*.

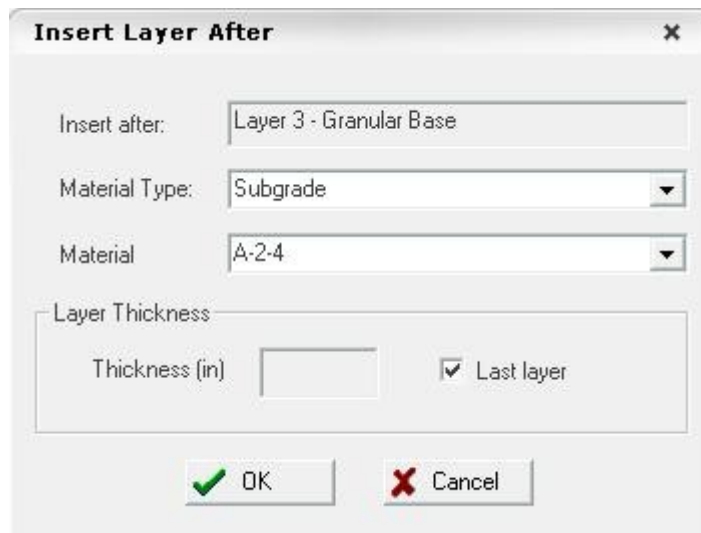
Repetir los mismos pasos otra vez para agregar la capa de subrasante de A-2-4 como es mostrado en la Figura 5.26. Seleccionar la opción *última capa (last layer)* en vez de introducir el espesor de esta capa. Hacer clic en *OK* y regresar a la ventana principal que ahora muestra las cuatro capas agregadas a la estructura como es mostrado en la Figura 5.27.



The screenshot shows a dialog box titled "Insert Layer After" with a close button (X) in the top right corner. It contains the following fields and options:

- Insert after:** Layer 2 - Chemically Stabilized
- Material Type:** Granular Base (dropdown menu)
- Material:** Crushed gravel (dropdown menu)
- Layer Thickness:**
  - Thickness (in):** 6.0 (input field)
  - Last layer
- Buttons:** OK (with a green checkmark icon) and Cancel (with a red X icon).

**Figura 5.25. Entrada de datos para insertar la capa de grava triturada.**



The screenshot shows a dialog box titled "Insert Layer After" with a close button (X) in the top right corner. It contains the following fields and options:

- Insert after:** Layer 3 - Granular Base
- Material Type:** Subgrade (dropdown menu)
- Material:** A-2-4 (dropdown menu)
- Layer Thickness:**
  - Thickness (in):** (empty input field)
  - Last layer
- Buttons:** OK (with a green checkmark icon) and Cancel (with a red X icon).

**Figura 5.26. Insertando la subrasante compactada después de la base granular.**

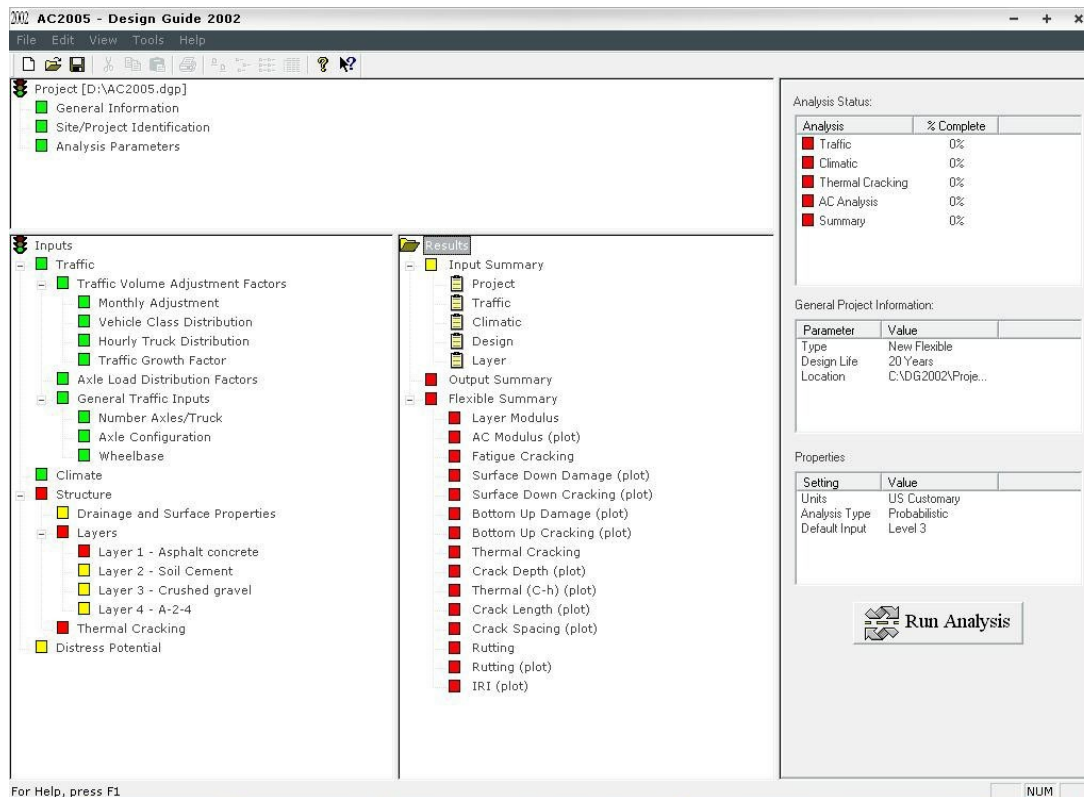
La ventana individual para la entrada de datos de las propiedades de los materiales de las capas, puede ser accedida desde la ventana de *capas* mostrada en la Figura 5.27 ó directamente de la ventana principal del programa. Para acceder a ventana de las propiedades de los materiales de la ventana de *capas*, seleccionar la capa de pavimento deseada y hacer clic en *editar (edit)*. Regresar a la ventana principal del programa haciendo clic en *OK* en la ventana de *capas*. La ventana principal del programa aparece ahora, como es mostrado en la Figura 5.28.

The screenshot shows a window titled "Structure" with a close button (X) in the top right corner. Inside the window, there is a section labeled "Layers" containing a table with the following data:

Layer	Type	Material	Thickness (in)	Interface
1	Asphalt	Asphalt concrete	10.0	1
2	Chemically Stabilized	Soil Cement	5.0	1
3	Granular Base	Crushed gravel	6.0	1
4	Subgrade	A-2-4	Semi-Infinite	n/a

Below the table, there are three buttons: "Insert", "Delete", and "Edit". At the bottom of the window, there are two input fields: "Opening Date:" with the value "October, 2003" and "Design Life (years):" with the value "20". To the right of these fields are two buttons: "OK" (with a green checkmark) and "Cancel" (with a red X).

**Figura 5.27. Pantalla de capas después de la adición de todas las capas.**



**Figura 5.28. Pantalla de capas después de la adición de todas las capas.**

### **2.1 Capa 1, concreto asfáltico.**

Hacer clic en la *capa 1 – concreto asfáltico (asphalt concrete)* para editar las propiedades de los materiales de la capa de concreto asfáltico. Esta abre una ventana con tres pestañas de propiedades para las propiedades de *mezcla asfáltica (asphalt mix)*, *carpeta asfáltica (asphalt binder)* y *asfalto en general (asphalt general)*. La ventana principal también permite al usuario introducir datos de entrada de espesores de capa, y además de seleccionar el nivel de entrada de datos que el diseñador usará para las propiedades del concreto asfáltico. Introducir un espesor de 3.0 pulg. para la capa de concreto asfáltico y escoger el nivel 3 de entrada de datos del menú desplegable. Más adelante, en la hoja de propiedades de los *agregados de la mezcla asfáltica (asphalt mix)*, ingresar la graduación de agregados usado en el diseño de mezcla como es mostrado en la Figura 5.29:



- i. Porcentaje acumulado que es retenido en la malla  $\frac{3}{4}$ " (*cumulative % retained on  $\frac{3}{4}$ " sieve*): 5.
- ii. Porcentaje acumulado que es retenido en la malla  $\frac{3}{8}$ " (*cumulative % retained on  $\frac{3}{8}$ " sieve*): 30.
- iii. Porcentaje acumulado que es retenido en la malla #4 (*cumulative % retained on #4 sieve*): 46.
- iv. Porcentaje que pasa la malla #200 (*percent passing #200 sieve*): 4.

Después de completar la entrada de datos en la ventana de la entrada de datos de los *agregados de la mezcla asfáltica*, hacer clic en la pestaña de la *tipo de cemento asfáltico (asphalt binder)* y seleccionar el *grado de viscosidad convencional (conventional viscosity grade)* AC20 como es mostrado en la Figura 5.30.

**Asphalt Material Properties**

Level: 3

Asphalt material type: Asphalt concrete

Layer thickness (in): 2.5

Asphalt Mix |  Asphalt Binder |  Asphalt General

Aggregate Gradation:

Cumulative % Retained 3/4 inch sieve:	5
Cumulative % Retained 3/8 inch sieve:	30
Cumulative % Retained #4 sieve:	46
% Passing #200 sieve:	4

OK Cancel

**Figura 5.29. Agregados para mezcla asfáltica.**

The screenshot shows a software dialog box titled "Asphalt Material Properties". At the top left, there is a "Level:" dropdown menu set to "3". To its right, "Asphalt material type:" is a dropdown menu set to "Asphalt concrete", and "Layer thickness (in):" is a text input field containing "2.5". Below these are three tabs: "Asphalt Mix", "Asphalt Binder", and "Asphalt General", with "Asphalt General" being the active tab. Inside the "Asphalt General" tab, there is an "Options" section with three radio buttons: "Superpave binder grading", "Conventional viscosity grade" (which is selected), and "Conventional penetration grade". Below the options is a "Viscosity Grade" section with six radio buttons: "AC 2.5", "AC 5", "AC 10", "AC 20" (selected), "AC 30", and "AC 40". At the bottom of the dialog, there are two text input fields: "A" containing "10.7709" and "VTS" containing "-3.6017". At the very bottom are "OK" and "Cancel" buttons.

**Figura 5.30. Tipo de cemento asfáltico.**

Luego, hacer clic en la pestaña de *mezcla asfáltica en general (asphalt general)* y hacer la siguiente entrada de datos para este ejemplo como es mostrado en la Figura 5.31:

- a. General:
  - i. Temperatura de referencia (*reference temperature*) (°F): 70.
- b. Propiedades volumétricas (*volumetric properties*):
  - i. Contenido efectivo de la carpeta (*effective binder content*) (%): 5.
  - ii. Relación de vacíos (*air voids*) (%): 3.5.
    1. Total de peso unitario (*total unit weight*) (lb/pie<sup>3</sup>): 139.2.
- c. Relación de Poisson (*Poisson's ratio*): 0.30.
- d. Propiedades térmicas (*thermal properties*):
  - i. Conductividad térmica del asfalto (*thermal conductivity asphalt*) (BTU/h-pie-°F): 0.67.

- ii. Capacidad calorífica del asfalto (*heat capacity asphalt*) (BTU/lb-°F): 0.23.

Hacer clic en *OK* y regresar a la ventana principal del programa. Nótese que el icono adyacente a la *capa 1-concreto asfáltico* ahora es de color verde debido a que la entrada de datos ha sido completada en esta capa.

**Figura 5.31. Mezcla asfáltica en general.**

## **2.2 Capa 2, suelo cemento.**

Hacer clic en la capa 2 en la ventana del principal del programa. El tipo de material escogido y espesor aparece en la ventana (nótese que esta información puede ser modificada en esta ventana). Introducir las siguientes entradas de datos como son mostradas en la Figura 5.32.

**Chemically Stabilized Material - Layer #2**

General Properties

Material type: Soil Cement

Layer thickness (in): 5

Unit weight (pcf): 100

Poisson's ratio: 0.28

Strength Properties

Elastic/resilient modulus (psi): 500000

Minimum elastic/resilient modulus (psi): 100000

Modulus of rupture (psi): 300

Thermal Properties

Thermal conductivity (BTU/hr-ft-F): 1.25

Heat capacity (BTU/lb-F): 0.28

OK Cancel

**Figura 5.32. Propiedades del suelo cemento.**

- i. Peso unitario (*unit weight*): 100 lb/pie<sup>3</sup>.
- ii. Relación de Poisson (*Poisson's ratio*): 0.28.
- iii. Módulo resiliente (*resilient modulus*): 600000 psi.
- iv. Conductividad térmica (*thermal conductivity*): 1.25.
- v. Capacidad calorífica (*heat capacity*): 0.28.

Hacer clic en *OK* y regresar a la ventana principal del programa. Nótese que el icono adyacente a la *capa 2 – suelo cemento*, ahora es verde.

### **2.3 Capa 3, grava triturada.**

Hacer clic en la *capa3 - grava triturada* en la ventana principal del programa para introducir la entrada de datos de la capa de base de piedra triturada. En la Figura 5.33 se muestra la ventana en la cual el usuario dispone para hacer la introducción de datos para una capa abierta sin ligar. Nótese que la opción hecha para el tipo de material sin ligar y el espesor de

capa, aparecen en la ventana. (Esta ventana también permite al usuario hacer los cambios que sean necesarios de esas opciones).

Escoger el botón de círculo correspondiente a la *entrada de datos del nivel 3*, el cual solamente requiere la entrada del módulo para la propiedad del material. Ingresar los siguientes valores para datos de entrada:

- i. Relación de Poisson (*Poisson's ratio*): 0.28.
- ii. Coeficiente de presión lateral (*coefficient of lateral pressure*): 0.50.
- iii. Módulo (*modulus*) (psi): 41867.

Para el *tipo de análisis (analysis type)*, hacer clic en el botón de círculo adyacente a la entrada de datos de *ICM* para indicar que el usuario hará las entradas al programa de ICM.

**Figura 5.33. Pantalla de capa no ligada para capa de base de grava triturada – propiedades de resistencia.**

Luego, hacer clic en la pestaña de *ICM* para introducir la entrada de datos. La entrada de datos hecha en esta ventana, es mostrada en la Figura 5.34, y son los siguientes:

- i. Índice de plasticidad (*plasticity index*), PI: 0.
- ii. Pasa la malla #200 (*passing #200 sieve*), %:5.
- iii. Pasa la malla #4 (*passing #4 sieve*), %:30.
- iv. D60 (mm): 7.

Seleccionar el botón de círculo correspondiente a la *capa compactada sin ligar (compacted unbound layer)* debido a que el material de base es compactado antes de ser colocada la capa de base tratada. Hacer clic en *actualizar (update)* y observar los parámetros calculados del ICM. Luego, hacer clic en *OK* y regresar a la ventana principal del programa.

Unbound Layer - Layer #3

Unbound Material: Crushed gravel Thickness(in): 6  Last layer

Strength Properties  ICM

Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI: 0

Passing #200 sieve (%): 5

Passing #4 sieve (%): 30

D60 (mm): 7

Compacted unbound material

Uncompacted/natural unbound material

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf): 120

Specific gravity of solids, Gs: 2.6

Saturated hydraulic conductivity (ft/hr): 236

Optimum gravimetric water content (%): 6

Calculated degree of saturation (%): 78.0

Soil water characteristic curve parameters

Parameter	Value
af	0.2
bf	7.5
cf	1.12
hr	0.0279

**Figura 5.34. Pantalla de capa no ligada para capa de base de grava triturada – propiedades de ICM.**

### 2.4 Capa 4, A-2-4 (arena limosa).

La cuarta capa en este diseño de prueba es una subrasante compactada clasificada como un A-2-4 por el sistema de clasificación de AASHTO. Hacer clic en la *capa 3 – A-2-4* en la ventana principal del programa. La entrada de datos para materiales no ligados solo es disponible para la resistencia del material y la entrada de datos de las propiedades del ICM. Escoger el botón de círculo correspondiente al nivel 3 de la entrada de datos, el cual requiere solamente la entrada del módulo para la propiedad del material. Ingresar los siguientes valores de entrada de datos en la pestaña de propiedades de resistencia (*strength properties*) como es mostrado en la Figura 5.35:

- i. Relación de Poisson (*Poisson's ratio*): 0.25.
- ii. Coeficiente de presión lateral (*coefficient of lateral pressure*): 0.50.
- iii. Módulo (*modulus*) (psi): 28000.

**Figura 5.35. Pantalla de capa no ligada para capa de subrasante – propiedades de resistencia.**

Para el *tipo de análisis (analysis type)*, hacer clic en el botón de círculo adyacente a la entrada de datos de *ICM* para indicar que el usuario hará la entrada de datos del *ICM* en el programa. Hacer clic en la pestaña de *ICM* y luego en la ventana de las propiedades de *ICM*, ingresar las siguientes entradas como es mostrado en la Figura 5.36:

- v. Índice de plasticidad (*plasticity index*), PI: 65.
- vi. Pasa la malla #200 (*passing #200 sieve*), %:23.
- vii. Pasa la malla #4 (*passing #4 sieve*), %:70.
- viii. D60 (mm): 0.15.

Luego, hacer clic en el botón de círculo correspondiente a *material no ligado sin compactar/natural (uncompacted/natural unbound material)*. Colocar el valor de 100 en el *peso unitario máximo seco (maximum dry unit weight)*, 2.5 en la *gravedad específica de los sólidos (specific gravity of solids)* y 28 en el *contenido gravimétrico óptimo de agua (optimum gravimetric water content)*. Hacer clic en *actualizar (update)* y observar los parámetros calculados del *ICM*. Después hacer clic en *OK* y regresar a la ventana principal del programa mostrada en la Figura 5.37. Nótese que en la Figura 5.37, los iconos adyacentes a todas las entradas de datos -*tráfico, clima y estructura*- son verdes, indicando que todas estas entradas están completas.



**Unbound Layer - Layer #3**

Unbound Material: A-2-4 Thickness(in):   Last layer

Strength Properties  ICM

Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI:

Passing #200 sieve (%):

Passing #4 sieve (%):

D60 (mm):

Compacted unbound material  
 Uncompacted/natural unbound material

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf):

Specific gravity of solids, Gs:

Saturated hydraulic conductivity (ft/hr):

Optimum gravimetric water content (%):

Calculated degree of saturation (%):

Soil water characteristic curve parameters

Parameter	Value
af	16.5
bf	1.44
cf	0.56
hr	550

OK  Cancel

Figura 5.36. Pantalla de capa no ligada para capa de subrasante – propiedades de ICM.

AC2005 - Design Guide 2002

File Edit View Tools Help

Project [D:\AC2005.dwg]

- General Information
- Site/Project Identification
- Analysis Parameters

Inputs

- Traffic
  - Traffic Volume Adjustment Factors
    - Monthly Adjustment
    - Vehicle Class Distribution
    - Hourly Truck Distribution
    - Traffic Growth Factor
  - Asile Load Distribution Factors
  - General Traffic Inputs
    - Number Axles/Truck
    - Asile Configuration
    - WheelBase
- Climate
- Structure
- Drainage and Surface Properties
- Layers
  - Layer 1 - Asphalt concrete
  - Layer 2 - Soil Cement
  - Layer 3 - Crushed gravel
  - Layer 4 - A-2-4
- Thermal Cracking
- Distress Potential

Results

- Input Summary
  - Project
  - Traffic
  - Climate
  - Design
  - Layer
- Output Summary
- Flexible Summary
  - Layer Modulus
  - AC Modulus (plot)
  - Fatigue Cracking
  - Surface Down Damage (plot)
  - Surface Down Cracking (plot)
  - Bottom Up Damage (plot)
  - Bottom Up Cracking (plot)
  - Thermal Cracking
  - Crack Depth (plot)
  - Thermal (C-h) (plot)
  - Crack Length (plot)
  - Crack Spacing (plot)
  - Rutting
  - Rutting (plot)
  - IRI (plot)

Analysis Status:

Analysis	% Complete
Traffic	0%
Climate	0%
Thermal Cracking	0%
AC Analysis	0%
Summary	0%

General Project Information:

Parameter	Value
Type	New Flexible
Design Life	30 Years
Location	C:\DG2002\Proj...

Properties:

Setting	Value
Units	US Customary
Analysis Type	Probabilistic
Default Input	Level 3

For Help, press F1

Figura 5.37. Pantalla principal del programa después de completar toda la entrada de datos.

### **3. Grietas por temperatura (thermal cracking).**

Esta ventana proporciona una interfase para proveer todas las entradas de datos requeridas para predecir grietas por temperatura. El software de la Guía de Diseño utiliza la resistencia a la tensión, conformidad de arrastre, coeficiente de contracción térmica, absorbencia de onda corta de la superficie, capacidad térmica y capacidad calorífica para predecir las grietas por temperatura. Estas entradas de datos pueden ser inclusive ingresadas por el usuario ó el software usará los valores por defecto que son calculados de las propiedades de los materiales de asfalto ingresadas en la primera capa de asfalto en la estructura de pavimento. Nótese que si el usuario trata de hacer la entrada de datos en la ventana de *grietas por temperatura* antes de que la entrada de datos de los materiales de la primera capa de concreto asfáltico sea finalizada, el programa le avisará al usuario que primero revise la ventana de las propiedades de los materiales. Para propósito de este ejemplo de diseño, hacer clic en el botón de círculo del nivel 3 de la entrada de datos y observar la entrada de datos por defecto para los materiales escogidos como son mostrados en la Figura 5.38.

**Thermal Cracking**

Level 1  
 Level 2  
 Level 3

Average tensile strength at 14 °F (psi):

Creep test duration (sec):

Loading Time sec	Creep Compliance (1/psi)		
	Low Temp (°F) -4	Mid Temp (°F) 14	High Temp (°F) 32
1	1.65929e-007	2.24142e-007	3.02777e-007
2	2.03647e-007	2.91262e-007	4.16572e-007
5	2.66974e-007	4.11782e-007	6.35134e-007
10	3.2766e-007	5.35091e-007	8.73841e-007
20	4.02141e-007	6.95326e-007	1.20226e-006
50	5.27193e-007	9.83042e-007	1.83305e-006
100	6.47029e-007	1.27742e-006	2.52198e-006

Compute mix coefficient of thermal contraction.

Mixture VMA (%):

Aggregate coefficient of thermal contraction:

Mix coefficient of thermal contraction (in/in/°F):

**Figura 5.38. Pantalla de grietas por temperatura.**

Nótese que en esta ventana, el usuario tiene la opción de *importar (importing)* un archivo de datos salvado anteriormente de la conformidad de arrastre, ó *exportar (exporting)* los datos actuales a un archivo para usarlo posteriormente. También, el *coeficiente de expansión térmica de la mezcla (mix coefficient of thermal expansion)*, puede aún ser calculado usando correlaciones por defecto ó puede ser usado un valor de entrada de datos ingresado por el usuario.

Hacer clic en *OK* y regresar a la ventana principal del programa.

#### 5.4.9.6 DETERIORO POTENCIAL.

Hacer clic en el ítem *deterioro potencial (distress potencial)* e ingresar *ninguno (none)* para la grieta de bloque y la grieta afuera del sellado longitudinal de la trayectoria de la llanta como es mostrado en la Figura 5.39.

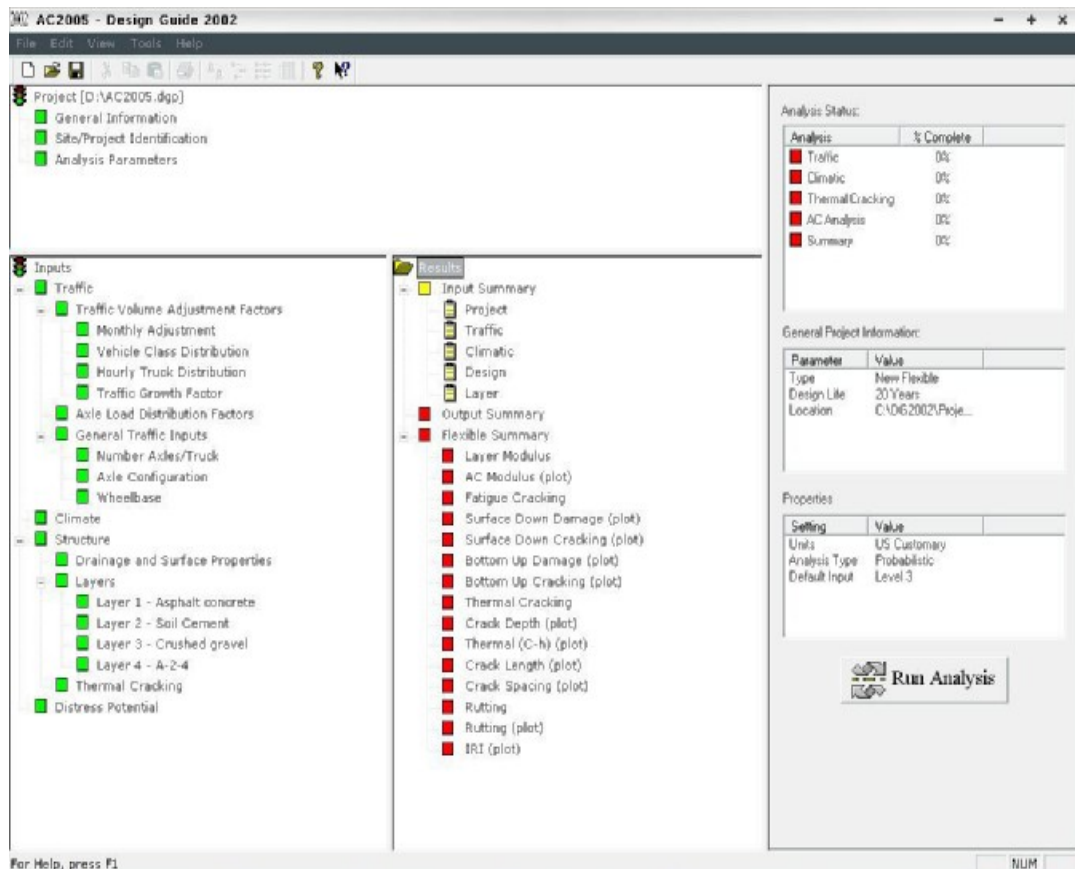
Note: The input values for distress potentials are not an estimated of the current or expected distress. The input values are regression equation inputs to determine future distress.

	Distress potential	Value	Standard error
Block cracking (L/M/H) (% of total lane area):	None	32	0
Sealed longitudinal cracks outside of wheel path (M/H) (ft/mile):	None	13.5	0
Patches (H) (% of total lane area):			
Potholes (H) (% of total lane area):			

OK Cancel

**Figura 5.39. Pantalla de deterioro potencial.**

Hacer clic y regresar a la ventana principal del programa como es mostrado en la Figura 5.40. Nótese que en la Figura 5.40, los iconos adyacentes a todas las entradas de datos (tráfico, clima y estructura) son de color verde lo cual indica que todas esas entradas están completas.



**Figura 5.40. Ventana principal con todas las entradas de datos completas.**

#### 5.4.9.7 CORRIDA DEL ANÁLISIS.

Después de que todas las entradas de datos son proporcionadas, el software de la Guía de Diseño tiene que comenzar el proceso de análisis para predecir el comportamiento del diseño de prueba a través de la vida de diseño

del pavimento. Hacer clic en *corrida del análisis (run analysis)*. El programa hará funcionar el tráfico, clima, módulos, grietas por temperatura, módulos de análisis del concreto asfáltico, y reportando el estado del análisis en la esquina superior derecha de la ventana principal del programa.

Al final del análisis, el programa crea un archivo resumen y otro archivo de salida de datos en el directorio del proyecto, *C:\DG2002\Projects\AC2005*. El archivo resumen está en formato Microsoft Excel con nombre de “*AC2005.xls*”. El resumen contiene una hoja resumen de la entrada de datos, valores de los módulos de los materiales calculados, resumen de deterioros para todas las predicciones de deterioro un formato de tabla. Más adelante, los deterioros pronosticados y el IRI son presentadas en formato gráfico. También presenta un resumen de confiabilidad donde muestra los criterios de comportamiento con su respectiva confiabilidad y permite verificar si se han cumplido o han fallado de acuerdo a lo estimado en el diseño, como se muestra en la Figura 5.41

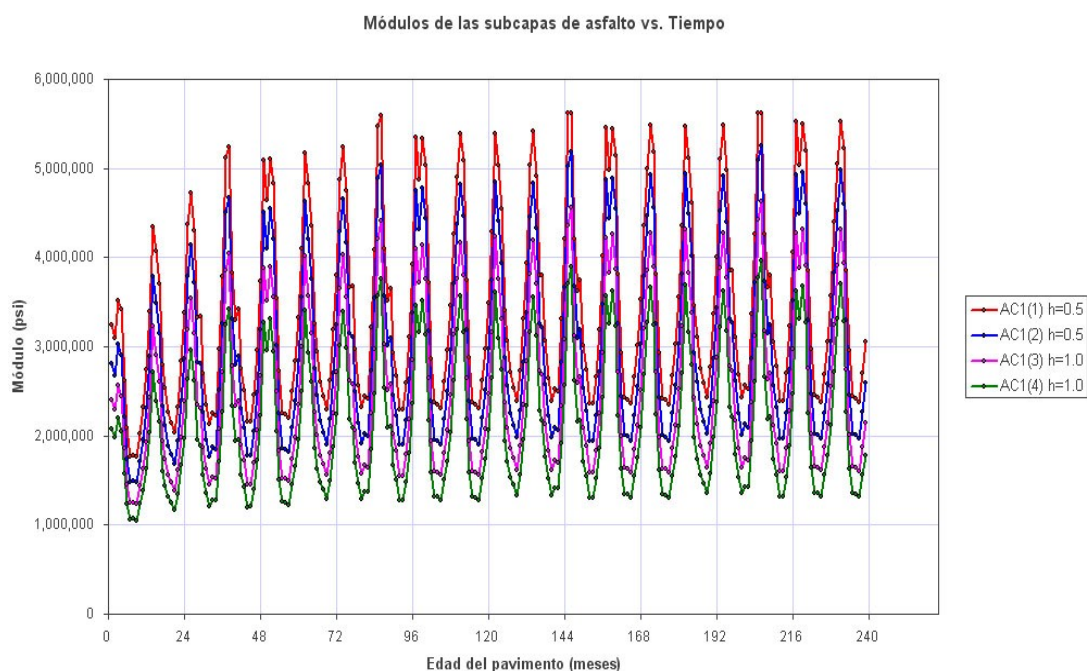
### Project: AC2005 Reliability Summary

Performance Criteria	Distress	Reliability	Distress	Reliability	Acceptable
	Target	Target	Predicted	Predicted	
Terminal IRI (in/mi)	316.8	90	115.4	99.999	Pass
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) (ft/500):	800	90	0.5	99.42	Pass
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	35	90	0	99.999	Pass
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	100	90	1	99.999	Pass
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture)	25	90			N/A
Permanent Deformation (AC Only) (in):	1	90	0.42	99.999	Pass
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	2	90	0.55	99.999	Pass

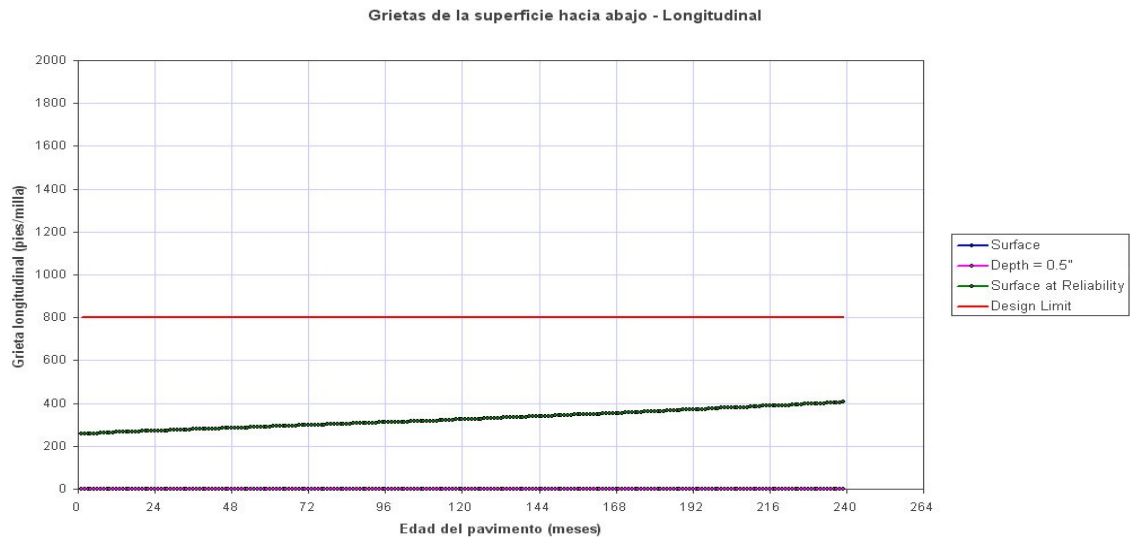
**Figura 5.41. Resumen de confiabilidad para toda la vida de diseño del pavimento.**

El módulo del concreto flexible pronosticado por el programa para las condiciones dadas de clima y humedad de la subrasante, es mostrado en la Figura 5.42. Estos valores de módulos son también notificados en una hoja de datos titulada *módulos de capas (layers modulus)*. Además desde la Figura 5.43 a la figura 5.47 se muestran las gráficas de las grietas longitudinales hacia abajo, piel de cocodrilo, grietas por temperatura, ahuellamiento e IRI respectivamente.

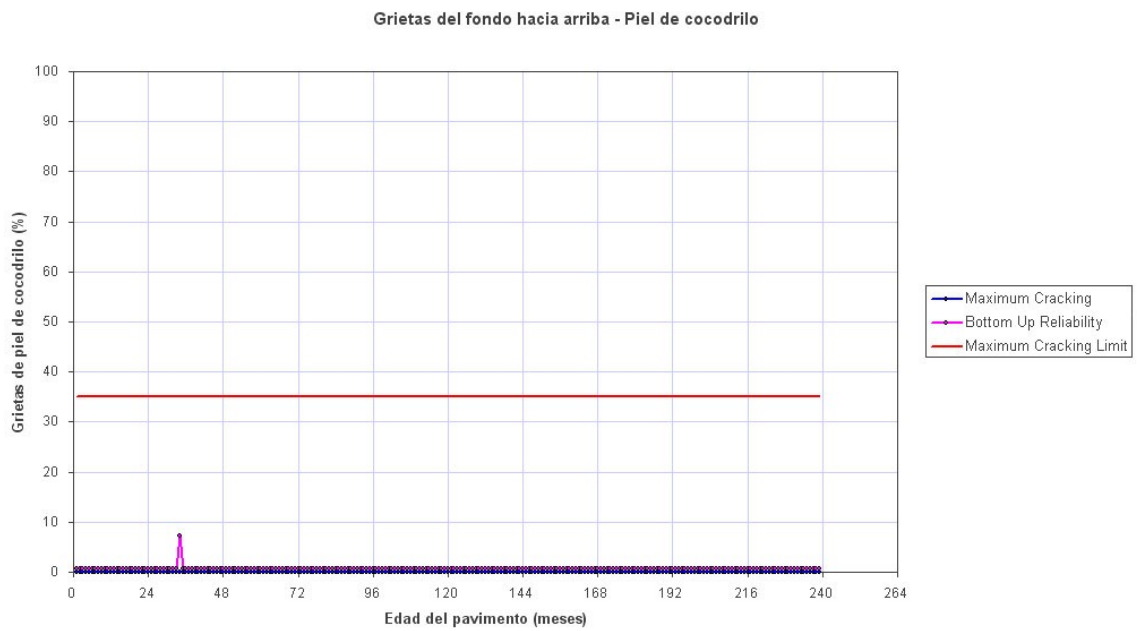
El archivo de salida viene acompañado de hojas de datos para todos estos datos, así como también hojas que ilustran el daño acumulado para cada deterioro (ver memoria de cálculo de pavimento flexible en el Anexo 2).



**Figura 5.42. Módulos del concreto asfáltico pronosticados en el diseño de prueba.**

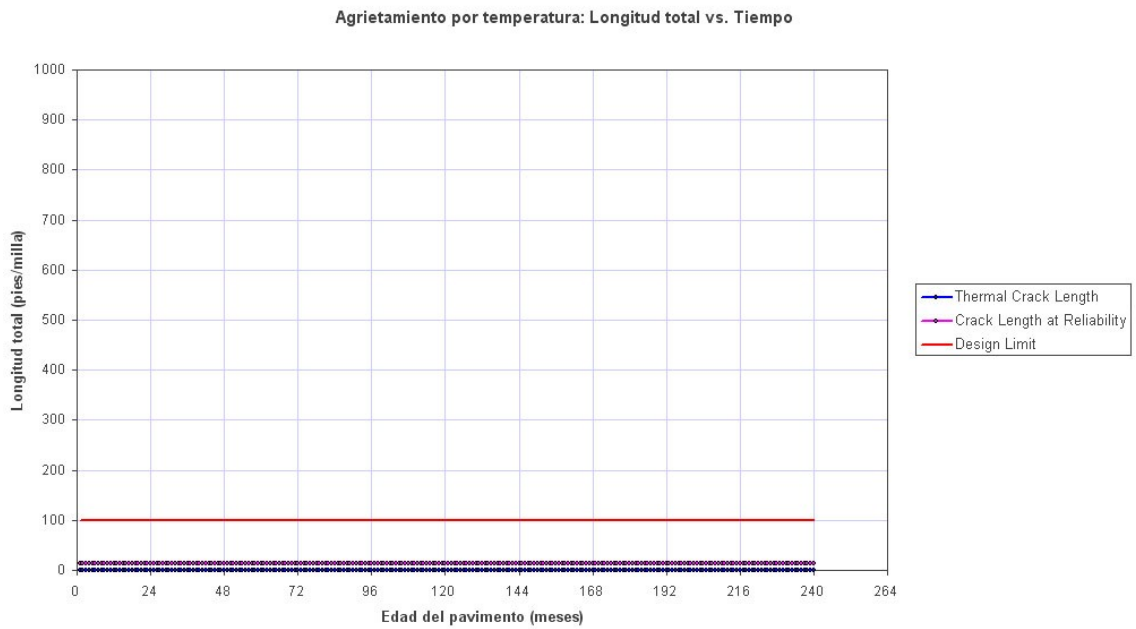


**Figura 5.43. Grietas de la superficie hacia abajo.**

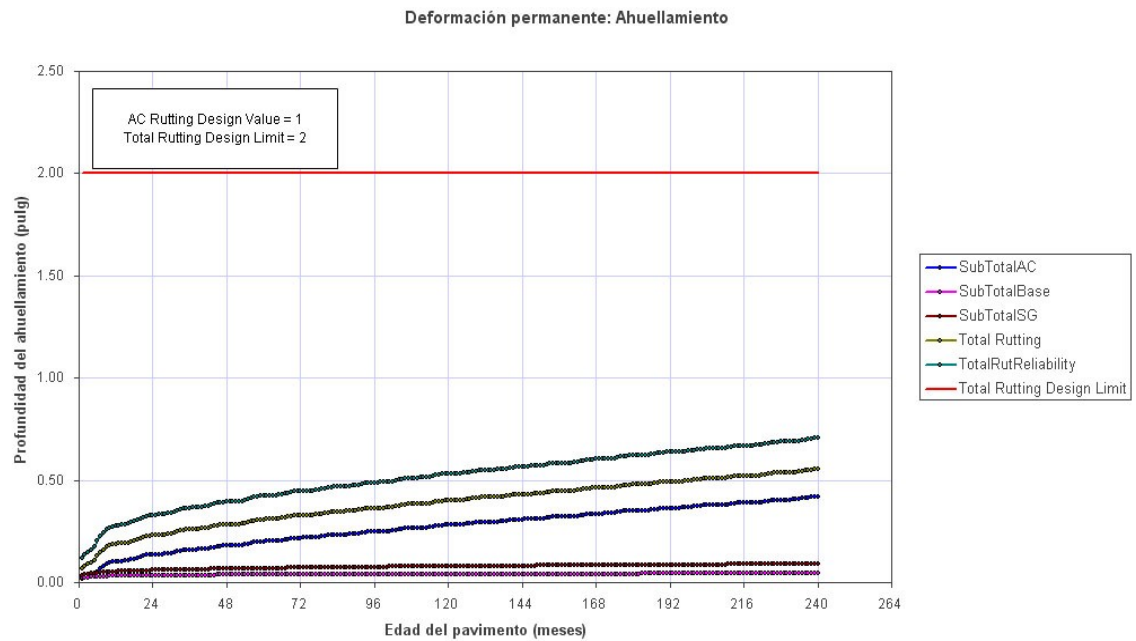


**Figura 5.44. Pronostico de las grietas de la piel de cocodrilo a través de toda la vida de diseño para el diseño de prueba.**



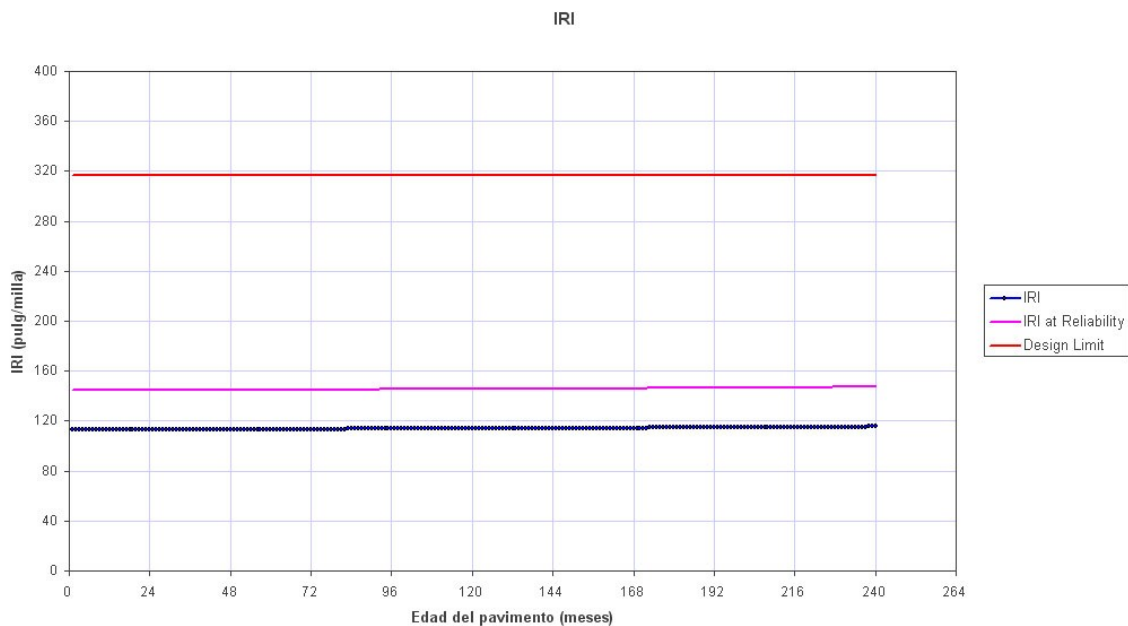


**Figura 5.45. Pronostico de las grietas por temperatura a través de la vida de diseño para el diseño de prueba.**



**Figura 5.46. Pronostico del ahuellamiento a través de toda la vida de diseño para el diseño de prueba.**





**Figura 5.47. Pronostico del IRI a través de todo el período de diseño para el diseño de prueba.**

#### **5.4.9.8 ANÁLISIS SENSITIVO Ó SUSCEPTIBLE.**

El diseño de prueba satisface los criterios de diseño especificados en el programa para todos los parámetros de análisis como son mostrados en la Figura 5.41. Por lo tanto, este diseño de prueba puede funcionar como un diseño factible pero el usuario será el que aprobará este diseño de acuerdo a las necesidades ó especificaciones que tenga que cumplir el proyecto.

#### **5.4.9.9 MODIFICAR EL DISEÑO DE PRUEBA.**

El usuario puede modificar el diseño de acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba de diseño. El usuario puede hacer varias corridas de casos diferentes para seleccionar ó escoger el diseño óptimo ó factible haciendo ciertos cambios por ejemplo en las propiedades de los materiales si así lo deseara.

## **5.5 EJEMPLO DE DISEÑO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE UTILIZANDO EL MÉTODO DE DISEÑO AASHTO 1993.**

Los métodos de diseño empíricos pueden extenderse de extremadamente simple a absolutamente complejo. Los acercamientos más simples especifican los diseños estructurales del pavimento basados en trabajos hechos en el pasado. Acercamientos más complejos se basan generalmente en las ecuaciones empíricas derivadas de la experimentación. Algo de esta experimentación puede ser absolutamente elaborada. Por ejemplo, las ecuaciones empíricas usadas en la guía de 1993 AASHTO son en gran parte un resultado de las pruebas AASHO.

Para el diseño de pavimento flexible en esta sección, se hicieron uso de algunas de las entradas de datos necesarias del método AASHTO 2002 para utilizarlas con el software Darwin 3.01 del método de diseño AASHTO 1993.

A continuación se presenta la memoria del diseño de pavimento flexible calculado por el software de la Guía de Diseño AASHTO 1993.

Luego de la memoria de cálculo, se presenta un cuadro resumen donde se comparan los resultados de los espesores de capa de los dos métodos de diseño de pavimentos flexibles según AASHTO.

En las Figuras 5.48 y 5.49, se muestran los resultados del diseño de un pavimento flexible utilizando el software Darwin 3.01.

1993 AASHTO Pavement Design  
**DARWin Pavement Design and Analysis System**

**A Proprietary AASHTOWare  
 Computer Software Product**

ISCYC  
 Urb. Madreselva Av. El Espino y Blvd. Sur  
 Antiguo Cuscatlan, La Libertad  
 El Salvador

**Flexible Structural Design Module**

Ejemplo ilustrativo del diseño de un pavimento flexible nuevo de acuerdo al método de diseño AASHTO 1993, utilizando el programa DARWin 3.01

**Flexible Structural Design**

18-kip ESALs Over Initial Performance Period	124,649,069
Initial Serviceability	4.2
Terminal Serviceability	2.5
Reliability Level	90 %
Overall Standard Deviation	0.45
Roadbed Soil Resilient Modulus	28,000 psi
Stage Construction	1
Calculated Design Structural Number	4.59 in*

\*Note: This value is not represented by the inputs or an error occurred in calculation.

**Effective Roadbed Soil Resilient Modulus**

<u>Period</u>	<u>Description</u>	<u>Roadbed Resilient Modulus (psi)</u>
1	Invierno/Verano	28,000
Calculated Effective Modulus	28,000 psi	

**Rigorous ESAL Calculation**

Performance Period (years)	20
Two-Way Traffic (ADT)	12,053
Number of Lanes in Design Direction	2
Percent of All Trucks in Design Lane	80 %
Percent Trucks in Design Direction	50 %

<u>Vehicle Class</u>	<u>Percent of ADT</u>	<u>Annual % Growth</u>	<u>Average Initial Truck Factor (ESALs/Truck)</u>	<u>Annual % Growth in Truck Factor</u>	<u>Accumulated 18-kip ESALs over Performance Period</u>
4	2.9	4.5	1.572	0	2,518,431
5	56.9	4.5	2.2475	0	70,646,647
6	10.4	4.5	2.36	0	13,558,915

**Figura 5.48. Resultados del diseño de un pavimento flexible utilizando Darwin 3.01.**

Vehicle Class	Percent of ADT	Annual % Growth	Average Initial Truck Factor (ESALs/Truck)	Annual % Growth in Truck Factor	Accumulated 18-kip ESALs over Performance Period
7	3.7	4.5	2.4	0	4,905,605
8	9.2	4.5	1.54	0	7,826,870
9	15.3	4.5	2.7	0	22,821,006
10	0.6	4.5	2.6	0	861,795
11	0.3	4.5	2.81	0	465,701
12	0.4	4.5	2.7	0	596,628
13	0.3	4.5	2.7	0	447,471
Total	100	-	-	-	124,649,069

Growth Compound

Total Calculated Cumulative ESALs 124,649,069

### Specified Layer Design

Layer	Material Description	Struct Coef. (A <sub>1</sub> )	Drain Coef. (M <sub>i</sub> )	Thickness (D <sub>i</sub> ) (in)	Width (ft)	Calculated SN (in)
1	Concreto Asfáltico	0.42	1	5	12	2.10
2	Base de Suelo Cemento	0.2	1	7	12	1.40
3	Subbase Granular de Grava Triturada	0.14	1	8	12	1.12
Total	-	-	-	20.00	-	4.62

\*Note: This value is not represented by the inputs or an error occurred in calculation.

Figura 5.49. Resultados del diseño de un pavimento flexible utilizando Darwin 3.01

**Tabla 5.1 Tabla Comparativa de los métodos AASHTO 1993 y AASHTO 2002.**

<b>Capa</b>	<b>Material</b>	<b>AASHTO 1993</b>	<b>AASHTO 2002</b>
Rodadura	Asfalto	5 pulg.	3 pulg.
Base	Suelo Cemento	7 pulg.	6 pulg.
Subbase	Grava Triturada	8 pulg.	6 pulg.

Con esta comparación se puede afirmar que el método AASHTO 1993 es un método muy conservador y en cambio el método AASHTO 2002, es un método que optimiza todas las variables necesarias para el diseño de pavimentos flexibles.

# **CAPITULO 6**

## **DISEÑO DE PAVIMENTOS**

### **RÍGIDOS NUEVOS**

## **6.1 VISTA GENERAL DEL PROCESO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS NUEVOS.**

La vista general del proceso iterativo de diseño para JPCP es ilustrado en el Esquema 6.1.

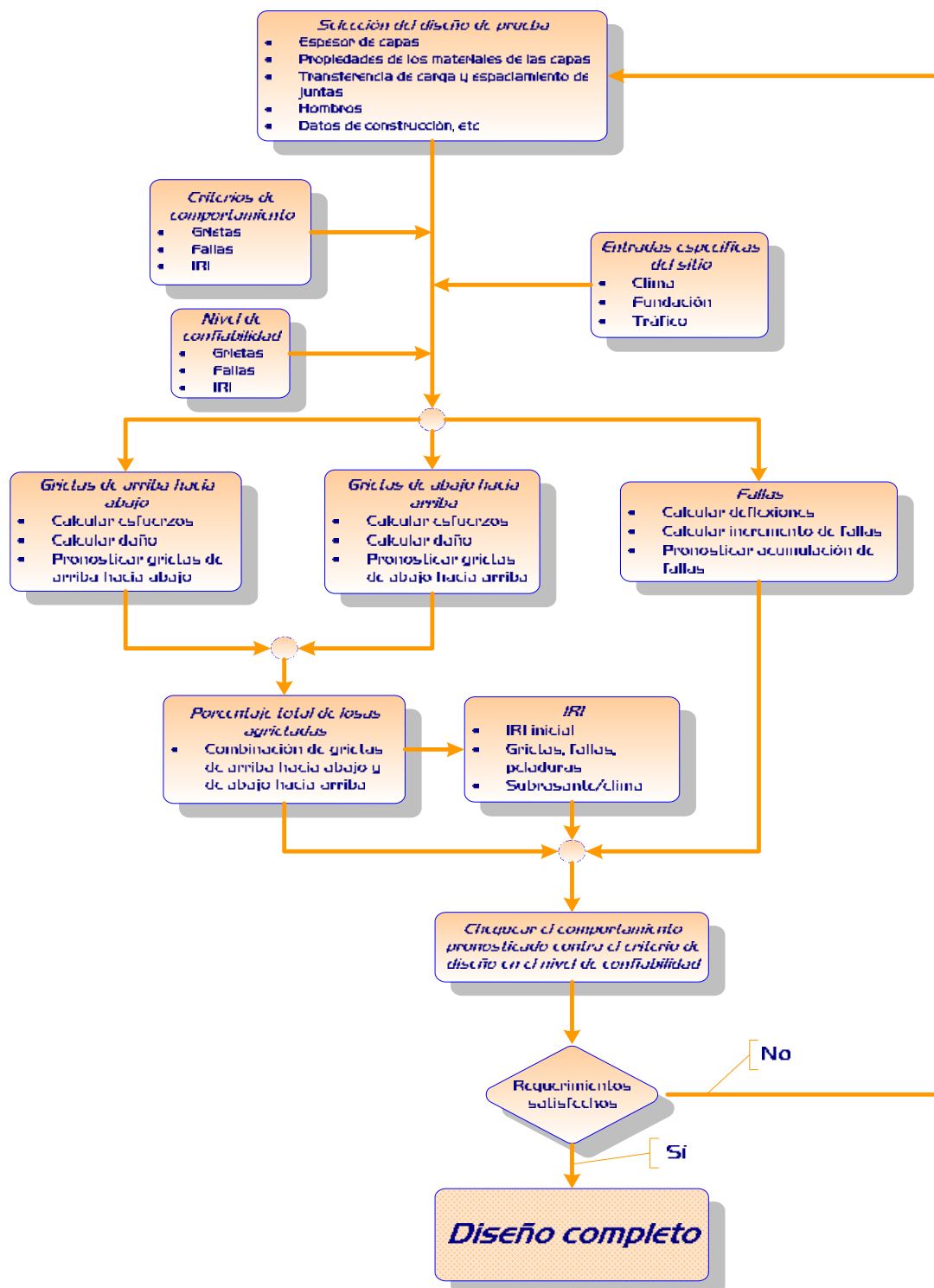
Los pasos principales incluyen lo siguiente:

1. Ensamblar un diseño de prueba para las condiciones específicas del sitio incluyendo tráfico, clima y fundación. Definir el orden de las capas, las propiedades de los materiales del concreto hidráulico y otros materiales para pavimentar, características de diseño y construcción.
2. Establecer los criterios para el comportamiento aceptable del pavimento al final del período de diseño (niveles aceptables de fallas y grietas en JPCP, IRI).
3. Seleccionar el nivel de confiabilidad deseado para cada indicador aplicable al comportamiento (seleccionar los niveles de confiabilidad de diseño para grietas, fallas e IRI en JPCP).
4. Utilizar el software de la guía de diseño para realizar lo siguiente:
  - a. El proceso de entrada de datos para obtener valores de tráfico mensual, material y otras entradas climáticas son necesarias en la evaluación del diseño para todo el período de diseño.
  - b. Calcular las respuestas estructurales (esfuerzos y deflexiones) usando modelos de solución rápida basados en elementos finitos para cada tipo de eje y carga en cada cálculo de incremento de daño a lo largo del período de diseño.

- c. Calcular el daño acumulado en cada mes en el todo el período de diseño.
  - d. Pronosticar los deterioros claves (fallas en las juntas, agrietamiento de losas, despostillamiento en CRCP) mes a mes durante el período de diseño usando el modelo de comportamiento calibrado mecanicista-empírico provisto en la Guía.
  - e. Pronosticar la rugosidad (IRI) como una función del IRI inicial, deterioros que ocurren a través del tiempo y factores del sitio al final de cada incremento de tiempo.
5. Evaluar el comportamiento esperado del diseño de prueba en el nivel de confiabilidad dada para su aceptabilidad.
  6. Modificar el diseño y repetir los pasos 4 y 5 mencionados arriba si son necesarios hasta que el diseño satisfaga los criterios establecidos.

Los diseños que satisfacen los criterios de comportamiento con una confiabilidad específica, son considerados factibles desde el punto de vista estructural (deterioros) y funcional (rugosidad), y pueden ser además considerados para otras evaluaciones tales como el Análisis de Costo del Ciclo de Vida (LCCA).





Esquema 6.1. Proceso global de diseño para JPCP.

## 6.2 ENTRADA DE DATOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS NUEVOS.

Los datos de entrada usados para el diseño de pavimentos rígidos nuevos se pueden clasificar de acuerdo a las siguientes categorías:

- Información general.
- Identificación del sitio/proyecto.
- Análisis de parámetros.
- Tráfico.
- Clima.
- Drenaje y propiedades de la superficie.
- Estructura de pavimento.
- Características de diseño.

Varias de estas entradas (por ejemplo, tráfico, clima) son idénticas a las usadas para el diseño de pavimentos flexibles. Sin embargo, hay variaciones en cómo estas mismas entradas son procesadas para usar en un JPCP.

### 6.2.1 INFORMACIÓN GENERAL.

Las siguientes entradas definen el tipo de diseño y el periodo de análisis:

- **Vida de diseño:** La vida esperada de diseño del pavimento (años).
- **Mes de construcción del pavimento:** Esta entrada define el tiempo  $t=0$  para el modelo de envejecimiento de los modelos de concreto hidráulico y el modelo de grieta por temperatura. Si esta entrada es completamente desconocida, el diseñador debe usar el mes en el cual la construcción de la mayor parte de los pavimentos ocurrirá en el área.

- **Mes de apertura al tráfico:** Es el mes esperado en el cual el pavimento será abierto al tráfico. Este valor define las condiciones climáticas en el tiempo de apertura al tráfico, los cuales afectan la temperatura y los gradientes de humedad así como también a los valores de los módulos de las capas incluyendo la subrasante. El análisis comienza con la entrada del mes (el primer día del mes es asumido). Esta entrada establece el tiempo  $t=0$  para los cálculos de los incrementos de daños y para el incremento de deterioros. Si esta entrada es completamente desconocida, el diseñador debe usar el mes en el cual la construcción de la mayoría de los pavimentos fueron completados en el sitio. Esta puede ser una entrada muy sensible porque determina el esfuerzo al cual el tráfico aplicará al pavimento. Nótese que el esfuerzo del concreto hidráulico incrementa en una relación relativamente alta durante los primeros meses después de haber sido colocado el pavimento.
- **Tipo de pavimento, JPCP:** Esta entrada determina la evaluación del método de diseño y los modelos de comportamiento aplicables.

## 6.2.2 IDENTIFICACIÓN DEL SITIO/PROYECTO.

Este grupo de entradas incluye lo siguiente:

- Localización del proyecto.
- Identificación del proyecto. La identificación del proyecto, la identificación de la sección, comienzo y fin de las estaciones en construcción y dirección del tráfico.

## **6.2.3 ANÁLISIS DE PARÁMETROS.**

### **6.2.3.1 IRI INICIAL.**

El IRI inicial se define como la rugosidad construida del pavimento. Este parámetro es altamente dependiente de las especificaciones de rugosidad del proyecto y tiene un impacto significativo en la calidad a largo plazo al recorrer sobre el pavimento. El rango de valores típicos va desde 50 a 100 pulg/milla de acuerdo a la Guía de Diseño.

### **6.2.3.2 CRITERIO DE COMPORTAMIENTO.**

El diseño de JPCP está basado en las grietas transversales, grietas transversales en juntas y la rugosidad del pavimento (IRI). El diseñador debe seleccionar alguno o todos estos indicadores de comportamiento y establecer criterios para evaluar un diseño y hacer modificaciones si es necesario. Los criterios de comportamiento deberían ser seleccionados en consideración con la confiabilidad del diseño. Por ejemplo, si se especifica un nivel de confiabilidad alta y el nivel de deterioro es bajo, resultará un diseño muy conservador.

#### *Grietas transversales en losas (JPCP).*

Las grietas en losas de JPCP pueden eventualmente llevar a la pérdida de rugosidad. Un inadecuado diseño para controlar las grietas transversales tiene como resultado fallas prematuras en un JPCP. Así, es deseable limitar las grietas transversales para asegurar que el pavimento se comportará como lo requerido a través de todo el período de diseño.

El criterio de comportamiento de grietas transversales define el porcentaje máximo permitido de losas agrietadas al final de la vida de diseño y al mismo tiempo determina el nivel que puede ocurrir a través del período de

diseño. El nivel permitido de grietas transversales depende de las tolerancias de las agencias de caminos para la cantidad de losas agrietadas en todo el período de diseño. El rango de valores típicos de grietas permitidas va desde 10 a 45 por ciento de pendiente de la clasificación funcional de la carretera y la confiabilidad del diseño.

#### Fallas en juntas transversales (JPCP).

Las fallas en las juntas transversales son un crítico factor que afecta la calidad de la carretera. Así, es deseable limitar las fallas para asegurarse de que un pavimento seguirá siendo liso durante el período de diseño. El criterio de comportamiento para fallas en juntas define la cantidad apropiada de estas al final del período de vida y también determina el nivel que tendrán a través del período de diseño. El nivel aceptable de fallas depende de la tolerancia de las agencias de caminos para rugosidad y políticas de mantenimiento. Los valores típicos permitidos para fallas en JPCP van desde 0.1 a 0.2 pulg. (de acuerdo a la Guía de Diseño) dependiendo de la funcionalidad de la carretera y el diseño de confiabilidad.

#### Rugosidad.

La adecuada funcionalidad es calificada en la mayoría de los casos por la rugosidad. Las calles rugosas no solamente causan incomodidad al usuario sino también incrementan el tiempo de viaje y eleva los costos de operación del vehículo. En una forma simple, rugosidad puede ser definido como la variación en la elevación de la superficie que induce vibraciones en el vehículo al circular sobre el pavimento. El IRI es la forma más común de medición de rugosidad en el control de pavimentos.

Como en el deterioro estructural, el criterio de comportamiento de la rugosidad define el IRI aceptable al final de la vida de diseño. Los valores del IRI terminal son escogidos por el diseñador y no deben ser excedidos del nivel de diseño de confiabilidad. Los valores típicos que son usados para el IRI

terminal se encuentran en el rango de 150 a 250 pulg/mi (de acuerdo a la Guía de Diseño), dependiendo de la funcionalidad de la carretera y del diseño de confiabilidad.

## **6.2.4 TRAFICO.**

Los datos de tráfico son uno de los elementos claves requeridos para el análisis y diseño de estructuras de pavimento. La guía de diseño considera las cargas de tráfico vehicular en términos de espectros de carga por eje. Son considerados espectros completos de carga por eje simple, tandem, tridem y cuádruple. Las salidas del software de la Guía de Diseño en un mes base acumula el número de vehículos pesados en el carril de diseño como un indicador de magnitud de cargas de tráfico vehicular (clase 4 en delante de la FHWA). Este parámetro puede ser considerado como un indicador general del nivel de tráfico vehicular.

Se presenta a continuación un resumen requerido de datos de tráfico para el diseño de JPCP con definiciones básicas de los variables y referencias de los valores por defecto.

### **6.2.4.1 INFORMACIÓN BÁSICA.**

- Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) para el año base, el total de número de vehículos pesados (clase 4 a 13) en la gama del tráfico.
- Porcentaje de vehículos en la dirección de diseño (factor de distribución direccional).
- Porcentaje de vehículos en el carril de diseño (factor de distribución de carril).
- Velocidad operacional del vehículo. Esta entrada es usada en el cálculo del módulo de las capas ligadas de asfalto.

#### **6.2.4.2 AJUSTE DE LOS VOLÚMENES DE TRÁFICO.**

##### **Factores de ajuste mensual.**

Los factores de distribución mensual de vehículos se utilizan para determinar la variación mensual en el tráfico de vehículos dentro del año base. Estos valores son simplemente la relación del tráfico mensual de vehículos al TPDA. Naturalmente, el promedio de las relaciones para los 12 meses del año base debe igualar 1.0. Si no hay información disponible, asumir la distribución uniforme (es decir, 1.0 por todos los meses para todas las clases del vehículo).

##### **Distribución de la clase vehicular.**

La distribución normalizada de la clase vehicular representa el porcentaje de cada clase de vehículo (clases 4 a 13) dentro del TPDA para el año base. La suma de los porcentajes de TPDA de todas las clases de vehículos debe igualar 100. Es importante observar que si el sitio específico (Nivel 1) ó datos regionales (Nivel 2) no están disponibles, la Clasificación del Tráfico de vehículos (TTC) se puede utilizar conjuntamente con la clase funcional de la carretera para estimar la distribución de la clase del vehículo.

Cada TTC representa una corriente de tráfico con características únicas de tráfico del vehículo, y una distribución de la clase vehicular por defecto fue establecida para cada TTC usando una base de datos del tráfico nacional para su uso en el nivel 3.

##### **Distribución horaria del tráfico de vehículos.**

Son los factores horarios representan el porcentaje del TPDA dentro de cada hora del día. Estos factores son importantes en la predicción de grietas, fallas en JPCP. Ayudan exactamente a explicar las corrientes de tráfico diurnas y nocturnas requeridas para la predicción del comportamiento.

### **Factores del crecimiento de tráfico.**

La función del crecimiento de tráfico permite el crecimiento o el decrecimiento a través del tiempo. Hay tres funciones disponibles para estimar los volúmenes de tráfico futuros de los vehículos:

- Ningún crecimiento.
- Crecimiento linear.
- Crecimiento compuesto.

Se pueden utilizar diversas funciones de crecimiento para diversas clases funcionales. De acuerdo con la función elegida, la fecha de apertura de la carretera al tráfico y la vida de diseño, el tráfico se proyecta en el futuro.

#### **6.2.4.3 FACTORES DE DISTRIBUCIÓN DE CARGA POR EJE.**

Los factores de distribución de carga por eje representan simplemente el porcentaje total de aplicaciones en cada intervalo de carga para un tipo y una clase específica de vehículo (de clase 4 a la 13). Estos datos necesitan ser proporcionados para cada mes y para cada clase de vehículo. Una definición de los intervalos de la carga para cada tipo de eje se proporciona a continuación:

- Ejes simples: 3000 lb. a 41000 lb. en intervalos de 1.000 lb.
- Ejes tándem: 6000 lb. a 82000 lb. en intervalos de 2.000 lb.
- Ejes tridem y cuádruples: 12000 lb. a 102000 lb. en intervalos de 3000 lb.

#### **6.2.4.4 ENTRADAS DE DATOS GENERALES DE TRÁFICO.**

La mayoría de las entradas bajo esta categoría definen la configuración de carga del eje y detalles de cargado para los cálculos de respuesta del pavimento. Las excepciones son "número de tipos de ejes por clase vehicular" y



de la "distancia entre ejes" del vehículo, que se utilizan en los cálculos del tráfico.

**Localización principal de la llanta.**

Es la distancia del borde externo de la llanta hacia la marca del pavimento. Esta entrada es muy importante en el cálculo de predicciones de daño por grietas causadas por la fatiga en un JPCP. La localización principal de la llanta es un factor muy importante que afecta a las grietas en un JPCP.

Dependiendo de esta localización, las grietas en las losas pueden variar por un factor de 4 ó más. Si el ancho típico (8.5 pies) de un vehículo fuera perfectamente centrado en un ancho de carril estándar (12 pies), el ancho entre ejes sería de 21 pulg. Las condiciones del sitio y las características de diseño del pavimento tales como los amarres de la estructura de pavimento rígido a los hombros ó losas anchas pueden afectar la distancia entre ejes. En el nivel 3 se puede utilizar 18 pulg. para esta entrada a menos que la información exacta sea disponible.

**Desviación estándar del tráfico alejado de la trayectoria normal de la llanta en el pavimento (alejado de las roderas).**

Esta entrada es usada para determinar el número de cargas aplicadas de ejes a través de un punto para predecir deterioros y comportamiento. Este parámetro afecta la predicción de todos los deterioros pero es un factor relativamente no sensible. Las condiciones del sitio y las características de diseño tales como los amarres de la estructura de pavimento rígido a los hombros ó losas anchas pueden afectar la desviación estándar de esta entrada.

**Ancho de carril de diseño.**

Esta es la distancia entre la marca de carril y cada uno de los lados de los carriles de diseño. Esta entrada puede ser igual ó no al ancho de la losa. El valor por defecto para el ancho de carril estándar es de 12 pies. Se debe

enfatar que este parámetro se refiere al ancho de carril de tráfico real y no al ancho de la losa, el cual tiene un efecto significativo en las fallas y grietas del comportamiento de JPCP.

### **Número de tipos de ejes para la clasificación vehicular.**

Esta entrada representa el número promedio de ejes para cada clase de vehículos (clase 4 a 13) para cada tipo de ejes (simple, tandem, tridem y cuádruple).

### **Configuración de eje.**

Son necesarios una serie de datos para describir los detalles de la llanta y carga por eje para usar en el modelo de respuesta del pavimento. Los valores típicos son provistos para cada uno de los siguientes elementos, sin embargo, los valores del sitio específico pueden ser usados si están disponibles:

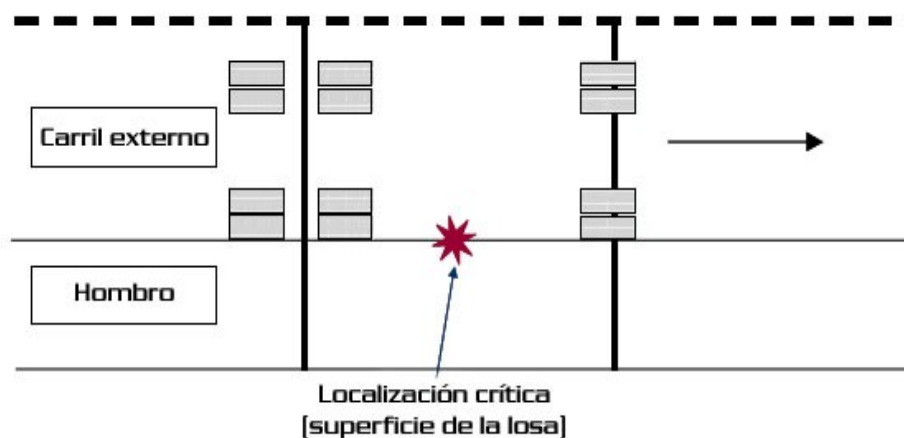
- Ancho de eje promedio: Es la distancia entre dos bordes de afuera de un eje. Para vehículos típicos puede ser asumido el valor de 8.5 pies para ancho de ejes.
- Espaciamiento de llanta doble: Es la distancia entre los centros de las llantas dobles. Los espaciamientos típicos de las llantas duales es de 12 pulg.
- Presión de las llantas: Es la presión de inflado ó la presión de contacto de una llanta simple o doble. Para vehículos pesados, la presión típica de inflado es de 120 psi.
- Espaciamiento de ejes: Es la distancia entre los dos ejes consecutivos de un tandem, tridem ó cuádruple. El espaciamiento del eje promedio es de 51.6 pulg para tandem y de 49.2 pulg. en los ejes tridem.

### **Distancia entre ejes.**

Esta información es usada para determinar el número de aplicaciones de carga para grietas arriba-abajo en JPCP. Para estas grietas, la carga crítica

es causada por la combinación de ejes al colocar una carga cerca de ambos extremos de la losa al mismo tiempo (ver Figura 6.1). En general, el conducir y manejar vehículos con remolque u otros vehículos son las fuentes más comunes de estas combinaciones de carga, pero los remolques múltiples también pueden causar este tipo de cargado. Las entradas en esta categoría incluyen lo siguiente:

- Espaciamiento promedio de ejes (pies): Corto, medio ó largos. Los valores recomendados son 12, 15 y 18 pies para espaciamiento de ejes cortos, medianos y largos respectivamente.
- Porcentaje de vehículos: Es el porcentaje de vehículos con espaciamiento de ejes cortos, medianos y largos. Utilizar la distribución uniforme, a menos que una información más exacta esté disponible.



**Figura 6.1. Localización de la carga crítica y respuesta estructural para grieta transversal de arriba hacia abajo en JPCP.**

El porcentaje de vehículos es la distribución de espaciamiento de ejes de vehículos con remolque (clase 8 en adelante). Si otros vehículos en el flujo de tráfico también tienen el espaciamiento de eje en el rango de corto, mediano ó largo, la frecuencia de estos vehículos debe ser añadida a la distribución de espaciamiento de vehículos con remolque. La sumatoria del porcentaje de ejes cortos, medianos y largos puede ser mayor de 100.

#### **6.2.4.5 PROCESO DE ENTRADAS DE DATOS.**

Las entradas de tráfico son procesados para producir las siguientes entradas procesadas para cada mes a través de todo el período de diseño:

- Número de ejes simples bajo cada categoría de carga.
- Número de ejes tandem bajo cada categoría de carga.
- Número de ejes tridem bajo cada categoría de carga.
- Número de ejes cuádruple bajo cada categoría de carga.
- Número de camiones con remolques (clase 8 en adelante) bajo cada categoría de carga. (para las grietas de arriba y abajo del pavimento).

La combinación de cargas para grietas arriba-abajo es asumida para constar de un eje manejable y un eje tandem. El eje manejable es asumido para obtener una carga establecida de 12000 lb mientras que el eje en tandem es asumido para tener la misma distribución de carga como otros ejes tandem.

Los factores de distribución de tráfico horario son aplicados para el proceso de entradas de tráfico (los conteos de tráfico por tipo de eje para cada mes del período de diseño) para la obtención del tráfico horario en el tiempo del cálculo de daño para cada deterioro.

#### **6.2.5 CLIMA.**

Las condiciones ambientales tienen un efecto significativo en el comportamiento de los pavimentos rígidos. La interacción de los factores climáticos con los materiales de pavimento y las cargas que éste soporta es bastante complejo. Los factores tales como precipitación, temperatura, ciclos de hielo-deshielo (no aplicables en nuestro país) y la profundidad del nivel freático afectan al pavimento, a la temperatura de la subrasante y al contenido

de humedad el cual, en forma alterna, afecta directamente la capacidad de soportar cargas a las capas de pavimento y al comportamiento del mismo.

#### **6.2.5.1 ENTRADA DE DATOS PARA EL CLIMA.**

La siguiente información relacionada al tiempo es requerida para el diseño de pavimentos flexibles:

- Temperatura del aire horaria en todo el período de diseño.
- La precipitación horaria en todo el período de diseño.
- La velocidad del viento horaria en todo el período de diseño.
- El porcentaje de la luz del sol horaria para todo el período de diseño.
- Valores de la humedad relativa horario del ambiente.
- Profundidades del nivel freático constantes o estacionales en el sitio del proyecto.

Nótese que al menos son requeridos datos estacionales del tiempo de alrededor de 24 meses para que el software de la Guía de Diseño tenga una solución razonable y lógica.

#### **6.2.5.2 PROCESOS DE ENTRADA DE DATOS.**

Las entradas del clima son combinadas con las propiedades de los materiales del pavimento, espesores de capa y entradas relacionadas al drenaje por la EICM (Mejoramiento del Modelo Climático Integrado) para producir la siguiente información y poder utilizarla en el análisis del diseño:

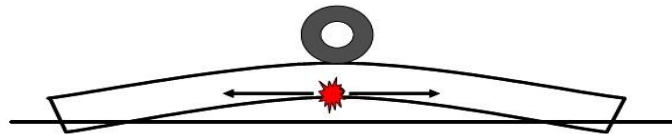
- Perfiles de distribución de temperatura horaria a través de las losas de concreto rígido. El EICM produce 11 temperaturas uniformemente en puntos espaciados a través del espesor de la losa para análisis de JPCP.

- Perfiles de humedad y temperatura horaria a través de otras capas de pavimento.
- Número de días mojados anual.
- Valores mensuales de humedad relativa.

### 6.2.5.3 EFECTOS CLIMÁTICOS EN EL COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO RÍGIDO.

#### **Diferencia de temperatura de la radiación solar.**

Las diferencias de temperatura desde la superficie hasta el fondo de losas de JPCP tienen un efecto significativo sobre los esfuerzos críticos arriba y debajo de la losa. En un día soleado y caliente, la superficie de la losa de concreto rígido está más caliente que en el fondo (una diferencia de temperatura positiva a través de la losa). Como resultado da una elongación de la superficie de la losa con respecto al fondo y una curvatura convexa (resulta un alto esfuerzo de compresión en el fondo de la losa), mostrado en la Figura 6.2. Esto es equivalente a tener un vacío debajo del centro de la losa.

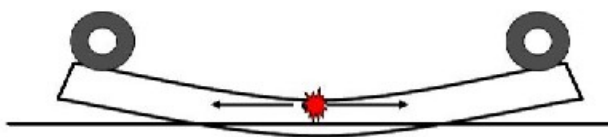


**Figura 6.2. Curvatura de una losa de concreto hidráulico debido a la diferencia de temperatura positiva en el día más las cargas de tráfico**

Debido al mismo peso de la losa, ésta se resiste a curvarse, los vacíos reales no pueden desarrollarse excepto bajo condiciones de temperatura extrema. Sin embargo, algunas fuerzas (incluyendo su propio peso) que restringen el libre movimiento de la losa causan esfuerzos y en este caso las restricciones de curvatura resultan en incrementos de esfuerzos de tensión en el fondo de la losa. Bajo las cargas de tráfico, cualquier pérdida de soporte debido a diferencias de temperatura promueve incrementos de esfuerzos de tensión crítica en el fondo de la losa.

Durante la noche, la superficie de la losa es más fría que en el fondo (una diferencia de temperatura a través de la losa). Esto resulta en una curvatura cóncava de la losa (resulta un alto esfuerzo de compresión en la superficie de la losa), como es mostrado en la Figura 6.3. Esto es equivalente a tener vacíos debajo de los costados de la losa los cuales cuando se combinan con las cargas de tráfico, incrementan el esfuerzo de tensión en la superficie y puede conducir a grietas por fatiga iniciándose de arriba para abajo.

Debido a la sensibilidad extrema de los esfuerzos críticos en pavimentos rígidos a gradientes de temperatura, es necesario considerar variaciones en las condiciones de temperatura horaria. Esto lo realiza automáticamente el software de la Guía de Diseño usando la EICM. Basado en los datos históricos climáticos horarios, la estructura de pavimento y de las propiedades de los materiales, la EICM produce un archivo que incluye un perfil de temperatura histórica horaria en la losa de concreto rígido para cada año del periodo de diseño (8760 perfiles por año de diseño [365 días×24 horas]).



**Figura 6.3. Curvatura de una losa de concreto hidráulico debido a la diferencia de temperatura negativa en la noche más las cargas de tráfico**

#### **Alabeo por la humedad.**

El concreto endurecido se expande con un aumento en humedad y se contrae con la pérdida de humedad. La superficie de los pavimentos de concreto rígido puede drenar, excepto abajo aproximadamente aun nivel de 2 pulg., el nivel de la humedad queda en un alto nivel relativamente constante (85 por ciento de humedad relativa ó mayor), aún en áreas muy secas. Esto da lugar hacia el alabeo de la losa hacia arriba losa según lo mostrado en la Figura 6.3. La cantidad de contracción por la pérdida de humedad que toma lugar en

la parte superior de la losa depende de muchos factores, incluyendo el tipo de curado y de los componentes de la mezcla de concreto hidráulico.

Una parte de la contracción por falta de humedad en el concreto hidráulico es irreversible, pero hay una porción reversible que varía con la humedad relativa del ambiente. La contracción irreversible causa alabeo por humedad permanente, mientras que la contracción reversible causa la variación estacional en el alabeo por humedad (alabeo por humedad estacional).

#### **Curvatura y alabeo permanente.**

A menudo se tiende a colar concreto hidráulico durante las mañanas de días soleados calientes, esa es una de las condiciones por las que las losas de concreto rígido nuevas tienden a exponer una alta diferencia de temperatura positiva de la intensa radiación solar más el calor de hidratación. Las losas de concreto hidráulico son uniformes cuando endurecen, pero dependiendo de las condiciones de exposición, una cantidad significativa de gradiente positivo de temperatura (la porción superior de la losa es mucho más caliente que el fondo) puede estar presente a la hora de fraguarse. Esta temperatura se le ha llamado "gradiente de temperatura de tensión cero". Siempre que el gradiente de temperatura en las losas caiga debajo de la cantidad confinada dentro de la losa a la hora de la construcción (gradiente de tensión cero), las losas tratarán de curvarse hacia arriba causando esfuerzos de tensión en la superficie de la losa el cual puede llevar a agrietarse de la superficie hacia abajo en JPCP. Así, un efectivo gradiente negativo de temperatura es permanentemente construido en las losas. La curvatura ascendente de las losas de pavimento es restringido por varios factores, incluyendo el peso de la misma losa, dovelas y el peso de cualquier base granular ligada en la losa. Se ha apoyado esta hipótesis usando datos de las losas equipadas del campo situadas en diversas condiciones climáticas.



Si se pavimenta en la tarde o en la noche de modo que la temperatura más alta del calor de hidratación no coincida con la radiación solar más intensa, la cantidad de gradiente de temperatura permanente en la losa será mucho más baja y podría potencialmente incluso ser negativa. También, los diferentes tipos de curados pueden producir una baja tensión cero en el gradiente de temperatura permanente.

***Consideraciones de los efectos climáticos en el diseño de pavimentos rígidos.***

Los efectos de temperatura y humedad son directamente considerados en el diseño de JPCP, así:

- Las curvaturas incorporadas permanentes ocurren durante la construcción (gradiente de temperatura esfuerzo cero) se combina con el alabeo permanente debido al diferencial de contracción permanente y se expresa en términos de la temperatura efectiva entre la superficie y el fondo (llamados "curvatura/alabeo permanente"). Este parámetro es una entrada directa e influyente en el diseño de JPCP y fue establecido a través de calibraciones de construcciones típicas y condiciones de mezcla.
- Las diferencias de temperaturas transitorias no lineales negativas y positivas horarias (desde la superficie hasta el fondo de la losa) causadas por la radiación solar son calculadas usando la EICM.
- La contracción transitoria negativa de la humedad en la superficie de la losa causada por los cambios en la humedad relativa durante cada mes del año se convierte en una diferencia de temperatura equivalente para cada mes.

Los tres de las diferencias de temperatura y humedad mencionadas anteriormente a través de losas de concreto hidráulico son pronosticadas y combinadas apropiadamente junto con cargas de ejes para calcular las

tensiones críticas de la losa los cuales son utilizados en un incremento mensual para acumular daño.

## **6.2.6 PROPIEDADES DE DRENAJE Y DE LA SUPERFICIE.**

La información requerida para esta categoría incluye lo siguiente:

- La absorbencia de onda corta en la capa superficial de pavimento rígido.
- Potencial de infiltración.
- Pendiente transversal en el pavimento.
- Longitud de la trayectoria del drenaje.

El primer ítem en la lista de arriba es una propiedad de los materiales esencialmente para concreto rígido que interactúa con las entradas del clima para definir un régimen de temperaturas en las capas del pavimento. Las tres entradas restantes son relacionadas a la infiltración y al drenaje.

### **6.2.6.1 LA ABSORBENCIA DE ONDA CORTA DEL PAVIMENTO RÍGIDO.**

La absorbencia de onda corta de la superficie del pavimento depende de la composición, color y textura del pavimento. La absorbencia es la relación de la cantidad de energía solar absorbida por la superficie del pavimento del total de energía que fue expuesta en la superficie, el cual afecta naturalmente la temperatura en la estructura del pavimento y a la respuesta estructural asociada. Los rangos de valores para entrada van de 0 a 1.

Generalmente la superficie más iluminada y reflexiva será la de más baja absorbencia. Los valores típicos para la superficie de concreto hidráulico

van desde 0.7 a 0.9. El valor recomendado por defecto es de 0.85 el cual es usado en la calibración de modelos de comportamientos de pavimentos rígidos.

#### **6.2.6.2 INFILTRACIÓN.**

Esta entrada cuantifica la cantidad de agua infiltrada en la estructura de pavimento. Hay tres opciones disponibles para cuantificar esta entrada: Menor, moderada y extrema. La cantidad de infiltración de un evento de tormenta dada es una función de la cantidad de precipitación, condiciones del pavimento y tipos de hombros. Sin embargo, por simplicidad, la guía general para seleccionar estas entradas, está basada en el tipo de hombros, ya que la junta del carril del hombro es la entrada de la fuente singular más larga de humedad en la estructura de pavimentos:

- Menor: Este valor es valido cuando los hombros amarrados de concreto son usados ó cuando un agente agresivo es buscado para mantener la junta del carril del hombro sellado. Este valor puede ser usado también cuando los drenes laterales son presentados bajo los hombros.
- Moderado: Este valor es válido para todos los otros tipos de hombros.
- Extremo: Generalmente este valor no es usado para el diseño de pavimentos nuevos o reconstruidos.

#### **6.2.6.3 LONGITUD DE LA TRAYECTORIA DEL DRENAJE.**

Esta es la distancia horizontal entre el punto más alto en la sección transversal del pavimento al punto donde ocurre el drenaje. Para un sistema de pavimentos coronados con drenajes laterales longitudinales, ésta sería la

distancia desde lo alto de la sección transversal coronada al centro de la tubería de drenaje lateral.

#### **6.2.6.4 PENDIENTE TRANSVERSAL DEL PAVIMENTO.**

La pendiente transversal es la pendiente de la superficie del pavimento perpendicular a la dirección del tráfico. Esta entrada es usada en el cálculo del tiempo requerido para drenar la base del pavimento ó la capa de subbase desde una condición inicialmente mojada.

#### **6.2.7 ESTRUCTURA DE PAVIMENTO.**

El proceso de diseño de pavimentos rígidos permite una amplia variedad de propiedades de los materiales y de espesores de capas para pavimentos de concreto rígidos, base y subbase mostrado en la Figura 6.4. Una estructura de pavimento rígido puede consistir de una losa de concreto hidráulico, una base tratada con asfalto, una subbase de agregados, una subrasante compactada, una subrasante de suelo natural y un lecho de rocas. El software de la Guía de Diseño puede ser usado para analizar un máximo de 20 capas, sin embargo, debido al proceso automático de subcapas se recomienda una entrada de 10 capas reales para determinadas capas, incluyendo la estructura de pavimento y la subrasante (ó lecho de rocas). Las siguientes reglas ó restricciones son necesarias para satisfacer el diseño de una estructura de pavimento rígido:

- La capa de la superficie en el diseño de pavimentos rígidos siempre es una capa de concreto hidráulico.
- La losa escalonada (dos capas) es la estructura mínima que puede ser analizada.
- Solamente una capa granular no ligada puede ser colocada entre dos capas estabilizadas.
- Las últimas dos capas en la estructura de pavimento deben ser capas no ligadas. Para satisfacer esta restricción, el software de la

Guía de Diseño automáticamente forma las subcapas de la subrasante en dos capas idénticas para pavimentos de losas escalonadas y para pavimentos donde una capa ligada descansa directamente sobre la subrasante.

Para definir un diseño de prueba, se deben definir todas las capas del pavimento y las propiedades de materiales para cada capa incluyendo la subrasante. Dependiendo del diseño de prueba seleccionado, las subcapas pueden ser necesarias para satisfacer los requerimientos de capas del proceso de análisis. El software desarrolla las subcapas internamente basado en el tipo de material, espesor de capa y de la localización de la capa dentro de la estructura de pavimento.

#### **6.2.7.1 CAPA DE CONCRETO HIDRÁULICO.**

La capa de concreto hidráulico no es dividida en subcapas para propósitos de análisis y diseño. Las propiedades requeridas para la capa de concreto hidráulico está dividida en tres categorías:

- Propiedades generales y térmicas.
- Propiedades de mezcla del concreto hidráulico.
- Propiedades de fuerza y rigidez.

##### **Propiedades generales y térmicas.**

- Espesor de capa. El rango del diseño de espesor para el diseño de pavimentos nuevos es aproximadamente entre 6 a 17 pulg.
- La relación de Poisson ( $\mu$ ). Los valores típicos para concreto hidráulico están en el rango de 0.15 a 0.25.
- El coeficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ). El coeficiente de expansión térmica para concreto hidráulico se encuentra en el rango de 4 a  $7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ , dependiendo del tipo de agregado y de la cantidad de cemento en la mezcla.

- Conductividad térmica. Es la cantidad de calor que fluye normalmente a través de la superficie en unidades de área por unidad de tiempo del gradiente de temperatura normal a la superficie. El valor recomendado es de 1.25 BTU/(h·pies·°F) el cual es usado en la calibración.
- Capacidad de calor. Es el calor requerido para elevar la temperatura de una unidad de masa de un material por una unidad de temperatura. El valor recomendado es de 0.28 BTU/(lb·°F) el cual es usado en la calibración.

### **Propiedades relacionadas a la mezcla del concreto hidráulico.**

El proceso de diseño requiere la siguiente entrada relacionada a la mezcla del concreto hidráulico para modelar el comportamiento del material, incluyendo la contracción, la temperatura del esfuerzo cero del concreto hidráulico y el deterioro de la transferencia de carga.

- Tipo de cemento (tipo I, II ó III).
- Contenido de agua.
- Relación agua/cemento.
- Tipo de agregado.
- Temperatura del esfuerzo cero del concreto hidráulico,  $T_z$ , definido como la temperatura (después y durante el proceso de colado y curado) el cual la capa de concreto presenta esfuerzo termal cero. Si la temperatura es menor que  $T_z$  entonces ocurrirá un esfuerzo de tensión en la losa. El valor de  $T_z$  no es realmente una temperatura simple sino varias a través de la profundidad de la losa (gradiente térmico de esfuerzo cero). Sin embargo, cuando se refiere a  $T_z$  para propósitos de aberturas de juntas y grietas, será llamado simplemente temperatura de esfuerzo cero y podría ser considerado como aproximadamente la temperatura media de la losa.  $T_z$  puede ser una entrada directa o puede ser estimada de temperatura ambiente mensual y el contenido de cemento

usando la ecuación mostrada abajo, el cual esta basada en el día de construcción con la mezcla de curado:

$$T_z = \left( CC \times 0.59328 \times H \times 0.5 \times 1000 \times \frac{1.8}{1.1 \times 2400} + MMT \right) \quad (5.3)$$

Donde:

$T_z$ : Es la temperatura al cual la capa de concreto hidráulico presenta esfuerzo termal cero (el rango permitido es de 60 a 120 °F).

$CC$ : Contenido de cemento, lb/yd<sup>3</sup>.

$H$ :  $-0.0787 + 0.007 * MMT - 0.00003 * MMT^2$ .

$MMT$ : Es la temperatura mensual promedio para el mes de construcción, °F.

La Tabla 6.1 muestra una ilustración de las temperaturas esfuerzo cero para diferentes temperaturas mensuales promedio y de diferentes contenidos de cemento en el diseño de mezcla de concreto hidráulico. Nótese que la ecuación de  $T_z$  tiene muchas limitantes. No considera el efecto de muchos factores como calor de hidratación incluido en minerales adicionales (escoria, ceniza volcánica), composición del cemento y finura, químicos adicionales y otros.

**Tabla 6.1. Temperatura del esfuerzo cero basado en el contenido de cemento en concretos hidráulicos y la temperatura ambiente promedio mensual durante la construcción (ecuación 3.4.1)**

Temperatura promedio mensual (°F)	H	Contenido de cemento lb/yr <sup>3</sup>			
		400	500	600	700
40	0.1533	52	56	59	62
50	0.1963	66	70	74	78
60	0.2333	79	84	88	93
70	0.2643	91	97	102	107
80	0.2893	103	109	115	121
90	0.3083	115	121	127	134
100	0.3213	126	132	139	145

- Contracción última al 40 por ciento de la humedad relativa.
- Contracción reversible. El porcentaje de contracción última seca es reversible a través del remojo. Usar 0.5 a menos que exista más información disponible.

### **Propiedades de resistencia y rigidez.**

El concreto hidráulico gana resistencia a largo plazo y los cambios correspondientes en la rigidez, son considerados en esta Guía de Diseño. Las entradas de la resistencia y la rigidez del concreto hidráulico consisten de lo siguiente:

- Módulo de ruptura (fuerza de flexión),  $MR$ .
- Módulo estático de elasticidad,  $E_{PCC}$ .
- Resistencia a la compresión,  $f'_c$ .
- Resistencia de tensión a la fractura (medida indirectamente por la prueba de resistencia a la tensión),  $f_t$ .

Dependiendo del nivel de entrada, se requiere una diversa cantidad de información, así:

- Nivel 1: Valores determinados de laboratorio para  $MR$ ,  $f'_c$ ,  $f_t$  a 7, 14, 28 y 90 días utilizando apropiados procesos de pruebas. Es también requerida la relación de la resistencia de 20 años a 28 días. Una mejor línea de regresión es ajustada a través de estos puntos de referencia para interpolar o extrapolar el esfuerzo y la rigidez para varias edades durante el cálculo del incremento de daños.
- Nivel 2: Valores determinados en laboratorio de la resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) a 7, 14, 28 y 90 días y de la relación de los 20 años a 28 días. La resistencia en cada incremento de daño es determinado usando una mejor línea de regresión ajustada a través de estos puntos y los parámetros restantes ( $MR$ ,  $f_t$  y  $E_C$ ) son



estimados usando una buena correlación establecida entre resistencia a resistencia y resistencia a rigidez.

- Nivel 3: Estimar de datos históricos o de otra información el esfuerzo de compresión ó el módulo de ruptura a los 28 días. La resistencia del concreto hidráulico a través del tiempo es estimado usando el modelo de resistencia por defecto. El módulo elástico del concreto hidráulico puede ser introducido en el nivel 3 si es deseado.

Las entradas procesadas para la resistencia del concreto hidráulico y las propiedades del módulo son la resistencia mensual y los valores de módulos para todo el período de diseño.

#### **6.2.7.2 CAPA DE BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO.**

El proceso de no tener subcapas es hecho en la capa de la base estabilizada con asfalto para el diseño de rígidos y los propósitos de análisis en el software de la Guía de Diseño. Las entradas de los materiales requeridos para esta capa son agrupados bajo dos categorías: Entradas generales de los materiales y entradas requeridas para construir la curva maestra  $E^*$ .

##### **Entradas generales de las propiedades de las capas.**

- Espesor de capa.
- Relación de Poisson.
- Conductividad térmica. El valor típico para material de base estabilizado con asfalto es de 0.67 BTU/h-pie-°F.
- Capacidad de calor. Un valor típico para base estabilizada con asfalto es de 0.23 BTU/lb-°F.
- Peso específico. El rango típico para HMA graduada densa es de 134 a 148 lb/pie<sup>3</sup>.

### **Entradas requeridas para la construcción de la curva maestra $E^*$ .**

El modulo dinámico  $E^*$  es la propiedad de los materiales de interés para las capas estabilizadas con asfalto. Para la entrada del nivel 1,  $E^*$ , es determinado en laboratorio usando protocolos de pruebas estándar para varias frecuencias e índices de cargas. Una curva maestra de  $E^*$  versus el tiempo reducido es derivado entonces de este dato para definir el comportamiento de esta capa bajo condiciones de carga y varias condiciones climáticas. Para las entradas del nivel 2 y 3, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\log(E^*) = d + \frac{a}{1 + e^{b+g(\log t_r)}} \quad (5.4)$$

Donde:

$E^*$ : Módulo dinámico.

$t_r$ : Tiempo de cargado a la temperatura de referencia.

$\delta$ ,  $a$ : Parámetros de ajuste. Para datos dados,  $\delta$  representa el valor mínimo de  $E^*$  y  $\delta+a$  representa el valor máximo de  $E^*$ .

$\beta$ ,  $\gamma$ : Parámetros que describen la forma de la función sigmoidea.

La ecuación anterior es usada para construir la curva maestra de la información siguiente:

- Propiedades de la mezcla asfáltica:
  - Porcentaje retenido en la malla de 3/4. El valor típico es de 5% a 16% para agregado graduado denso y 30% para permeable.
  - Porcentaje retenido en la malla de 3/8. El valor típico es de 27% a 49% para agregado graduado denso y 70% para permeable.
  - Porcentaje retenido en la malla de 3/8. El valor típico es de 27% a 49% para agregado graduado denso y 70% para permeable.

- Porcentaje retenido en la malla de #4. El valor típico es de 38% a 61% para agregado graduado denso y 95% para permeable.
- Porcentaje retenido en la malla de #200. El valor típico es de 3% a 8% para agregado graduado denso y 1% para permeable.
- Carpeta de asfalto.
  - Para la entrada de nivel 1: La entrada es generalmente no necesaria para el diseño de pavimentos rígidos.
  - Para la entrada de nivel 2: Especificar el grado de comportamiento ó grado de viscosidad de la carpeta asfáltica.
  - Para la entrada de nivel 3: Especificar el grado de comportamiento, grado de viscosidad ó grado de penetración (PG) de la carpeta asfáltica.
- Asfalto en general.
  - Contenido volumétrico efectivo de carpeta asfáltica (porcentaje).
  - Porcentaje de vacíos.
  - Temperatura de referencia para el desarrollo de la curva maestra (valor típico de 70°F).

### **6.2.7.3 CAPAS ESTABILIZADAS QUÍMICAMENTE.**

No se hacen subcapas para capas estabilizadas con cemento. Las siguientes entradas son requeridas para definir una capa estabilizada químicamente:

- Módulo elástico promedio de la capa. Este valor es asumido para permanecer constante a través del período de diseño. Los valores típicos para esta entrada dependen del tipo de material y el contenido del estabilizador. Los valores promedio calculados del

LTPP para dos tipos principales de bases estabilizadas químicamente son las siguientes:

- Agregados estabilizados con cemento. El módulo promedio es 900000 psi. El rango de valores es desde 494000 a 2195000 psi.
- Concreto de resistencia pobre. El módulo promedio es 2099000 psi. El rango de valores es desde 275000 a 3046000 psi.
- Peso específico del material.
- Relación de Poisson.
- Conductividad térmica. El valor típico para base estabilizada químicamente es de 1.0 BTU/h-pie-°F.
- Capacidad calorífica. El valor típico para base estabilizada químicamente es de 0.28 BTU/lb-°F.

#### **6.2.7.4 BASE NO LIGADA/SUBBASE/SUBRASANTE.**

Las principales entradas requeridas para base/subbase no ligadas y capas de subrasante son:

- Espesor de capa (solamente para capa de base y subbase). Si para capas de subrasante de limo estabilizado ó compactado necesitan ser considerados separadamente de la subrasante natural, pueden ser definidos como una capa estructural.
- Capa de módulo de resiliencia.
- Relación de Poisson.
- Coeficiente de presión lateral de la tierra,  $K_0$ . Un valor típico para esta entrada es de 0.5 para material sin compactar ó natural.

El módulo de capa para las capas no ligadas y la subrasante pueden ser estimadas a los dos niveles de entrada de datos (nivel 2 y 3). Para el análisis de pavimentos rígidos, las entradas en el nivel 1 no están disponibles. El nivel 2

requiere pruebas de ejemplares de suelo usando algunas pruebas tales como CBR y el valor de R y luego estimar el módulo de resiliencia de la capa usando una ecuación de predicción. El nivel 3 requiere una estimación utilizando una correlación de la clasificación del suelo como AASHTO ó USCS (Sistema de Clasificación Unificada del Suelo). Observar que siempre que exista una subrasante granular, el módulo resiliente recomendado es bastante alto y si esta capa de la subrasante no es verdaderamente infinita en profundidad, dará lugar a una sobrestimación del soporte de la subrasante y un alto valor calculado de  $k$ . Si la capa granular más rígida es relativamente fina (menos de 5 a 10 pies) entonces se garantiza una reducción en el módulo resiliente seleccionado de la subrasante.

#### **Análisis estacional.**

Las siguientes opciones son disponibles para el nivel 2:

4. Entrar un diseño representativo del módulo resiliente ( $M_r$  con un contenido óptimo de humedad) u otro parámetro disponible de fuerza/rigidez del suelo (CBR, el valor de R, coeficiente de capa estructural de AASHTO ó índice plástico y granulometría) y usar el módulo de EICM encajado en el software de la Guía de Diseño para estimar variaciones estacionales basado en cambios de perfiles de humedad y temperatura a través de la estructura de pavimento. Las entradas adicionales para la EICM incluye el índice plástico, porcentaje que pasan la malla No. 4 y No. 200 y el tamaño de grano efectivo correspondiente al 60 porciento que pasa en peso ( $D_{60}$ ) para la capa bajo consideración. Usando estas entradas, la EICM estima el peso específico, la gravedad específica de los sólidos, conductividad hidráulica saturada de la capa de pavimento, gravimetría con contenido óptimo de humedad, grado de saturación de la capa y los parámetros característicos de la curva suelo-agua. Estas entradas pueden ser sustituidas por valores calculados directamente.

5. En lugar de usar la EICM, el módulo estacional, CBR, el valor de R u otros valores pueden ser introducidos directamente. Para la introducción directa, es requerido estimar valores de laboratorio de 12 meses para  $M_r$  (u otras pruebas disponibles de suelos).
6. La variación estacional puede ser ignorado en la rigidez de materiales no ligados. En este caso, es requerido representar el valor del módulo de diseño (u otro valor de pruebas).

Para el nivel 3, la entrada requerida es el módulo de resiliencia de la capa con óptimo contenido de agua y la EICM hará los ajustes estacionales. Si el análisis estacional no es deseado, un sólo módulo de resiliencia es introducido por el diseñador para mantener constante a través de un año entero (no es introducido el contenido de humedad).

#### **Subcapas de capas no ligadas y subrasante.**

La estructura original de pavimento definida por el usuario tiene generalmente cuatro a seis capas. Sin embargo, el software de la Guía de Diseño puede internamente subdividir la estructura de pavimento en 12 a 15 subcapas para modelar las variaciones de temperatura y humedad. Solamente las capas de la base no ligada con espesor mayor a 6 pulg. y la capa no ligada de la subbase mayor a 8 pulg. son divididas en subcapas. Para la capa de la base (primera capa no ligada), la primera subcapa es siempre 2 pulg. El espesor restante de la capa de la base y cualquier capa de la subbase se dividen en subcapas con un espesor mínimo de 4 pulg. Para las subrasantes compactadas y naturales, el espesor mínimo de la subcapa es de 12 pulg. Una estructura de pavimento es dividida en subcapas solamente a una profundidad de 8 pies desde la superficie. Cualquier subrasante restante es tratada como una capa infinita. Si se presenta un lecho de roca, la subrasante restante es tratada como una capa más allá de los 8 pies. El lecho rocoso no es dividido en subcapas y siempre es tratado como capa infinita.

El máximo número de capas que pueden ser analizadas por el módulo de análisis es de 20. Esto se refiere al número total de subcapas dentro de la estructura de pavimento, incluyendo cualquier subcapa hecha internamente por el programa. Nótese que el software de la Guía de Diseño requiere que un material no ligado sea designado como una "base granular" o "subrasante." Si a las entradas de datos de una estructura de pavimento se le incluye uno ó más espesores de capas de material de base no ligado realizado por el software, puede dar como resultado más de 20 capas las cuales no podrán ser analizadas por el programa. Un mensaje aparecerá en la pantalla del computador y el usuario tendrá que modificar el sistema de capas. Esto puede ser hecho fácilmente reduciendo el espesor del material de base no ligada y agregando un material idéntico como capa de subrasante que se subdivide en subcapas más gruesas (ejemplo: Una base granular A-1-a de 60 pulg. podría ser transformado en una capa de base de 24 pulg. tipo A-1-a y una capa de 36 pulg. de subrasante tipo A-1-a). Nótese que puede haber tantas capas de subrasante según sea deseado.

#### **6.2.7.5 LECHO DE ROCAS.**

La presencia de lechos de rocas a 10 pies de la superficie del pavimento influye en la respuesta estructural de las capas del pavimento. Las entradas requeridas para esta capa incluyen lo siguiente:

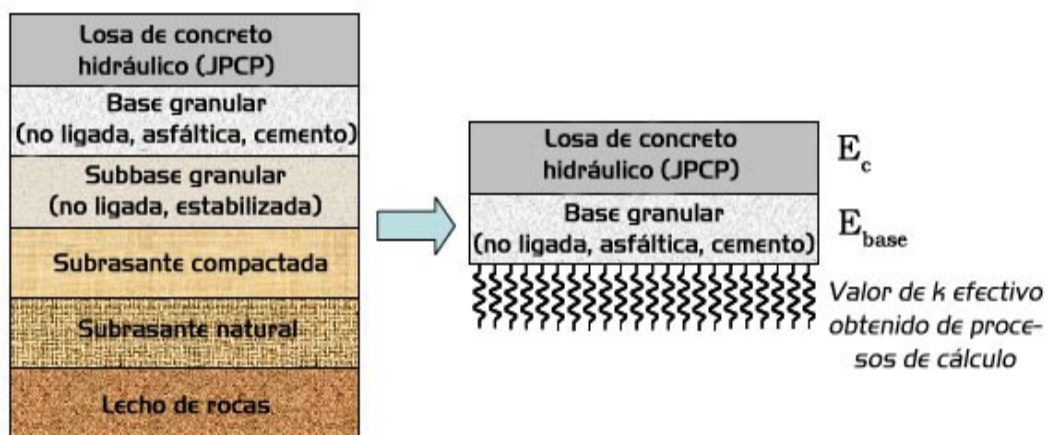
- Peso específico.
- Relación de Poisson.
- Módulos de las capas.

Las entradas para los niveles 1 y 2 no son aplicables para el lecho de rocas.

### 6.2.7.6 CONVERSIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE CAPA A UN MÓDULO DINÁMICO EFECTIVO DE REACCIÓN DE SUBRASANTE.

La subrasante y las capas de pavimento no ligadas son caracterizadas por utilizar el módulo resiliente en esta guía para todos los tipos de pavimentos.

Para el diseño de pavimentos rígidos, el valor  $k$  de la subrasante necesario para el análisis estructural es obtenido a través de procesos de conversión, los cuales transforman la estructura de pavimento real en una estructura equivalente que contenga una losa de concreto hidráulico, base y un valor dinámico efectivo de  $k$ , como es mostrado en la Figura 6.4.



**Figura 6.4. Modelo estructural de pavimento rígido para el cálculo de la respuesta estructural.**

Esta aproximación asegura de que todos los diseños de pavimentos sean llevados a cabo utilizando la misma entrada de datos para la subrasante y otras capas del pavimento. La conversión de los valores de  $E$  hasta  $k$  es desarrollado internamente en el software de la Guía de Diseño como parte del proceso de entrada de datos.



### **Cálculo del valor $k$ dinámico efectivo.**

Para obtener el valor  $k$  dinámico efectivo primero se determina el perfil de deflexión de la superficie del concreto hidráulico utilizando programas para capas elásticas, modelando todas las capas especificadas para el diseño. El módulo resiliente de la subrasante es ajustada para reflejar el esfuerzo desviador de las tensiones más leves que es utilizado en las pruebas del módulo resiliente en laboratorio. Luego, el perfil de deflexión calculado es utilizado para respaldar los procesos de cálculos del valor  $k$  dinámico efectivo. Así, el valor de  $k$  es calculado no como una entrada directa en el proceso de diseño (excepto en la rehabilitación).

El valor  $k$  efectivo usado en la guía de diseño es un valor  $k$  dinámico, el cual debería ser distinguido del tradicional  $k$  estático usado anteriormente en los procesos de diseño. El proceso para obtener el valor  $k$  dinámico efectivo para cada incremento en el tiempo (mes) es resumido en los siguientes pasos:

1. Asignar los parámetros de las capas ( $E$  y la relación de Poisson) en una forma consistente con el diseño de pavimento flexible.
2. Utilizar el programa de capas elásticas llamado JULEA, el cual simula una carga de 9000 lb del Deflectómetro de Peso Descendido (FWD) con una placa de radio de 5.9 pulg. y calcula las deflexiones del concreto hidráulico en la superficie a 0, 8, 12, 18, 24, 36 y 60 pulg. desde el centro de la carga de la placa.
3. Ajustar el módulo resiliente en la subrasante para explicar el nivel más leve del esfuerzo desviador de las tensiones debajo de una losa de concreto hidráulico y de la base.
4. Utilizar el programa de capas elásticas JULEA para simular la carga de 9000 lb del FWD con la placa de radio igual a 5.9 pulg., con el módulo de resiliencia de la subrasante recalculado y con el módulo de la subbase.

5. Calcular la deflexión de la superficie de concreto hidráulico a 0, 8, 12, 18, 24, 36 y 60 pulg. desde el centro de la carga de la placa.
6. Usar el mejor método de ajuste para calcular el módulo dinámico de reacción de la subrasante utilizando las deflexiones de la superficie del concreto hidráulico.

El valor de  $k$  dinámico “efectivo” representa la compresibilidad de todas las capas debajo de la losa de concreto hidráulico y la base granular.

El valor  $k$  dinámico efectivo de la subrasante es calculado para cada mes del año y utilizado directamente para el cálculo de las tensiones críticas en la acumulación del incremento de daño sobre la vida de diseño del pavimento. Los factores tales como el nivel freático, profundidad del lecho de rocas y otros, pueden afectar significativamente el valor  $k$  dinámico efectivo. Todos esos factores son considerados en la EICM.

## **6.2.8 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO RÍGIDO.**

Varias características tienen un efecto significativo en el comportamiento de los concretos hidráulicos con JPCP. Algunos ejemplos de estas características para JPCP incluyen el espaciamiento entre juntas y el soporte lateral (hombros de concreto amarrados a losas con sobreancho).

### **6.2.8.1 DIFERENCIA DE TEMPERATURA EFECTIVA EN LA CURVATURA/ALABEO PERMANENTE.**

La magnitud de curvatura/alabeo permanente es un factor sensible que afecta a todo el comportamiento del pavimento rígido. Algunos de los factores que afectan a la curvatura/alabeo permanente incluyen lo siguiente:

- El clima (temperatura del aire, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento) durante la colocación del concreto hidráulico.
- Tiempo de construcción y proceso de curado (en construcciones diurnas con intensa radiación solar añade calor de hidratación, construcciones nocturnas sin radiación solar, tipos de curado).
- Las propiedades de la mezcla de concreto hidráulico incluyen el tipo de cemento, relación agua-cemento, contenido de agua, cantidad de cemento y tipo de agregado.
- Arrastre de la losa de concreto rígido por su mismo peso y por las restricciones en los bordes.
- Propiedades y tipo de base.

La curvatura de la losa después de la construcción, puede ser altamente variable aún a lo largo del proyecto dado y a una combinación de factores adversos (una alta contracción en la mezcla de concreto hidráulico, un gradiente excesivo de temperatura en el momento de fraguado, y un curado pobre) pueden conducir a una extremadamente alta curvatura/alabeo permanente, dando por resultado agrietamientos de superficie hacia abajo. Sin embargo, los resultados disponibles de calibración indican que los valores promedios efectivos a largo plazo de curvatura/alabeo permanente, son bastante uniformes, sin tendencias obvias fundamentado en factores de clima ó de diseño, incluyendo el espesor de la losa y el tipo de base.

#### **6.2.8.2 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO EN JPCP.**

##### **Espaciamiento en la junta.**

El espaciamiento en las juntas es un factor de diseño crítico en JPCP que afecta al comportamiento estructural y funcional, así como también en la construcción y al costo de mantenimiento. Las tensiones en JPCP incrementan rápidamente con el incremento del espaciamiento en la junta. En menor grado,

las fallas en las juntas también incrementan con el aumento en el espaciamiento en las juntas. El espaciamiento en la junta debe ser seleccionado en el contexto de las características de diseño como son el espesor de losa, ancho de losa, propiedades de los materiales de concreto hidráulico, tipo de base y rigidez de la subrasante. Un espaciamiento de junta en particular puede ser adecuado para un sistema de características de diseño dado pero puede ser inadecuado para otros sistemas.

En general, se recomienda una junta con espaciamiento corto (15 pies); sin embargo, no hay necesidad de hacer espaciamientos de juntas menores a 12 pies, debido a que la anchura mínima del carril es de 12 pies. Si se utiliza un espaciamiento de junta al azar, el espaciamiento de junta promedio puede ser utilizado para la evaluación del comportamiento de fallas, pero para las grietas transversales de paneles largos y cortos deberían ser evaluados por separado. El software de la Guía de Diseño, utiliza el espaciamiento de junta promedio para el análisis de fallas y el espaciamiento de junta máximo se utiliza para el análisis de grietas cuando es introducido el espaciamiento de junta al azar.

### **Diámetro y espaciamiento de dovelas.**

Para los pavimentos con dovelas, el diámetro y el espaciamiento de las dovelas, son entradas de datos críticas del diseño. Cuanto más grande sea el diámetro de la dovela, más baja es el esfuerzo flexionante en el concreto hidráulico y las fallas en las juntas. Las fallas en las juntas en JPCP son altamente susceptibles al diámetro de la dovela. El espaciamiento de la dovela es simplemente el espaciamiento entre las dovelas. El espaciamiento típico de las dovelas es de 12 pulg. Típicamente, como el espesor requerido de la losa aumenta (para controlar las grietas en la losa debido al tráfico más pesado), se requiere un aumento en el diámetro de la dovela para controlar las fallas en las juntas. Nótese que al incrementar el espesor de la losa sin un aumento correspondiente en el diámetro de la dovela puede dar lugar a un aumento

pequeño en la predicción de fallas en las juntas debido a una reducción en el área efectiva de la barra con relación al espesor de la losa.

#### **Tipo de sellante de junta.**

El tipo de sellante es una entrada de datos del modelo empírico usado para predecir peladuras. Las peladuras son usadas en la predicción de la rugosidad pero no es considerado directamente como una medida de comportamiento en esta Guía. Las opciones de sellantes son líquidos, silicona y premodelados.

#### **Soporte lateral.**

Los hombros amarrados a la losa de concreto hidráulico y a losas con sobrecancho, pueden significativamente mejorar el comportamiento en un JPCP reduciendo las deflexiones críticas y los esfuerzos a lo largo de los costados. El tipo de hombro también afecta la cantidad de infiltración de humedad dentro de la estructura de pavimento. Los efectos de la infiltración son considerados en la determinación del módulo estacional de las capas no ligadas. Las características del efecto estructural del soporte lateral son directamente consideradas en el proceso de diseño. Los datos de entradas para estas características de diseño son las siguientes:

- Hombros amarrados al pavimento de concreto hidráulico. Para hombros de concreto amarrados, debe ser proporcionado el LTE (Eficiencia en la Transferencia de Carga) a largo plazo entre el carril y el hombro. El LTE es definido como la relación de deflexiones de las losas cargadas y no cargadas. Cuanto más alto es el LTE, mayor es el soporte proporcionado por el hombro para reducir las respuestas críticas de las losas de la estructura principal. Las deflexiones típicas a largo plazo de LTE es:
  - 50 a 70 por ciento para el hombro construido monolíticamente y amarrado al concreto hidráulico.

- 30 a 50 por ciento para el hombro construido por separado y amarrado al concreto hidráulico.
- Los hombros de concreto no amarrados u otros tipos de hombro no proporcionan un soporte significativo; por lo tanto, debe ser utilizado un valor bajo de LTE (ejemplo, un 10 por ciento debido al soporte extendida desde la base granular).
- Losas con sobreancho. Las losas con sobreancho mejoran el comportamiento de un JPCP debido al movimiento efectivo de la trayectoria de la llanta lejos de los costados del pavimento donde ocurren las cargas más críticas. El dato de entrada de diseño para la losa con sobreancho es el ancho de la losa el cual puede extenderse a partir de 12 a 14 pies.

#### **Baja erosionabilidad.**

El potencial para la erosión de la base ó la subbase (directamente debajo de la capa de concreto hidráulico), tiene un impacto significativo en la iniciación y propagación de deterioros en el pavimento. Se clasifican diferentes tipos de base fundamentados en la erosionabilidad a largo plazo, así:

- Clase 1. Materiales extremadamente resistentes a la erosión.
- Clase 2. Materiales muy resistentes a la erosión.
- Clase 3. Materiales resistentes a la erosión.
- Clase 4. Materiales bastante erosionables.
- Clase 5. Materiales muy erosionables.

#### **Interfase entre base-concreto hidráulico.**

La interfase entre una base estabilizada y la losa de concreto hidráulico, es modelado completamente ligado ó no ligado para el diseño de JPCP. La contribución estructural de una base estabilizada es significativa si la base es completamente ligada a la losa. Las bases estabilizadas (especialmente las bases estabilizadas con asfalto) son a menudo ligadas a la losa, y las pruebas

de deflexión conducidas en el interior de la losa, muestran típicamente una respuesta de ligamento. Sin embargo, los efectos del medio ambiente y de las cargas de tráfico tienden a debilitar esta adherencia a través del tiempo alrededor de los bordes, y la asunción de la interfase ligada puede ser no conservadora sobre todo el período de diseño.

El procedimiento de diseño de un JPCP incluye modelar los cambios en la condición de la interfase ligada en el tiempo. Esto se logra para especificar la edad del pavimento en el cual ocurra la separación. Hasta en la edad de separación, la interfase entre losa-base se asume completamente ligada; después de separación, se asume la interfase completamente no ligada. El dato de entrada del diseño es la edad del pavimento en separación, en meses. En general, no se recomienda especificar la edad de separación mayor a 5 años (60 meses) y no fue utilizada en la calibración de los datos.

### **6.3 CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA JPCP.**

El comportamiento de un JPCP depende de numerosos factores y las soluciones de diseño de ninguna manera pueden ser únicas. Los objetivos del diseño pueden ser logrados usando cualquier número de combinaciones de las características del diseño. Las diferentes características del diseño se pueden también utilizar para mejorar el comportamiento del pavimento y para reducir el riesgo de un comportamiento. Por ejemplo, una base estabilizada y una subbase de agregado pueden ser utilizadas para mejorar la resistencia y la uniformidad de soporte en la fundación donde las condiciones de la subrasante sean débiles ó variables. Una base estabilizada es también más resistente a la erosión, el cual puede ser una cualidad importante para reducir fallas en un comportamiento pobre cuando es diseñado para altos volúmenes de tráfico pesado.

Para períodos largos de diseño (unos 50 años), el drenaje subsuperficial puede ser importante para asegurar un adecuado funcionamiento de los materiales a largo plazo. Una cuidadosa consideración de las opciones disponibles y las condiciones del diseño son importantes para obtener un diseño óptimo.

### **6.3.1 ESPESOR DE LOSA.**

Esta es una de las características más críticas del diseño desde el punto de vista de costo y comportamiento. En general, si incrementa el espesor de la losa, decrece el esfuerzo de flexión crítico y las deflexiones con reducción consecuente en las grietas y fallas. Los estudios en campo y los analíticos han mostrado que con el incremento de espesor en la losa, decrecen en gran manera las grietas y además decrecen notablemente las fallas en las juntas. El espesor de la losa es el factor más dominante que afecta al comportamiento de las grietas en un JPCP. Sin embargo, otros factores de diseño también afectan a las grietas en JPCP, incluyendo espaciamiento en juntas, soporte lateral, propiedades del concreto hidráulico (resistencia, coeficiente de expansión térmica, contracción y módulo elástico) y el tipo de base. Por lo tanto, el espesor de la losa debe ser seleccionado en el contexto de esas características de diseño y del clima. Un espesor de losa adecuado para las características de un sistema de diseño dado puede ser completamente inadecuado para otro sistema de diseño. El objetivo es seleccionar el espesor mínimo que provea los niveles aceptables de grietas transversales, fallas en las juntas y rugosidad (IRI) en el período de diseño con el nivel de confiabilidad que es deseado.

### **6.3.2 ANCHO DE LOSA.**

Típicamente, el ancho de la losa ha sido sinónimo de ancho de carril (usualmente 12 pies). Varios países han utilizado losas más anchas (típicamente más anchas de 12 pies), manteniendo el ancho del carril en la



misma losa para mejorar el comportamiento. Los estudios en campo y los analíticos han mostrado que las losas más anchas mejoran enormemente el comportamiento de las fallas y grietas en un JPCP, por mantener los ejes de los vehículos bien retirados de los bordes libres y esquinas donde pueden causar esfuerzos críticos y deflexiones. La drástica reducción o eliminación de condiciones de carga en los bordes libres resulta en una sustancial reducción en los esfuerzos máximos y deflexiones, que bajo condiciones típicas de servicio, conduce a menos fallas y grietas. Sin embargo, algunas secciones con sobrecarga de losa han mostrado tendencia a incrementar el desarrollo de grietas longitudinales en la rodadura, tales grietas no son tratadas en esta guía. Por lo tanto, el diseño de sobrecarga de losa no debería ser usado sin tener todas las consideraciones de otras características de diseño.

### **6.3.3 MATERIALES DEL CONCRETO HIDRÁULICO.**

La propiedad más importante del material de concreto hidráulico es la durabilidad. Todos los análisis de diseño en esta guía son desarrollados asumiendo que los materiales se comportarán bien a través del período de diseño. La predicción del comportamiento del pavimento es válida solamente si los problemas de durabilidad tales como las grietas D ó la reacción alcali-silica (ASR) no se desarrollen para causar fallas prematuras. Así, se deben tomar las medidas necesarias para asegurar el adecuado comportamiento para lograr los objetivos del diseño. Estas medidas incluye los componentes de la mezcla de concreto hidráulico así también como proveer drenaje subsuperficial. La durabilidad es muy importante cuando es seleccionado un diseño para un período largo (unos 50 años).

Las propiedades de los materiales del concreto hidráulico que son directamente considerados en esta Guía incluyen: La resistencia a la flexión, módulo de elasticidad, contracción por secado, coeficiente de expansión

térmica, conductividad térmica y capacidad de calor. El comportamiento del JPCP puede ser absolutamente sensible a muchos de estos parámetros. Por ejemplo, los efectos significativos de la resistencia a la flexión del concreto hidráulico en las grietas son bien conocidos. El coeficiente de expansión térmica es también un factor altamente sensible que afecta a los esfuerzos de curvatura y a las aberturas de juntas en JPCP. La cantidad de contracción también afecta a las grietas y las fallas en un JPCP.

En general, el módulo elástico del concreto hidráulico se eleva con el aumento de la resistencia a la flexión para cualquier mezcla dada de concreto hidráulico. Un incremento en la resistencia conduce a daños por fatiga más bajos. Sin embargo, debido que el módulo elástico también aumenta, el esfuerzo por flexión incrementará. Así, la reducción en el daño por fatiga no es tan dramática como comúnmente se creía, cuando la resistencia del concreto hidráulico es incrementada. En adición, una resistencia más alta en el concreto hidráulico obtenido a través de aumentos de contenido del cemento resulta con una contracción más alta en la mezcla endurecida y un valor más alto en  $\alpha_{PCC}$  (coeficiente de expansión térmico en el concreto hidráulico). Entre más alto sean la contracción y  $\alpha_{PCC}$ , conducen a mayores curvaturas y alabeos el cual tiende a incrementar esfuerzos de arriba hacia abajo.

Aunque el módulo del concreto hidráulico para cualquier mezcla dada está correlacionado a la resistencia, el módulo del concreto hidráulico para diferentes mezclas puede ser absolutamente variable, dependiendo del tipo de agregado. Los efectos del módulo del concreto hidráulico en los esfuerzos son bastante significativos. Así, para una resistencia dada de concreto hidráulico, la mezcla con un módulo más bajo proveerá significativamente un mejor comportamiento en las grietas. Sin embargo, un módulo más bajo conduce a mayores deflexiones, el cual puede ser fatal para el comportamiento de las fallas, aunque el mayor factor dominante que afectan a las fallas es el diámetro de las dovelas.

Lo siguiente es un resumen de varios efectos de las propiedades del concreto hidráulico en el comportamiento de un JPCP:

- Resistencia del concreto hidráulico. La resistencia más alta es la mejor para todo el comportamiento del JPCP, pero una resistencia más alta para un material dado es acompañada por un módulo más alto, el cual tiende a moderar el efecto beneficioso. También, es alcanzado por un contenido más alto de cemento, el incremento de la contracción y de  $\alpha_{PCC}$  resultará con en alabeos y curvaturas más altas.
- Módulo del concreto hidráulico. El mejor módulo es el más bajo para las grietas, pero un módulo más bajo puede ser fatal para el comportamiento de las fallas.
- Contracción. El valor más bajo es el mejor para el comportamiento del JPCP.
- Coeficiente de expansión térmica. El valor más bajo es el mejor para el comportamiento del JPCP.

La mayoría de las propiedades del concreto hidráulico son dictaminadas por los materiales y el diseñador puede tener un pequeño control sobre otras propiedades de la mezcla con excepción en la resistencia. Sin embargo, esto es posible para optimizar la mezcla del concreto hidráulico para el comportamiento del pavimento, y la optimización de la mezcla puede ser práctica en algunos proyectos. Algunas de las propiedades del concreto hidráulico afectan el costo de los materiales así como también al comportamiento.

#### **6.3.4 ESPACIAMIENTO ENTRE JUNTAS.**

El espaciamiento entre juntas afecta a las grietas transversales y al costo de la construcción de JPCP. También afecta pero en menor grado a las

fallas en las juntas. Los estudios de campo han mostrado que los espaciamientos entre juntas más largos, el potencial de riesgo de juntas transversales es más grande. El espaciamiento de junta debe ser seleccionado en el contexto de las características de diseño tales como el espesor de losa, ancho de losa, las propiedades de los materiales de concreto hidráulico y el tipo de base. Puede ser adecuado un espaciamiento de junta específico para un sistema de otras características de diseño dado, pero inadecuado para otro sistema de características de diseño.

El objetivo es seleccionar el espaciamiento entre junta máximo que provea un nivel aceptable de transferencia de grietas y rugosidad a través de la vida de diseño en el nivel de confiabilidad deseado. La consideración directa de las grietas hacia abajo ha causado que el espaciamiento entre juntas sea aún más crítico. El espaciamiento entre ejes de los vehículos (particularmente entre ejes de dirección y ejes de impulsión) han sido mostrados para afectar enormemente al esfuerzo flexionante en la superficie de la losa cuando todos estos ejes se ajusten en una sola losa, el cual puede conducir a serias grietas transversales hacia abajo ó diagonales.

En general, un espaciamiento entre juntas corto (15 pies) es recomendado; sin embargo, no hay necesidad para realizar espaciamiento entre juntas menor a 12 pies, debido a que el ancho de carril es de 12 pies.

### **6.3.5 LTE EN JUNTAS TRANSVERSALES.**

La transferencia de carga a través de las juntas transversales es el factor más crítico para el control de fallas en juntas de JPCP y además de la rugosidad. La transferencia de carga también afecta las grietas de van de arriba hacia abajo en el JPCP. Los estudios en campo han mostrado que el uso de dispositivos mecánicos (dovelas) decrece enormemente el potencial de fallas en las juntas transversales.

El diámetro de las dovelas es un importante factor que afecta a las fallas en el JPCP. Los diámetros pequeños (1 pulg. ó menos) de dovelas son relativamente inefectivos en la prevención de fallas en las juntas, mientras que las dovelas de diámetro grande (1.5 pulg.) son altamente efectivas. Una base estabilizada (asfalto ó cemento) también incrementa la transferencia de carga en la junta.

Las fallas en las juntas es el factor más crítico en el control de la rugosidad en JPCP. Los factores de diseño de JPCP que afectan las fallas en las juntas se incluyen el diámetro de la dovela, el tipo de base, soporte lateral (amarradas con hombros de concreto hidráulico ó losas con sobreancho) y el espesor de la losa. Las propiedades de la mezcla del concreto hidráulico (incluyendo la contracción, coeficiente térmico y módulo elástico) y las propiedades del clima también afectan a las fallas en las juntas. Sin embargo, el diámetro de la dovela es en gran medida el factor más dominante que afecta a las fallas en la junta transversal.

Una adecuado LTE (Eficiencia en la Transferencia de Carga) debe ser provista a través de las juntas transversales para asegurar un aceptable nivel de fallas y rugosidad sobre la vida de diseño al nivel de confiabilidad deseado.

### **6.3.6 PROFUNDIDAD DEL CORTADO CON SIERRA DE LAS JUNTAS TRANSVERSALES.**

La profundidad del aserrado es importante para asegurar una apropiada formación de las juntas transversales. Esto es deseable para mantener la profundidad del aserrado a un mínimo tal que provea un alto grado de seguridad tal que las juntas se formen apropiadamente para evitar cualquier tipo de grietas. La práctica convencional ha sido de aserrar las juntas

transversales a una profundidad del 25 por ciento del espesor de la losa. Esta profundidad ha trabajado bien en la mayoría de los casos, pero un corte más profundo debería ser considerado donde es usada una base permeable ó estabilizada. La penetración del concreto hidráulico en una base permeable ó la adherencia inicial de las losas de concreto hidráulico a una base estabilizada, da como resultado un mayor espesor efectivo de la losa, requiriendo un aserrado más profundo para asegurar una apropiada formación de la junta. Para este diseño, un aserrado con profundidad de un tercio del espesor de la losa es recomendado. Para bases estabilizadas con cemento y bases de concreto de baja resistencia, al cortar en la base (1/3 de su profundidad) en la localización previstas de las juntas transversales en el concreto hidráulico, es recomendable también para minimizar el potencial de cualquier grieta que pueda aparecer.

### **6.3.7 TRANSFERENCIA DE CARGA Y AMARRE EN JUNTAS LONGITUDINALES.**

La transferencia de carga a través de la junta longitudinal entre los carriles de tráfico y amarrados a los hombros de concreto hidráulico, afectan al esfuerzo de flexión y a la deflexión en las losas de concreto. Por lo tanto, la transferencia de carga a través de las juntas longitudinales afecta a las grietas transversales y a las fallas en las juntas. En adición, para mejorar la LTE a través de las juntas transversales, el sistema de las barras de amarre también previene la separación del carril. La separación del carril puede conducir a una mayor infiltración de agua dentro de la estructura de pavimento, así como también se convierte en una inquietud en la seguridad.

Un adecuado sistema de amarre ó anclaje es crítico para asegurar la efectividad de la construcción longitudinal de las juntas. Varios estudios han mostrado que las barras No. 5 (30 pulg. de longitud) espaciado a intervalos de

30 pulg., proveen un comportamiento adecuado para la mayoría del tráfico desde el moderado al pesado en las carreteras. En áreas que son frecuentemente transitadas por vehículos pesados (carriles de aceleración/desaceleración, carriles para ascenso de tráfico y áreas de unión de altos volúmenes de vehículos), deberían ser considerados el uso de barras de diámetro más grandes y a las barras de amarre con espaciamientos más cercanos.

### **6.3.8 PROFUNDIDAD DEL CORTADO CON SIERRA DE LAS JUNTAS LONGITUDINALES.**

La profundidad del aserrado es importante para asegurar una apropiada formación de las juntas longitudinales. Esto es deseable para mantener la profundidad del aserrado a un mínimo tal que provea un alto grado de seguridad para que las juntas se formen apropiadamente y evitar cualquier tipo de grietas. En general, las juntas longitudinales necesitan ser cortadas en forma profunda (que las juntas transversales) para asegurar una apropiada formación de las mismas, especialmente en las juntas del carril-hombro, debido a la reducción del control y a los esfuerzos por curvatura. El control y el esfuerzo por curvatura ayudan a la superficie debilitada creada por el aserrado a través de la grieta, formando las juntas. Es recomendado para juntas longitudinales un aserrado con profundidad de un tercio del espesor de la losa.

### **6.3.9 BASE.**

Varios tipos de bases están disponibles para el uso bajo JPCP, incluyendo bases de agregados denso graduado (sin estabilizar), base tratada con cemento, base tratada con asfalto, base de concreto de baja resistencia, base de concreto hidráulico reciclado y bases permeables. Los diferentes tipos

de base han mostrado que afecta las fallas en las juntas, rugosidad y las grietas en la losa. La contribución estructural de una base estabilizada rígida puede ser muy significativa si la base es ligada a la losa. Sin embargo, el propósito principal de proveer una base granular en el JPCP es para otorgar un soporte uniforme y resistencia a la erosión, los cuales son críticos para evitar fallas previstas y deterioros. Para la capacidad estructural, otros factores de diseño (espesor de losa, resistencia del concreto hidráulico y soporte lateral) tienen un impacto mayor y directo que una base estabilizada. Por otra parte, las funciones provistas por una base granular no puede ser sustituida con una capacidad estructural adicional.

Las fallas en las juntas son menos significativas en JPCP provistas con una base estabilizada; sin embargo, el reflejo de grietas ha sido una preocupación para bases tratadas con cemento y para bases de concreto de baja resistencia. En el pasado, los intentos han sido hechos para desligar una base estabilizada con cemento ó una base de concreto de baja resistencia desde la losa. En general, la acción compuesta entre las capas de pavimento es beneficiosa. Las bases tratadas con cemento y las bases de concreto de baja resistencia, pueden ser cortada ( $1/3$  del espesor de la base) en la localización prevista de las juntas en la capa de concreto hidráulico y ligada a la losa de pavimento, como medios más positivos para precaver la dirección de las reflexiones de las grietas y también para la realización beneficiosa de la ligadura entre la base y la losa.

El cortado y ligado de la base provee una buena uniformidad de las grietas en las juntas. Sin embargo, la adherencia entre la base y la losa puede que no sea contabilizada hasta al final de 4 años.

El tipo de base debería ser seleccionada en consideración de los factores del sitio (incluyendo clima y subrasante), nivel de tráfico, otras características del diseño de pavimento y el costo. Una base uniforme y resistente a la erosión



es más importante para pavimentos sujetos a altos volúmenes de tráfico pesado, especialmente en áreas húmedas. La cantidad de estabilizadores es un efecto muy significativo en la erosionabilidad de la base. Así, la cantidad de estabilizadores debe ser cuidadosamente seleccionada para coincidir con la vida de diseño, clima, tráfico y otras condiciones de diseño.

### **6.3.10 SUBBASE.**

El uso de una subbase debajo de la base granular depende de varios factores, incluyendo el tipo y rigidez de la subrasante, el tipo de base granular (base no ligada ó estabilizada) y el uso de una capa de drenaje de granulometría abierta. Los estudios en el campo han mostrado que JPCP construidos sobre una base estabilizada, la erosión puede tomar lugar sobre la base estabilizada. Para tal diseño, es importante proveer una subbase granular para minimizar el potencial de la erosión y de la pérdida de soporte sobre la base estabilizada. Una subbase de agregados puede ser utilizada como medida para proteger la base de agregado en contra de la contaminación por finos y la subbase de grano fino.

Sobre la base permeable, el uso de una subbase de agregado denso graduado para satisfacer los requerimientos de la gradación para una capa filtrante es esencial para prevenir la infiltración de finos dentro de la capa drenante de granulometría abierta.

### **6.3.11 DRENAJE SUBSUPERFICIAL.**

El estado actual de las habilidades es tal que las observaciones concluyentes con respecto a la efectividad del drenaje subsuperficial del pavimento ó la necesidad del drenaje subsuperficial no son posibles. La

eficacia del drenaje subsuperficial ha sido confundido con problemas de la construcción (los daños en los drenes de borde; contaminación de la base permeable), del mantenimiento pobre, y de la estabilidad pobre de algunas de las materias usados en las bases permeables. Sin un buen drenaje subsuperficial, la protección contra el bombeo y la erosión deben ser logrados con una combinación de varias características de diseño, incluyendo la base, la subbase, el hombro y el uso de características tales como dovelas en juntas transversales y losas con sobreancho.

La experiencia con estas características del diseño indican que un JPCP puede ser diseñado para proporcionar un comportamiento funcional y estructural adecuado sin drenaje subsuperficial; sin embargo, un buen drenaje subsuperficie puede ser muy importante para lograr un buen comportamiento del material a largo plazo. Cuando las secciones de pavimento han incluido un diseño, construcción y un sistema de mantenimiento del drenaje subsuperficial, mejoran el comportamiento del pavimento rígido.

Las grietas D han sido una causa importante de fallas prematuras en pavimentos rígidos, especialmente en áreas frías. Los estudios indican que el buen drenaje subsuperficial puede ser importante en la mitigación de grietas D y de otros problemas de los materiales del concreto hidráulico. El comportamiento del material a largo plazo es más crítico para períodos más largos de diseño, y el drenaje subsuperficial es una característica del diseño que puede significativamente mejorar el comportamiento del material.

Varias opciones de drenaje subsuperficial están disponibles para JPCP, bases permeables, drenes laterales. El denominado "hombro permeable", un diseño donde la base permeable es proporcionada solamente debajo del hombro, ha demostrado también solución de drenaje subsuperficial eficaz para los pavimentos rígidos. El drenaje subsuperficial debería ser utilizado solamente si se encuentra en mantenimiento.

### **6.3.12 DISEÑO DE HOMBROS.**

El diseño de hombros afecta el costo de construcción y al comportamiento del pavimento. Los factores para considerar la selección del tipo y el ancho del hombro incluye el uso de hombros para desvío de tráfico durante rehabilitación y para usos de emergencia. Los hombros también pueden ser diseñados para ser usados como un carril extra durante los horas pico de tráfico. Una construcción monolítica de hombros amarrados de concreto hidráulico es efectivo en el mejoramiento de la capacidad estructural del JPCP. El uso de hombros amarrados de concreto hidráulico reduce también el potencial del bombeo y la erosión, debido a que en la junta carril-hombro puede ser sellado en forma más efectiva y las deflexiones en las juntas son más bajas.

### **6.3.13 MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE.**

El mejoramiento de la superficie de una subrasante suave provee mayor soporte y uniformidad al pavimento y ayuda en la construcción. El mejoramiento de la subrasante puede ser logrado estabilizando la porción superior ó con la colocación de una capa granular de espesor grande. Los efectos del mejoramiento de la subrasante son considerados en el proceso de diseño en términos del incremento del módulo, el cual afecta a la deflexión de la losa y al esfuerzo en cierto grado. Otro beneficio del mejoramiento de la subrasante puede ser la reducción potencial de la erosión en la superficie de la subrasante. El mejoramiento de la subrasante también puede jugar un papel en la producción de la rugosidad en el pavimento construido.

## **6.4 EJEMPLO DE DISEÑO DE UN JPCP UTILIZANDO EL MÉTODO DE DISEÑO AASHTO 2002.**

### **6.4.1 INFORMACIÓN GENERAL.**

El pavimento de concreto con junta simple tiene una vida de diseño de 25 años y será construido en el mes de Junio del 2005 para ser abierta al tráfico en Diciembre del 2005.

### **6.4.2 CRITERIOS DE COMPORTAMIENTO.**

El valor inicial del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) a cumplir es de 126.7 pulg/mi (2 m/km). Se espera que al final de los 25 años de la vida de diseño, el pavimento no tendrá más del 10% de grietas transversales con un nivel de confiabilidad del 90% y no más de 0.15 pulg. (3.81 mm) de escalonamiento en las fallas con un nivel de confiabilidad del 90%. Además, la rugosidad debería ser mantenida con un IRI menor de 300 pulg/mi (4.73 m/km) con un nivel de confiabilidad del 90% al final de la vida de diseño.

### **6.4.3 LOCALIZACIÓN.**

El pavimento se encuentra en El Salvador dentro de la región central del país. Está localizado en la cercanía de San Salvador. La prolongación de 5 millas (8.05 Km) de pavimento llamado PCC2005, serán diseñadas con rumbo oriente y está entre la estación 00+00 a la 05+00.

### 6.4.4 TRÁFICO.

El TPDA en esta carretera es estimado para ser de 9886 vehículos durante el año de servicio. Habrá dos carriles en la dirección de diseño con un 80% de los vehículos en el carril de diseño. El tráfico vehicular es igualmente distribuido en ambas direcciones (50% de los vehículos manejan en la dirección de diseño). La velocidad operacional es de 55.92 mph (90 km/h).

La información recolectada en el sitio específico, muestra que la composición vehicular correspondiente al TPDA de 9886 vehículos es de acuerdo a la siguiente tabla:

<b>Clase Vehicular</b>	<b>Porcentaje de TPDA en cada clase</b>
Clase 4	72.5
Clase 5	22.8
Clase 9	4.7

Este pavimento ha sido diseñado para el tráfico de vehículos pesados tipo autobuses sobre una carretera principal de categoría arterial/interestatal, por lo tanto, el tráfico consiste de un alto porcentaje de vehículos de un eje simple direccional y un eje de doble rueda de tracción (vehículo tipo C2).

La distribución del tráfico vehicular horario para el sitio en estudio es el siguiente:

<b>Medianoche</b>	0.6%	<b>Mediodía</b>	5.6%
<b>1:00 a.m.</b>	0.4%	<b>1:00 p.m.</b>	5.3%
<b>2:00 a.m.</b>	0.3%	<b>2:00 p.m.</b>	5.5%
<b>3:00 a.m.</b>	0.5%	<b>3:00 p.m.</b>	5.2%
<b>4:00 a.m.</b>	1.5%	<b>4:00 p.m.</b>	5.6%
<b>5:00 a.m.</b>	4.8%	<b>5:00 p.m.</b>	5.8%
<b>6:00 a.m.</b>	9.1%	<b>6:00 p.m.</b>	5.7%
<b>7:00 a.m.</b>	7.6%	<b>7:00 p.m.</b>	4.4%
<b>8:00 a.m.</b>	5.9%	<b>8:00 p.m.</b>	3.6%
<b>9:00 a.m.</b>	5.4%	<b>9:00 p.m.</b>	2.8%
<b>10:00 a.m.</b>	5.4%	<b>10:00 p.m.</b>	2.2%
<b>11:00 a.m.</b>	5.6%	<b>11:00 p.m.</b>	1.2%

Después del año base, sobre la vida de diseño del pavimento, el tráfico incrementa un 4.5% del tráfico del año precedente (compuesto anualmente).

La distribución de carga por eje es idéntica a los valores por defecto (derivados del LTPP) provistos en el software de la Guía de Diseño para cada clase de vehículos, tipo de eje, categoría de carga y meses del año.

Asumir que el desvío promedio de las llantas está localizada a 18 pulg desde el borde del pavimento. La desviación estándar para el desvío de la rodadura es de 10 pulg (25.4 cms). El pavimento tiene un diseño de ancho de carril estándar de 12 pies (3.65 m).

El número de ejes simples, tandem, tridem y cuádruple para cada clase de vehículo es el mismo por defecto derivado de los datos del LTPP (provistos en el software).

La configuración de eje es la siguiente:

Promedio de ancho de eje (dimensiones externas de borde a borde): 8.5 pies (2.59 m).

Espaciamiento de llanta dual: 12 pulg (30.48 cm).

La presión de las llantas simples y duales es de 120 psi (827.37 KPa). El carril de diseño es de 12 pies de ancho (3.65 m). El espaciamiento de eje promedio para tandem, tridem y cuádruple son los siguientes:

<b>Tipo de eje</b>	<b>Espaciamiento entre ejes (pulg.)</b>
Tandem	51.6
Tridem	49.2
Cuádruple	49.2

#### **6.4.5 PROPIEDADES DE LA SUPERFICIE Y DE DRENAJE.**

El diseño geométrico de la carretera requiere una sección transversal del 2%. La trayectoria del drenaje tendrá una longitud de 12 pies (3.65 m) desde la línea central del dren lateral hasta la junta de carril-hombro y la infiltración dependerá del tipo de hombro que se ha escogido. Asumir una superficie con absorbencia de onda corta de 0.85.

#### **6.4.6 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO PARA EL JPCP.**

La temperatura y a las condiciones de curado que inducirán a la curvatura y alabeo permanente equivalente, a la temperatura que tiene el software por defecto [-10°F (-12.22°C)] para esta sección, se pueden evitar si se utiliza un curado compuesto durante todo el proceso de curado.

#### **6.4.7 PROPIEDADES DE MEZCLA DEL CONCRETO HIDRÁULICO.**

El diseño de la mezcla de concreto para ser usado en este proyecto tiene pruebas de resistencia de nivel 3 para la resistencia a compresión del concreto, modulo de elasticidad y modulo de ruptura. Se utilizará un modulo de ruptura de 640 psi.

El coeficiente de expansión térmica de la mezcla que se utilizó es de 4.8 pulg/pulg/°F. Asumir una conductividad térmica de 1.25 BTU/h-pie-°F y un calor específico de 0.28 BTU/lb-°F (valores por defecto que brinda el software de la Guía de Diseño).

El peso unitario y la relación de Poisson de la mezcla fueron de 149.8 lb/pe<sup>3</sup> (2400 Kg/m<sup>3</sup>) y 0.15 respectivamente.

El diseño de la mezcla de concreto comprende cemento Pórtland Tipo I con contenido de cemento de 505.7 lb/yr<sup>3</sup> (300 Kg/m<sup>3</sup>) y con la relación agua-cemento de 0.4. El tipo de agregado usado para el diseño de la mezcla es basalto.

Las características de contracción de la mezcla son los valores por defecto que brinda la Guía de Diseño e indican que su contracción reversible es de 50% de su valor último de contracción y toma 35 días para desarrollar el 50% de la contracción última.

#### **6.4.8 MATERIAL DE LA BASE.**

El material de base disponible para este proyecto esta clasificado como suelo-cemento, con una relación de Poisson de 0.28, un peso específico de 100 lb/pe<sup>3</sup> (1601.85 kg/m<sup>3</sup>) y un módulo elástico/resiliente de 600000 psi (413.69 MPa).

#### **6.4.9 SUBRASANTE.**

La subrasante en esta localización tiene un valor estimado de  $M_R$  de 28000 psi (CBR de 42%) en condiciones óptimas. El índice plástico del suelo es 6. El análisis de mallas que resultó de este material muestra un 23% y 70% de material que pasa a través de la malla #200 y #4 respectivamente. El  $D_{60}$  (60% que pasa en peso) del material es de 0.15 mm.



### **6.4.10 DISEÑO DE PRUEBA.**

La Guía de Diseño se origina en un proceso iterativo y requiere que el usuario desarrolle un diseño de prueba para comenzar el proceso de diseño.

El diseño de prueba es analizado a través del período de diseño especificado por el diseñador, el software de la Guía predice el comportamiento de este diseño de prueba. Si los criterios de diseño no cumplen, entonces el diseño es apropiadamente modificado hasta que es logrado el diseño final.

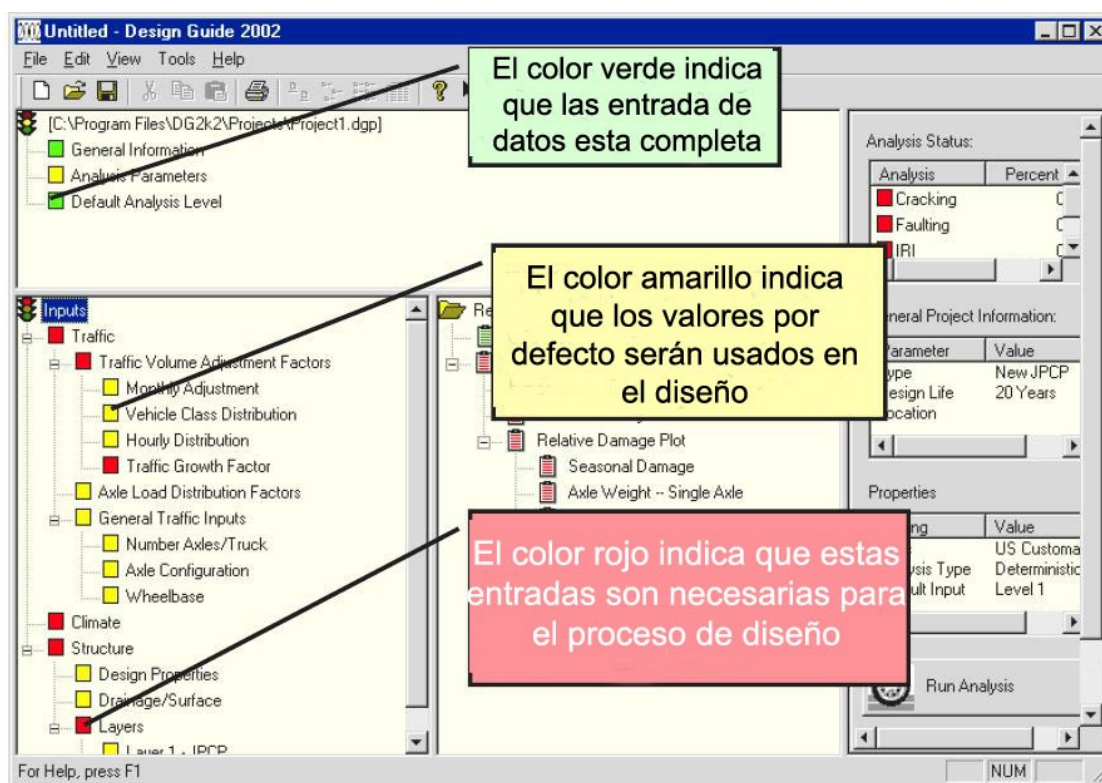
El proceso de diseño requiere los siguientes pasos:

1. Crear un nuevo proyecto.
2. Entrada de datos generales.
3. Entrada de datos de tráfico.
4. Entrada de datos de clima.
5. Entrada de datos estructural.
6. Corrida del análisis.
7. Modificación del diseño de prueba (si es necesario).

## INTERPRETACIÓN DE COLORES EN LOS INDICADORES DE ENTRADA DE DATOS.

En la Figura 6.5, se muestra como es la interpretación de colores de los indicadores de entrada de datos en el software de la Guía de Diseño, indicando el significado de cada uno de ellos, así, de esa manera tomar el criterio necesario en el momento del diseño ya sea de pavimentos nuevos ó rehabilitación de pavimentos.

Es de suma importancia esta interpretación de colores para poder llevar un control de cuales entradas de datos están disponibles y cuales se utilizaran por defecto de acuerdo a la base de datos con la que cuenta el software de la Guía de Diseño.

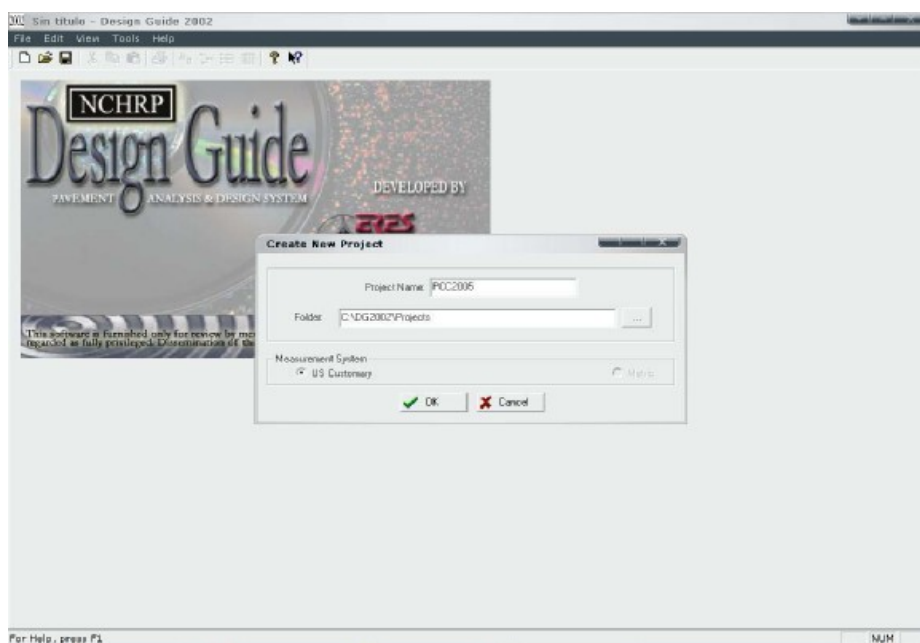


**Figura 6.5. Interpretación de colores en el software de la Guía de Diseño.**

#### 6.4.10.1 CREACIÓN DE UN PROYECTO NUEVO.

##### **1. Crear un proyecto de diseño nuevo en el programa de la Guía de Diseño.**

Abrir el programa de la Guía de Diseño del menú *Programas* de su sistema operativo (Windows 98, 2000, XP, NT). Luego abrir un nuevo archivo y asignar un nombre al proyecto, “PCC2005” como es mostrado en la Figura 6.6. Luego, seleccionar la carpeta para guardar el archivo del diseño en “C:\DG2002\Projects”. Seleccionar el sistema de unidades (en versión demo sólo se puede seleccionar la opción US Customary). Después hacer clic en “OK” y el programa abrirá la pantalla principal donde se introducirán los datos de entrada para diseño del nuevo proyecto como es mostrado en la Figura 6.7.



**Figura 6.6. Crear un archivo de un nuevo proyecto.**

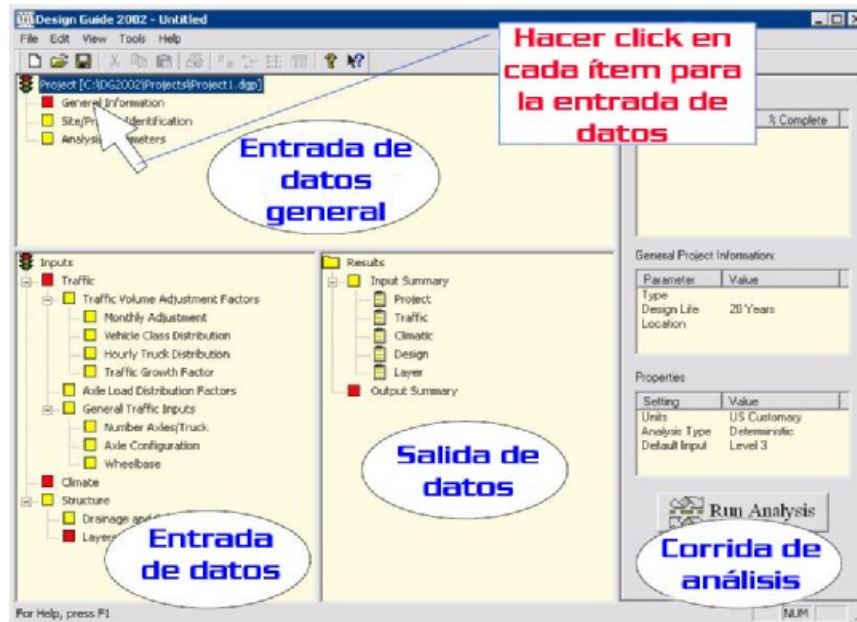


Figura 6.7. Presentación del programa de diseño.

#### 6.4.10.2 ENTRADAS DE DATOS GENERALES.

##### 1. Información general.

En la ventana principal del proyecto, hacer clic en la entrada de datos *información general (general information)* para abrir la ventana de las entradas generales. La ventana de las entradas de datos de información general es mostrada en la Figura 6.8.

- vi. Diseño de Vida: 25 años.
- vii. Mes de construcción del pavimento: Junio del 2005.
- viii. Mes de apertura al tráfico: Diciembre del 2005.
- ix. Tipo de diseño: Pavimento nuevo de JPCP.

**General Information**

Project Name: PCC2005

Description: Ejemplo ilustrativo del diseño de un pavimento rígido nuevo de acuerdo al método de diseño mecanicista-empírico AASHTO 2002

Design Life (years): 25

Base/Subgrade Construction Month: Year: 2005

Pavement Construction Month: June Year: 2005

Traffic open month: December Year: 2005

Type of Design

New Pavement

Flexible Pavement  Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)  Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)

Restoration

Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)

Overlay

Asphalt Concrete Overlay  PCC Overlay

OK Cancel

**Figura 6.8. Pantalla de información general.**

Hacer clic en *OK* y regresar a la pantalla principal del programa.

## **2. Identificación del sitio/proyecto.**

Hacer clic en *identificación del sitio/proyecto (general information)* para abrir la ventana de identificación del sitio/proyecto. Las entradas de datos hechas en esta ventana son solo para proveer la identificación del proyecto. Las entradas de datos proporcionados para este proyecto son mostrados en la Figura 6.9:

- x. Localización: El Salvador.
- xi. Identificación del proyecto: TESIS PCC2005.
- xii. Identificación de la sección: PCC2005-1.

- xiii. Clase funcional (seleccionar desde menú): Arteria-Interestatal principal y de defensa.
- xiv. Fecha: 11/09/2005.
- xv. Formato de la estación/marca: Millas 00+00.
- xvi. Comienzo de estación/marca: 0.
- xvii. Fin de estación/marca: 5.
- xviii. Dirección del tráfico: Rumbo oriente.

The image shows a software dialog box titled "Site/Project Identification". It contains the following fields and values:

Location:	El Salvador
Project ID:	TESIS PCC2005
Section ID:	PCC2005-1
Date:	11/09/2005
Station/milepost format:	Miles: 0.000
Station/milepost begin:	0.000
Station/milepost end:	5.000
Traffic direction:	East bound

Buttons: OK (with a green checkmark icon), Cancel (with a red X icon).

**Figura 6.9. Pantalla de la identificación del sitio/proyecto.**

Hacer clic en *OK* y regresar a la pantalla principal del programa.

### **3. Análisis de parámetros.**

Esta ventana permite al usuario hacer entrada de datos estimando los criterios de diseño escogidos por la institución encargada. Para este ejemplo en particular, las entradas de datos son las siguientes y se muestran a continuación en la Figura 6.10:

- iv. IRI inicial (pulg/mi): 126.7.
- v. Tipo de análisis: Probabilístico.
- vi. Criterios de Comportamiento
  - IRI Final (pulg/mi): 300.
  - Confiabilidad (% , para criterio de IRI): 90.
  - Grietas transversales (% de losas agrietadas): 10.
  - Confiabilidad (% , para grietas transversales): 90.
  - Promedio de fallas en juntas (pulg): 0.15.
  - Confiabilidad (% , para fallas): 90.

Criteria	Limit	Reliability
<input checked="" type="checkbox"/> Terminal IRI (in/mi)	300	90
<input checked="" type="checkbox"/> Transverse Cracking (% slabs cracked)	10	90
<input checked="" type="checkbox"/> Mean Joint Faulting (in)	0.15	90
<input type="checkbox"/> CRCP Punchouts (per mi)		

**Figura 6.10. Pantalla de análisis de parámetros para JPCP.**

Hacer clic en *OK* y regresar a la pantalla principal del programa. Note que los iconos de las entradas de datos generales ahora todos son verdes. Se aconseja que sean salvados los archivos de la entrada de datos haciendo clic

en el icono del disco flexible (*diskette*) en la barra de herramientas ó hacer clic en *salvar (save)* en el menú.

### **6.4.10.3 ENTRADA DE DATOS DE TRÁFICO.**

#### **1. Tráfico.**

En esta ventana se permite al usuario hacer las entradas de los volúmenes de tráfico y también de proporcionar un enlace a otras ventanas del tráfico como ajuste de volúmenes, factores de distribución de carga por eje y entrada de datos generales. Note que estas ventanas también pueden ser accedidas desde la ventana principal del programa de diseño. La entrada de datos son los siguientes y se muestran en la Figura 6.11:

- vi. Tráfico promedio diario anual de doble sentido: 9886.
- vii. Número de carriles en la dirección de diseño: 2.
- viii. Porcentaje de vehículos en la dirección de diseño: 50.
- ix. Porcentaje de vehículos en el carril de diseño: 80.
- x. Velocidad operacional del vehículo (mph): 55.9.

Nótese que la vida de diseño escogida y la fecha de apertura al tráfico aparecen en esta pantalla. Nótese también los enlaces de las ventanas de *ajuste de volúmenes de tráfico (traffic volume adjustment)*, *distribución de carga por eje (axle load distribution)* y *entradas de datos de tráfico generales (general traffic inputs)*. Hay tres categorías principales de entrada de datos requeridas para el diseño y los enlaces individuales de estas ventanas están también disponibles en la ventana principal del programa.



**Traffic**

Design Life (years): 25

Opening Date: December, 2005

Initial two-way AADTT: 9886

Number of lanes in design direction: 2

Percent of trucks in design direction (%): 50.0

Percent of trucks in design lane (%): 80.0

Operational speed (mph): 55.9

Traffic Volume Adjustment: Edit

Axle load distribution factor: Edit

General Traffic Inputs: Edit

Traffic Growth: Compound, 4.5%

OK Cancel

**Figura 6.11. Pantalla de tráfico.**

Hacer clic en *OK* y regresar a la pantalla principal del programa.

## **2. Factores de ajuste de volúmenes de tráfico.**

La ventana de los factores de ajuste de volúmenes de tráfico (*traffic volume adjustment factors*), tiene 4 pestañas (ó sub-ventanas), denominadas:

- Ajuste mensual (*monthly adjustment*).
- Distribución de la clase vehicular (*vehicle class distribution*).
- Distribución horaria (*hourly distribution*).
- Factores de crecimiento de tráfico (*traffic growth factors*).

### **2.1 Ajuste mensual.**

La entrada de datos en esta ventana, indica la distribución del tráfico a través de los diferentes meses del año para cada clase vehicular. El factor de

ajuste mensual (MAF) es la proporción del TPDA que ocurre a través de un período de 24 horas en cada mes para cada clase vehicular.

Para este ejemplo, debido a que la publicación de distribución de tráfico es la misma hasta el final del año, el tráfico no cambia entre los diferentes meses del año, puede ser usado el factor de ajuste mensual por defecto.

Hacer clic en el botón de círculo de la opción de nivel 3 para la entrada de datos por defecto mostrada en la Figura 6.12. Nótese que el valor por defecto para el MAF es de 1.0 para todos los meses en cada clase vehicular.

**Traffic Volume Adjustment Factors**

Monthly Adjustment
  Vehicle Class Distribution
  Hourly Distribution
  Traffic Growth Factors

Load Monthly Adjustment Factors (MAF)

Level 1: Site Specific - MAF
  Level 3: Default MAF

Monthly Adjustment Factors

	Month	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7	Class 8	
	January	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	February	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	March	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	April	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	May	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	June	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	July	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	August	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	September	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	October	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	November	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1
	December	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1

**Figura 6.12. Pantalla de los factores de ajuste mensual.**

Hacer clic en *OK* y regresar a la pantalla principal del programa.

## 2.2 Distribución de la clase vehicular.

Los datos de la distribución de la clase vehicular del sitio específico no se utilizan para el diseño de este proyecto. Seleccionar la categoría del pavimento como *Principal/Arterials-Interstate and Defense* como se muestra en la Figura 6.13.

**Load Default AADTT**

Select general category: Principal Arterials - Interstate and Defense

\* = recommended value

AADTT distribution for the selected General Category:

	*	TTC	Bus %	Multi-Trailer %	Single-trailer and Single-unit(SU) Trucks	Vehicle Class	Percent(%)
<input type="checkbox"/>	*	5	(<2%)	(>10%)	Predominately Single-trailer trucks.	Class 4	1.3
<input type="checkbox"/>	*	8	(<2%)	(>10%)	"High percentage of single-trailer truck with some single-unit trucks.	Class 5	8.5
<input type="checkbox"/>	*	11	(<2%)	(>10%)	Mixed truck traffic with a higher percentage of single-trailer trucks.	Class 6	2.8
<input type="checkbox"/>	*	13	(<2%)	(>10%)	Mixed truck traffic with about equal percentages of single-trailer trucks and single-unit trucks.	Class 7	0.3
<input type="checkbox"/>	*	16	(<2%)	(>10%)	Predominantly single-unit trucks.	Class 8	7.6
<input type="checkbox"/>	*	3	(<2%)	(2 - 10%)	Predominantly single-trailer trucks	Class 9	74
<input type="checkbox"/>		7	(<2%)	(2 - 10%)	Mixed truck traffic with a higher percentage of single-trailer trucks.	Class 10	1.2
<input type="checkbox"/>		10	(<2%)	(2 - 10%)	Mixed truck traffic with about equal percentages of single-trailer trucks and single-unit trucks.	Class 11	3.4
<input type="checkbox"/>		15	(<2%)	(2 - 10%)	Predominantly single-unit trucks.	Class 12	0.6
<input checked="" type="checkbox"/>	*	1	(>2%)	(<2%)	Predominantly single-trailer trucks	Class 13	0.3
<input type="checkbox"/>	*	2	(>2%)	(<2%)	"Predominantly single-trailer trucks with a low percentage of single-unit trucks.		
<input type="checkbox"/>	*	4	(>2%)	(<2%)	Predominantly single-trailer trucks with a low to moderate percentage of single-unit trucks.		
<input type="checkbox"/>		6	(>2%)	(<2%)	Mixed truck traffic with a higher percentage of single-unit trucks.		
<input type="checkbox"/>		9	(>2%)	(<2%)	Mixed truck traffic with about equal percentages of single-trailer trucks and single-unit trucks.		
<input type="checkbox"/>		12	(>2%)	(<2%)	Mixed truck traffic with a higher percentage of single-unit trucks.		
<input type="checkbox"/>		14	(>2%)	(<2%)	Predominantly single-unit trucks		
<input type="checkbox"/>		17	(>25%)	(<2%)	Mixed truck traffic with about equal single-unit and single-trailer trucks.		

OK  Cancel











**Figura 6.13. Pantalla de cargas por defecto para TPDA.**

Hacer clic en *OK* y regresar a la ventana de la *distribución de la clase vehicular (vehicle class distribution)*. Como se muestra en la Figura 6.14, la clase vehicular es vista en la pantalla. Lo siguiente es, hacer clic en la pestaña de la *distribución horaria (hourly distribution)*.

**Traffic Volume Adjustment Factors**

Monthly Adjustment
  Vehicle Class Distribution
  Hourly Distribution
  Traffic Growth Factors

AADTT distribution by vehicle class:

Class 4	72.5	
Class 5	22.8	
Class 6	0.0	
Class 7	0.0	
Class 8	0.0	
Class 9	4.7	
Class 10	0.0	
Class 11	0.0	
Class 12	0.0	
Class 13	0.0	
Total	100.0	

Note: AADTT distribution must total 100%.

Load Default Distribution:

Level 1: Site Specific Distribution  
 Level 2: Regional Distribution  
 Level 3: Default Distribution

**Figura 6.14. Pantalla de distribución de la composición vehicular.**

### 2.3 Distribución horaria.

Ingresar la distribución horaria del TPDA como es mostrado en la Figura 6.15. Lo siguiente es hacer clic en la pestaña de *factores de crecimiento de tráfico (Traffic Growth Factors)*.

**Traffic Volume Adjustment Factors**

Monthly Adjustment
  Vehicle Class Distribution
  Hourly Distribution
  Traffic Growth Factors

Hourly truck traffic distribution by period beginning:

Midnight	0.6	Noon	5.6
1:00 am	0.4	1:00 pm	5.3
2:00 am	0.3	2:00 pm	5.5
3:00 am	0.5	3:00 pm	5.2
4:00 am	1.5	4:00 pm	5.6
5:00 am	4.8	5:00 pm	5.8
6:00 am	9.1	6:00 pm	5.7
7:00 am	7.6	7:00 pm	4.4
8:00 am	5.9	8:00 pm	3.6
9:00 am	5.4	9:00 pm	2.8
10:00 am	5.4	10:00 pm	2.2
11:00 am	5.6	11:00 pm	1.2

Note: The hourly distribution must total 100%

Total:

**Figura 6.15. Pantalla de distribución horaria.**

## 2.4 Factores de crecimiento de tráfico.

Los datos dados sugieren que el tráfico crece 4.5% con una tasa compuesta. El programa usará una función por defecto para el crecimiento de la tasa compuesta. Seleccionar *crecimiento compuesto (compound growth)* e ingresar la tasa del 4.5% como es mostrado en la Figura 6.16.

The screenshot shows a software dialog box titled "Traffic Volume Adjustment Factors". It has four tabs: "Monthly Adjustment", "Vehicle Class Distribution", "Hourly Distribution", and "Traffic Growth Factors", with the last one selected. The "Opening Date" is set to "December, 2005" and "Design Life (years)" is "25". There is a checkbox for "Vehicle-class specific traffic growth" which is unchecked. The "AADTT" is "9886", "% Traffic Design Direction" is "50", and "% Traffic Design Lane" is "80". Under "Default Growth Function", "Compound Growth" is selected with a radio button, and the "Default growth rate (%)" is "4.5". A "View Growth Plots" button with a green 'X' icon is at the bottom right. At the very bottom are "OK" and "Cancel" buttons.

**Figura 6.16. Pantalla de factores de crecimiento de tráfico.**

Lo siguiente es hacer clic en *ver la gráfica de crecimiento (view growth plots)* para abrir una hoja de Microsoft Excel el cual muestra el crecimiento del TPDA para cada clase vehicular en toda la vida de diseño (no aplicable en la versión demo).

Cerrar las hojas de Excel y hacer clic en *OK* sobre la ventana de *ajustes de volúmenes (volume adjustments)* para regresar a la ventana principal.

### **3. Factores de distribución de carga por eje (axle load distribution factors).**

Esta ventana permite al usuario especificar el porcentaje de vehículos en cada clase vehicular, para cada nivel de carga y para cada tipo de eje. Este ejemplo de diseño usa los valores de la distribución del LTPP por defecto y por lo tanto, se utilizará la entrada de datos del nivel 3 por defecto. Hacer clic en el botón de círculo para el nivel 3 de los factores de distribución de carga mostrados en la Figura 6.17. El programa automáticamente carga los valores por defecto para esta entrada de datos. Hacer *OK* para regresar a la ventana principal.

Nótese que el programa también permite exportar un archivo salvado previamente si el usuario así lo escoge.

	Season	Veh. Class	Total	3000	4000	5000	6000	700
	January	4	100.00	1.8	0.96	2.91	3.99	6.8
	January	5	100.00	10.05	13.21	16.42	10.61	9.22
	January	6	100.00	2.47	1.78	3.45	3.95	6.7
	January	7	100.00	2.14	0.55	2.42	2.7	3.21
	January	8	100.00	11.65	5.37	7.84	6.99	7.99
	January	9	100.00	1.74	1.37	2.84	3.53	4.93
	January	10	100.00	3.64	1.24	2.36	3.38	5.18
	January	11	100.00	3.55	2.91	5.19	5.27	6.32
	January	12	100.00	6.68	2.29	4.87	5.86	5.97
	January	13	100.00	8.88	2.67	3.81	5.23	6.03
			---	---	---	---	---	---

**Figura 6.17. Pantalla de factores de distribución carga por eje.**

### **4. Entrada de datos generales (general traffic inputs).**

Esta ventana permite al usuario proporcionar las entradas de tráfico para el desvío de la rodadura y tiene 3 pestañas de propiedades, denominados:

- Número de ejes/vehículo (number of axles/truck).
- Configuración del eje (axle configuration).
- Distancia entre ejes (wheelbase).

La entrada de datos para las siguientes consideraciones del desvío lateral del tráfico son mostrados en la Figura 6.18.

- iv. Localización promedio de la llanta: 18 pulg.
- v. Desviación estándar de la rodadura: 10
- vi. Ancho de carril de diseño: 12 pies.

#### 4.1 Número de ejes/vehículo.

La entrada del número de ejes por vehículo es mostrado en la Figura 6.18.

	Single	Tandem	Tridem	Quad
Class 4	1.62	0.39	0	0
Class 5	2	0	0	0
Class 6	1.02	0.99	0	0
Class 7	1	0.26	0.83	0
Class 8	2.38	0.67	0	0
Class 9	1.13	1.93	0	0
Class 10	1.19	1.09	0.89	0
Class 11	4.29	0.26	0.06	0
Class 12	3.52	1.14	0.06	0
Class 13	2.15	2.13	0.35	0

Figura 6.18. Entrada general de datos de tráfico – pantalla de número de eje/vehículo.

#### 4.2 Configuración de ejes.

Las siguientes entradas de la configuración de ejes son mostradas en la Figura 6.19:

5. Ancho promedio de ejes: 8.5 pies.
6. Espaciamiento de llantas duales: 12 pulg.
7. Presión de llantas:
  - Llanta simple: 120 psi.
  - Llanta doble: 120 psi.
8. Espaciamiento de ejes:
  - Eje tandem: 51.6 pulg.
  - Eje tridem: 49.2 pulg.
  - Eje cuádruple: 49.2 pulg.

**Figura 6.19. Entrada general de datos de tráfico – pantalla de configuración de eje.**

#### 4.3 Distancia entre ejes.

Las siguientes entradas de la distancia entre ejes (*wheelbase*) son mostradas en la Figura 6.20:



## 3. Espaciamiento promedio del eje:

Corto: 12 pies.

Mediano: 15 pies.

Largo: 18 pies.

## 4. Porcentaje de vehículos:

Corto: 2.0%

Mediano: 20.0%

Largo: 78.0%

Hacer clic en *OK* para regresar a la ventana principal del programa. El usuario, en esta etapa, ha hecho todas las entradas de datos del tráfico y está listo para continuar con las entradas de datos del Clima para el proyecto. Es recomendable salvar el archivo antes de proceder.

**General Traffic Inputs**

Lateral Traffic Wander

Mean wheel location (inches from the lane marking): 18

Traffic wander standard deviation (in): 10

Design lane width (ft): (Note: This is not slab width) 12

Number Axles/Truck  Axle Configuration  Wheelbase

Wheelbase distribution information for JPCP top-down cracking. The wheelbase refers to the spacing between the steering and the first device axle of the truck-tractors or heavy single units.

	Short	Medium	Long
Average Axle Spacing (ft)	12	15	18
Percent of trucks (%)	33.0	33.0	34.0

OK Cancel

**Figura 6.20.** Entrada general de datos de tráfico – pantalla de distancia entre ejes.

#### 6.4.10.4 ENTRADA DE DATOS DEL CLIMA.

##### 1 Clima.

El sitio del proyecto es en la región central del país. El usuario tiene que cargar los datos de clima para utilizarlo en este proyecto, así el software de la Guía de Diseño predecirá los gradientes de humedad y temperatura en el diseño de prueba.

Hacer clic en *Clima (climate)* en la ventana principal del programa. En la ventana principal del *clima*, como es mostrado en la Figura 6.21, hacer clic en *Generar (generate)* para generar un nuevo archivo de datos de clima. Lo siguiente es hacer clic en el botón de círculo correspondiente a *datos del clima para una estación de tiempo específica (climatic data for a specific weather station)*. Para este ejemplo se escogió Miami, FL (por no existir datos de nuestro país en la base de datos del programa de diseño) de la lista de los datos de las estaciones del tiempo como es mostrado en la Figura 6.22.

Environment/Climatic

Current climatic data file: C:\DGG2002\Projects\Mi clima.icm

Import previously generated climatic data file.

Generate new climatic data file.

Latitude (degrees.minutes): 23.49

Longitude (degrees.minutes): 80.18

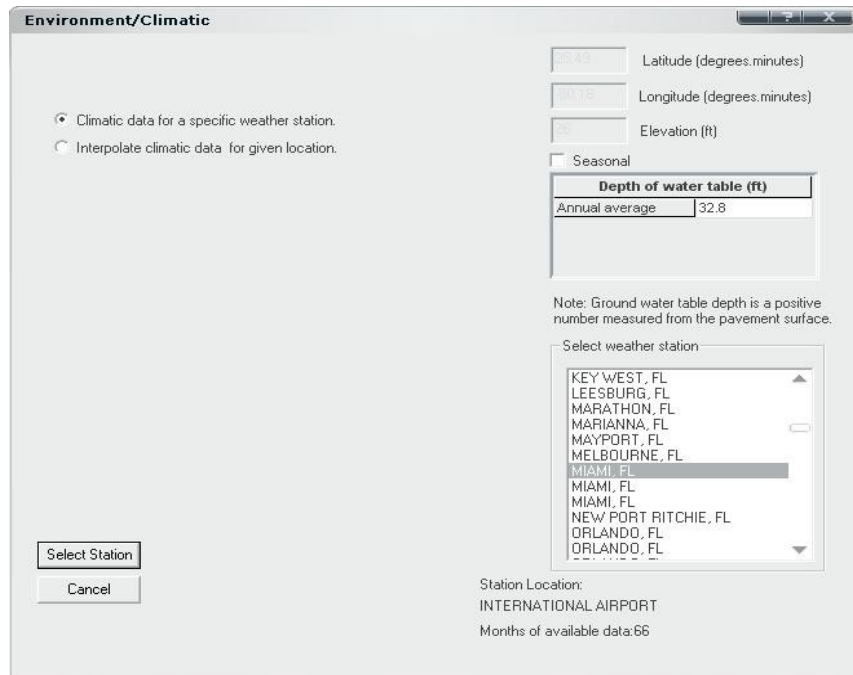
Elevation (ft):

Seasonal

Depth of water table (ft)	
Annual average	32.8

Note: Ground water table depth is a positive number measured from the pavement surface.

Figura 6.21. Pantalla de clima.



**Figura 6.22. Generando el archivo de datos del clima para la localización del proyecto.**

El programa crea el archivo de los datos de clima para el proyecto. Después de que es creado este archivo, el programa da un aviso al usuario para salvarlo. Salvar el archivo en el directorio del proyecto “C:\DG2002\Projects\Ejemplo de JPCP\Mi clima.icm”.

Nótese también que el programa automáticamente crea un archivo llamado *climate.tmp* en el directorio donde se ha guardado el proyecto. Este es el archivo que el programa lee durante la etapa de análisis de la información horaria del clima. Este archivo contiene el tiempo de la salida del sol, tiempo de la puesta del sol y de la radiación para cada día del período de vida de diseño. Además, por cada período de 24 horas para cada día de la vida de diseño, la temperatura, precipitación, velocidad del aire, rayos del sol y la profundidad del nivel freático, son guardados en el archivo de clima.

Para esta etapa, el usuario tiene completo la entrada de datos del clima requeridos por el programa. El icono de codificación del color tendrá un color verde para el tráfico y el clima, y tendrá un color rojo para la estructura, indicando que la entrada de datos del tráfico y el clima están completos y que la entrada de datos de la estructura todavía no es colocada.

#### **6.4.10.5 ENTRADA DE DATOS ESTRUCTURAL.**

En esta etapa el usuario necesita escoger los parámetros estructurales y la combinación de capas que pueden ser evaluadas para su comportamiento estructural. Como una explicación, el proceso es un proceso iterativo en el cual el usuario tendrá que desarrollar un diseño de prueba y hacer varias modificaciones para hacerlo, antes de alcanzar un diseño factible y económico (ó final).

Escoger las siguientes capas en la prueba de diseño para el ejemplo de JPCP:

1. Capa de JPCP de 7.5 pulg.
2. Capa de base de suelo cemento de 8.0 pulg.
3. Capa de subrasante compactada semi-infinita.

En la prueba de diseño la losa de JPCP tendrá un espaciamiento entre juntas de 12 pies y 1.0 pulg de diámetro para las dovelas a través de las juntas transversales espaciado a 12 pulg. Las juntas tendrán un sellante de silicón. Los hombros tendrán transferencia de carga de un 40% y serán provistos de drenes en los bordes. El ancho de la losa será de 12 pies.

La entrada de datos estructural es de tres categorías: *características de diseño de JPCP (JPCP design features)*, *propiedades de superficie y drenaje (drainage and surface properties)*, y *propiedades de las capas (layer properties)*.

Estas tres categorías de entrada de datos tienen vínculo directo a la pantalla principal del programa y no especifica un orden requerido para hacer la introducción de datos.

### **1. Características de diseño.**

Hacer clic en el vínculo de las *características de diseño (design features)* en la ventana principal y el programa abrirá una ventana para disponer de la entrada de datos de las características de diseño del JPCP. Las entradas de datos a realizar en esta ventana son mostradas en la Figura 6.23.

El espesor de losa puede ser editado en la ventana de capas discutido en el apartado 5.3.1. Introducir un valor de  $-10^{\circ}\text{F}$  para la *diferencia de temperatura efectiva de curvatura/alabeo permanente (permanent curl/warp effective temperature difference)*. Introducir un *espaciamiento de junta (joint spacing)* de 12 pies y seleccionar de menú desplegable el *tipo de sellante (sealant type)* como silicón.

Lo siguiente es hacer clic en el botón de círculo correspondiente a la interfase de *no ligado (Unbonded)* entre la losa y la capa de la base. Debido a que se la opción de la una capa de base es una capa de base de grava triturada, escoger un *índice de erosionabilidad (erodibility index)* de 3 que representa una *capa de base resistente a la erosión (erosion resistant base layer)*.

**JPCP Design Features**

Slab thickness (in): 7.5 Permanent curl/warp effective temperature difference (°F): -10

**Joint Design**

Joint spacing (ft): 12 Sealant type: Silicone

Random joint spacing(ft):

Doweled transverse joints Dowel diameter (in): 1 Dowel bar spacing (in): 12

**Edge Support**

Tied PCC shoulder Long-term LTE(%): 40

Widened slab Slab width(ft): 12

**Base Properties**

Base type: Lime treated

PCC-Base Interface:  Bonded  Unbonded

Erodibility index: Erosion Resistant (3)

Loss of bond age (months):

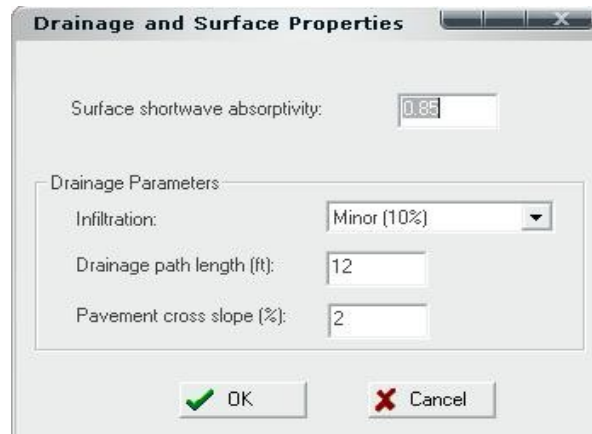
OK Cancel

**Figura 6.23. Pantalla de características de diseño de JPCP.**

Nótese que en la ventana de las *características de diseño de JPCP* mostrada en la Figura 6.23, hay entradas de datos hechas con estimaciones de *soporte lateral (edge support)* para este ejemplo de diseño. Finalmente, hacer clic en *OK* y regresar a la ventana principal del programa.

## **2. Propiedades de la superficie y drenaje.**

De la ventana principal del programa hacer clic en *propiedades de la superficie y drenaje (drainage and surface properties)* y se abrirá la ventana para la introducción de datos mostrada en la Figura 6.24.



**Figura 6.24. Pantalla de las propiedades de la superficie y drenaje.**

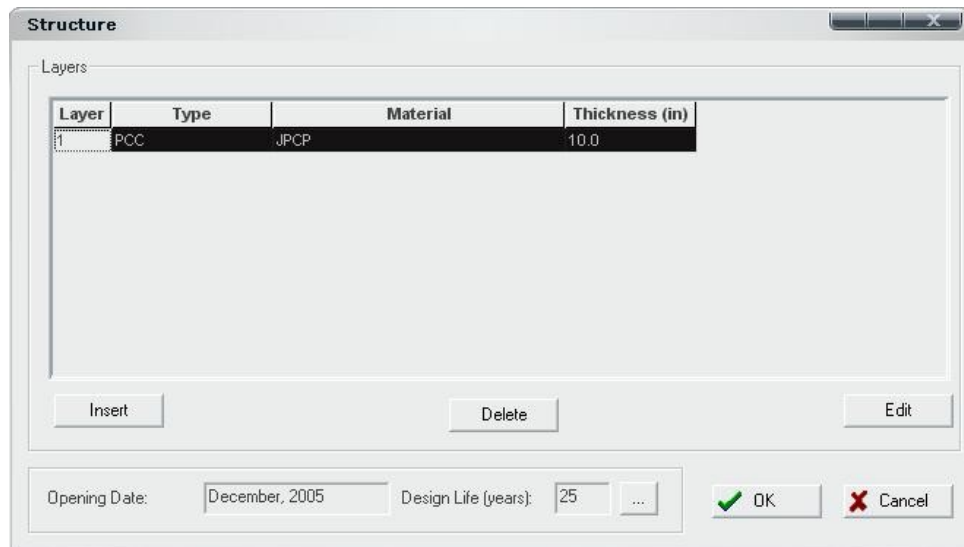
Introducir 0.85 para la *absorbencia de la superficie de onda corta (surface shortwave absorptivity)*. Para el hombro con dren lateral, la infiltración recomendada es de 10% correspondiente a un nivel *menor (minor)* de infiltración. Introducir 12 pies para la *longitud de la trayectoria del drenaje (drainage path length)* y 2 por ciento para la *sección transversal del pavimento (pavement cross slope)*. Hacer clic en *OK* y regresar a la ventana principal.

### **3. Capas.**

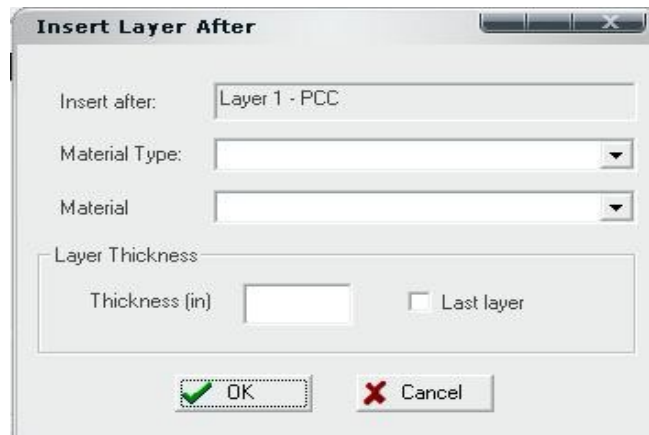
En la ventana principal del programa, hacer clic en *capas (layers)* para agregar y editar las capas del pavimento en la prueba de diseño. El programa abre la ventana de capas como es mostrado en la Figura 6.25. Las tres funciones principales de esta ventana, permite al usuario realizarse lo siguiente:

- Insertar una capa después de haber seleccionado una capa haciendo clic en el botón *insertar (insert)*.
- Borrar una capa seleccionada haciendo clic en el botón *borrar (delete)*.
- Editar las propiedades de la capa de una capa seleccionada haciendo clic en el botón *editar (edit)*.

La primera capa de pavimento, la capa de concreto hidráulico es mostrada en la Figura 6.25. Luego, el usuario tiene que agregar una capa (por debajo) de la capa de concreto hidráulico. Para agregar una capa después de la capa de concreto hidráulico, seleccionar la capa 1 haciendo clic en la fila de la capa 1 y luego insertar una capa haciendo clic en el botón *insertar (insert)*. El programa abre ahora una ventana que se muestra en la Figura 6.26a que permite al usuario seleccionar la capa a ser agregada que es mostrada en la Figura 6.26b.



**Figura 6.25. Pantalla de las capas de la estructura.**



**Figura 6.26a. Pantalla inicial para insertar una capa.**



**Insert Layer After**

Insert after: Layer 1 - PCC

Material Type: Stabilized Base

Material: Soil Cement

Layer Thickness

Thickness (in) 4  Last layer

OK Cancel

**Figura 6.26b. Entrada de datos para insertar la capa de grava triturada.**

Del menú desplegable, seleccionar *base granular (granular base)* para el *tipo de material (material type)* y *grava triturada (crushed gravel)* para el *material*. Introducir el valor de 4 para el espesor y hacer clic en *OK* para regresar a la ventana de *capas (layers)* mostrada en la Figura 6.27. Esa ventana ahora muestra la nueva capa agregada de grava triturada.

**Structure**

Layers

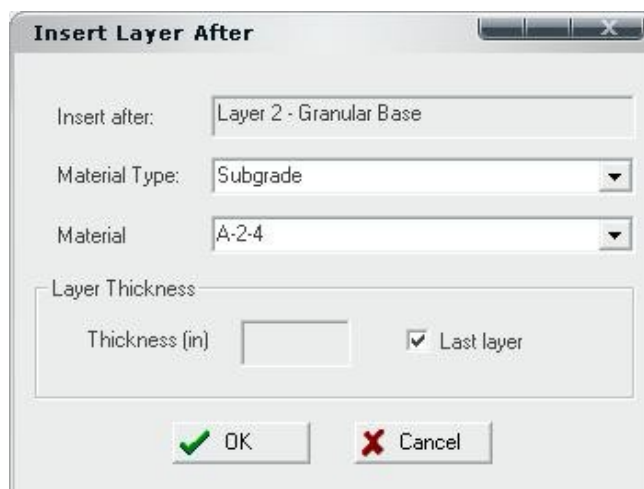
Layer	Type	Material	Thickness (in)
1	PCC	JPCP	7.5
2	Chemically Stabilized	Soil Cement	8.0

Insert Delete Edit

Opening Date: December, 2005 Design Life (years): 25 ... OK Cancel

**Figura 6.27. Pantalla de capas después de insertar la capa de grava triturada.**

Luego, el usuario necesita insertar la capa de subrasante, el cual es la capa final de la estructura de pavimento. Ver Figura 6.28.

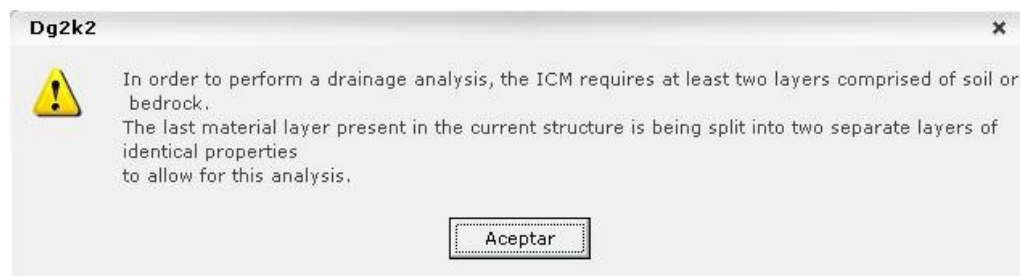


**Figura 6.28. Insertando la subrasante compactada después de la base granular.**

Nota:

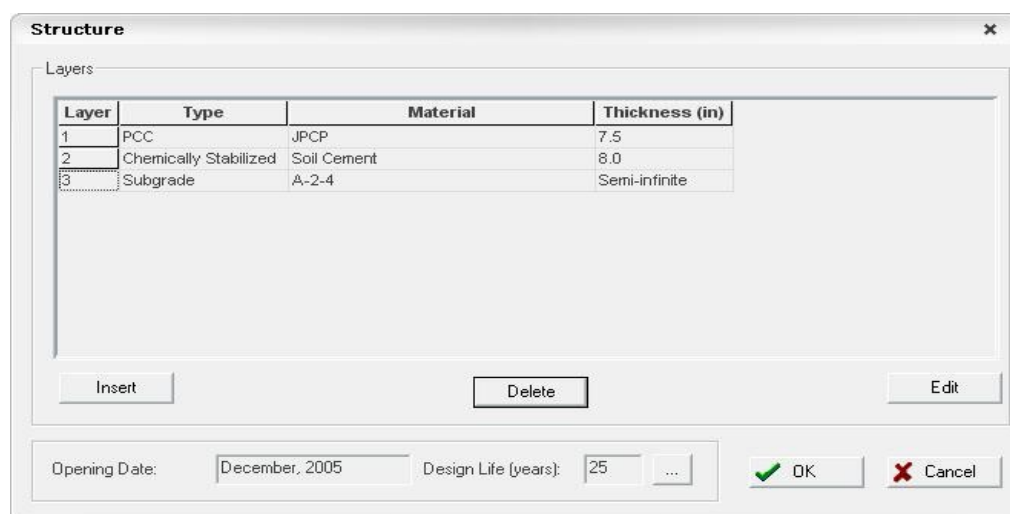
Es recomendado que en la ausencia de capa de base granular, la capa de subrasante es introducida como dos capas para representar la subrasante semi-infinita y una capa arriba de la anterior con material de subrasante compactada. Nótese que si el usuario falla en introducir dos distintas capas y solamente escoge una capa de subrasante, el programa automáticamente avisará al usuario como se muestra en la Figura 6.29 (“En el orden para el comportamiento del análisis de drenaje, la ICM requiere al menos dos capas ya sea de suelo ó lecho de roca. La capa del último material presente en la estructura real, esta siendo dividida en dos capas separadas de propiedades idénticas para permitir dicho análisis.”), añadir una segunda capa justo en el momento el cual se hace la corrida del programa para que el modelo de predicción del drenaje funcione adecuadamente. El programa colocará una capa con un espesor de 12 pulgadas, el cual puede ser cambiada por el usuario deteniendo la corrida y luego hacer el cambio necesario de espesor en

la ventana de *capas (layers)* si es deseado. Para este diseño, la nueva capa de subrasante se le colocó el valor de 10 pulg.



**Figura 6.29. Advertencia por la ausencia de una base granular.**

Repetir los mismos pasos otra vez y agregar la última capa. Seleccionar la capa 2 y hacer clic en *insertar*. Como es mostrado en la Figura 6.28, seleccionar *subrasante (subgrade)* para *material*, y basado en el sistema de clasificación del suelo según AASHTO (ver tabla 2.3 del capítulo 2), seleccionar A-2-4 para el *tipo de material*. Seleccionar la opción *última capa (last layer)* en vez de introducir el espesor de esta capa. Hacer clic en *OK* y regresar a la ventana de *capas* que ahora tiene tres capas agregadas a la estructura como es mostrado en la Figura 6.30.



**Figura 6.30. Pantalla de capas después de la adición de todas las capas.**

La ventana individual para la entrada de datos de las propiedades de los materiales de las capas puede ser accedida desde la ventana de *capas* mostrada en la Figura 6.30 ó directamente de la ventana principal del programa. Para acceder a ventana de las propiedades de los materiales de la ventana de *capas*, seleccionar la capa de pavimento deseada y hacer clic en *editar (edit)*. Regresar a la ventana principal del programa haciendo clic en *OK* en la ventana de *capas*.

### **3.1 Capa 1, JPCP.**

Hacer clic en la *capa 1 – JPCP* para editar las propiedades de los materiales de la capa de concreto hidráulico. Esta abre una ventana con tres pestañas de propiedades para las propiedades *térmicas (thermal)*, *mezcla (mix)* y *resistencia (strength)*. En la ventana de las propiedades térmicas, como es mostrado en la Figura 6.31, introducir las siguientes entradas de datos:

- i. Espesor de capa (*layer thickness*): 8.4 pulg.
- ii. Peso unitario (*unit weight*): 149.8 lb/pie<sup>3</sup>.
- iii. Relación de Poisson (*Poisson's ratio*): 0.15.
- iv. Coeficiente de expansión térmica (*coefficient of thermal expansion*): 4.8 in/in/°F.
- v. Conductividad térmica (*thermal conductivity*): 1.25 BTU/h-pie-°F.
- vi. Capacidad calorífica (*heat capacity*): 0.28 BTU/lb-°F.

**PCC Material Properties - Layer #1**

Thermal  
  Mix  
  Strength

General Properties:

PCC material: JPCP

Layer thickness (in): 7.5

Unit weight (pcf): 149.8

Poisson's ratio: 0.15

Thermal Properties:

Coefficient of thermal expansion (per F° x 10-6): 4.8

Thermal conductivity (BTU/hr-ft-F°): 1.25

Heat capacity (BTU/lb-F°): 0.28

OK Cancel

**Figura 6.31. Propiedades de los materiales de concreto rígido – pantalla de propiedades térmicas.**

Luego, hacer clic en la pestaña de *mezcla (mix)* para seguir en la ventana de las entradas de datos específicas requeridas para la mezcla. Como es mostrado en la Figura 6.32, las siguientes entradas para la *mezcla* son:

- i. Tipo de cemento (*cement type*): Tipo 1 (de menú desplegable).
- ii. Contenido de cemento (*cement content*): 505.7 lb/yd<sup>3</sup>.
- iii. Relación agua-cemento (*water cement ratio*): 0.4.
- iv. Tipo de agregado (*agregate type*): Basalto (de menú desplegable).
- v. Contracción última (*ultimate shrinkage*): Dejar la caja sin cheque para que el programa calcule internamente el valor.
- vi. Contracción reversible (*reversible shrinkage*): 50%.
- vii. Tiempo para desarrollar el 50% de la contracción última (*time to develop 50% of ultimate shrinkage*): 35 días.
- viii. Método de curado (*curing method*): Curado compuesto (de menú desplegable).

**PCC Material Properties - Layer #1**

Thermal  
  Mix  
  Strength

Cement type: Type I

Cementitious material content (lb/yd<sup>3</sup>): 505.7

Water/cement ratio: 0.4

Aggregate type: Basalt

PCC zero-stress temperature (F°): 73.4

Ultimate shrinkage at 40% R.H (microstrain): 527

Reversible shrinkage (% of ultimate shrinkage): 50

Time to develop 50% of ultimate shrinkage (days): 35

Curing method: Curing compound

**Figura 6.32. Propiedades de los materiales de concreto rígido – pantalla de propiedades de la mezcla.**

Luego, hacer clic en la pestaña de *resistencia (strength)* para seguir en la ventana de las entradas de datos específicas requeridas para las propiedades de resistencia del concreto hidráulico. Esta ventana es mostrada en la Figura 6.32. Hacer clic en el botón de círculo correspondiente al nivel 3. La ventana proporciona un formato para introducir el módulo de ruptura, la resistencia a la compresión ó el módulo elástico a los 28 días. Introducir el valor de módulo de ruptura de 640 psi y el software calculará el módulo elástico automáticamente como son mostrados en la Figura 6.33.

**PCC Material Properties - Layer #1**

Thermal
  Mix
  Strength

Input Level:

Level 1  
 Level 2  
 Level 3

28-day PCC modulus of rupture (psi): 640  
 28-day PCC compressive strength (psi):  
 28-day PCC elastic modulus (psi): 4076036

OK
  Cancel

**Figura 6.33. Propiedades de los materiales de concreto rígido – pantalla de propiedades de resistencia.**

Nótese que el valor de resistencia a la compresión no es requerido en la entrada de datos para el diseño de JPCP del nivel 3 una vez colocado el valor del módulo de ruptura. Hacer clic en *OK* y regresar a la pantalla principal del programa. Nótese que el botón de la capa 1 ahora es verde.

### **3.2 Capa 2, suelo cemento.**

Hacer clic en la capa 2 en la ventana del principal del programa. El tipo de material escogido y espesor aparece en la ventana (nótese que esta información puede ser modificada en esta ventana). Introducir las siguientes entradas de datos como son mostradas en la Figura 6.34.

**Chemically Stabilized Material - Layer #2**

General Properties

Material type: Soil Cement

Layer thickness (in): 8

Unit weight (pcf): 100

Poisson's ratio: 0.28

Strength Properties

Elastic/resilient modulus (psi): 600000

Minimum elastic/resilient modulus (psi): n/a

Modulus of rupture (psi): n/a

Thermal Properties

Thermal conductivity (BTU/hr-ft-F°): 1.25

Heat capacity (BTU/lb-F°): 0.28

OK Cancel

**Figura 6.34. Propiedades del suelo cemento.**

- vi. Peso unitario (*unit weight*): 100 lb/pie<sup>3</sup>.
- vii. Relación de Poisson (*Poisson's ratio*): 0.28.
- viii. Módulo resiliente (*resilient modulus*): 600000 psi.
- ix. Conductividad térmica (*thermal conductivity*): 1.25.
- x. Capacidad calorífica (*heat capacity*): 0.28.

Hacer clic en *OK* y regresar a la ventana principal del programa. Nótese que el icono adyacente a la *capa 2 – suelo cemento*, ahora es verde.

### **3.3 Capa 3, A-2-4 (arena limosa).**

La tercera capa en este diseño de prueba es una subrasante compactada clasificada como un A-2-4 por el sistema de clasificación de AASHTO. Hacer clic en la *capa 3 – A-2-4* en la ventana principal del programa. La entrada de datos para materiales no ligados solo es disponible para la resistencia del material y la entrada de datos de las propiedades del ICM. Escoger el botón de círculo correspondiente al nivel 3 de la entrada de datos, el cual requiere solamente la entrada del módulo para la propiedad del material.



Ingresar los siguientes valores de entrada de datos en la pestaña de propiedades de *resistencia (strength properties)* como es mostrado en la Figura 6.35:

- iv. Relación de Poisson (*Poisson's ratio*): 0.25.
- v. Coeficiente de presión lateral (*coefficient of lateral pressure*): 0.50.
- vi. Módulo (*modulus*) (psi): 28000.

**Figura 6.35. Pantalla de capa no ligada para capa de base de grava triturada – propiedades de resistencia.**

Para el *tipo de análisis (analysis type)*, hacer clic en el botón de círculo adyacente a la entrada de datos de *ICM* para indicar que el usuario hará la entrada de datos del *ICM* en el programa. Hacer clic en la pestaña de *ICM* y luego en la ventana de las propiedades de *ICM*, ingresar las siguientes entradas como es mostrado en la Figura 6.36:

- ix. Índice de plasticidad (*plasticity index*), *PI*: 65.

- x. Pasa la malla #200 (*passing #200 sieve*), %:23.
- xi. Pasa la malla #4 (*passing #4 sieve*), %:70.
- xii. D60 (mm): 0.15.

Luego, hacer clic en el botón de círculo correspondiente a *material no ligado sin compactar/natural (uncompacted/natural unbound material*. Colocar el valor de 100 en el *peso unitario máximo seco (maximun dry unit weight)*, 2.5 en la *gravedad específica de los sólidos (specific gravity of solids)* y 28 en el *contenido gravimétrico óptimo de agua (optimun gravimetric water content)*. Hacer clic en *actualizar (update)* y observar los parámetros calculados del ICM. Después hacer clic en *OK* y regresar a la ventana principal del programa mostrada en la Figura 6.37. Nótese que en la Figura 6.37, los iconos adyacentes a todas las entradas de datos –*tráfico, clima y estructura*- son verdes, indicando que todas estas entradas están completas.

Unbound Layer - Layer #3

Unbound Material: A-2-4 Thickness(in):   Last layer

Strength Properties  ICM

Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI:

Passing #200 sieve [%]:

Passing #4 sieve [%]:

D60 (mm):

Compacted unbound material  
 Uncompacted/natural unbound material

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf):

Specific gravity of solids, G<sub>s</sub>:

Saturated hydraulic conductivity (ft/hr):

Optimum gravimetric water content [%]:

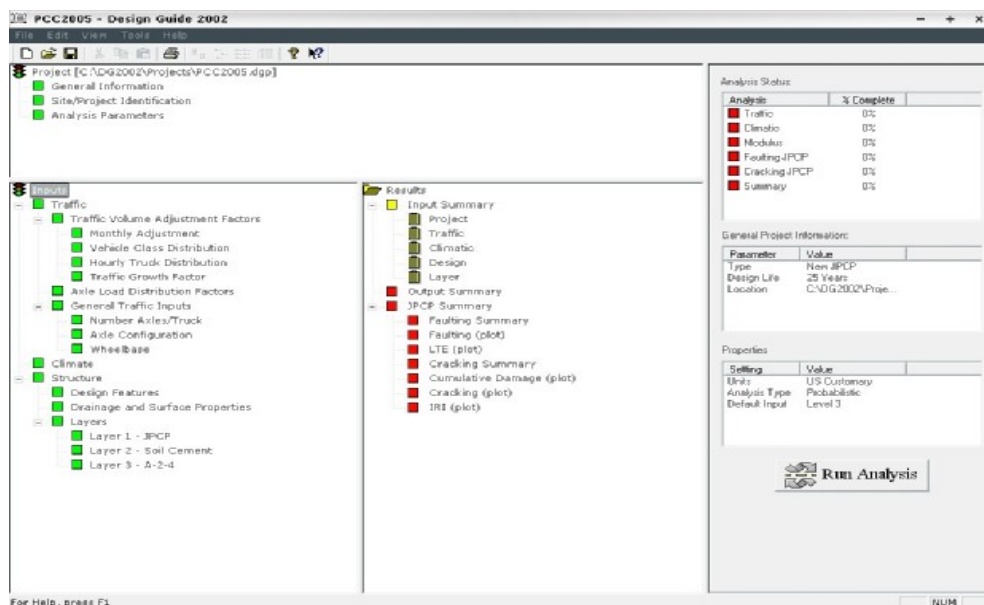
Calculated degree of saturation [%]:

Soil water characteristic curve parameters

Parameter	Value
af	16.5
bf	1.44
cf	0.56
hr	550

OK  Cancel

**Figura 6.36. Pantalla de capa no ligada para capa de base de grava triturada – propiedades de ICM.**



**Figura 6.37. Pantalla principal del programa después de completar toda la entrada de datos.**

#### 6.4.10.6 CORRIDA DEL ANÁLISIS.

Después de que todas las entradas de datos son proporcionadas, el software de la Guía de Diseño tiene que comenzar el proceso de análisis para predecir el comportamiento del diseño de prueba a través de la vida de diseño del pavimento. Hacer clic en *corrida del análisis (run analysis)*.

El programa hará funcionar el tráfico, clima, módulos, fallas en JPCP, módulos de grietas en JPCP, y reportando el estado del análisis en la esquina superior derecha de la ventana principal del programa.

Al final del análisis, el programa crea un archivo resumen y un archivo de salida de datos en el directorio donde está guardado el proyecto, C:\DG2002\Projects\PCC2005. El archivo resumen está en formato Microsoft Excel con nombre de "PCC2005.xls". El resumen contiene una hoja resumen de la entrada de datos, deterioros, fallas, grietas en un formato de tabla y la

predicción de fallas, LTE, energía diferencial, daño acumulado, grietas e IRI son presentadas en formato gráfico (ver memoria de cálculo de pavimento rígido en el Anexo 3).

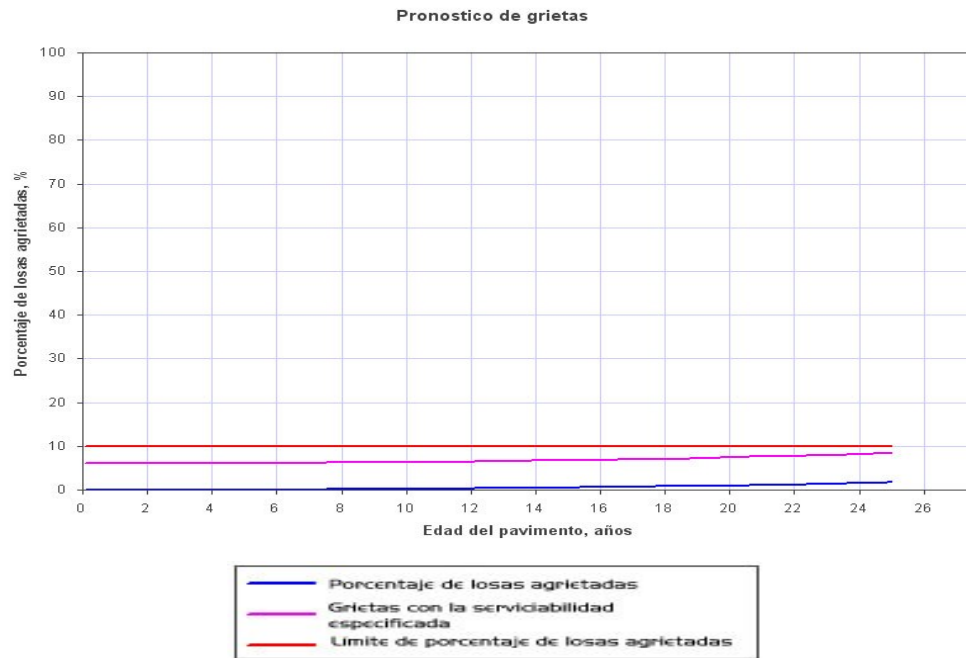
También presenta un resumen de confiabilidad donde muestra los criterios de comportamiento con su respectiva confiabilidad y permite verificar si se han cumplido o han fallado de acuerdo a la confiabilidad que se ha estimado en el diseño, como se muestra en la Figura 6.38. La hoja resumen de deterioro en el archivo de salida de datos proporciona un resumen global del diseño de JPCP para el proyecto que incluye propiedades críticas del material, tráfico y datos de deterioro. Los datos detallados para cada tipo de deterioro son proporcionados en hojas separadas. Las hojas resumen de deterioro indica que el pavimento ha soportado 64.37 millones de vehículos pesados a través del período de diseño y proporciona una idea global de las cargas de tráfico en el pavimento.

### **Project: PCC2005 Reliability Summary**

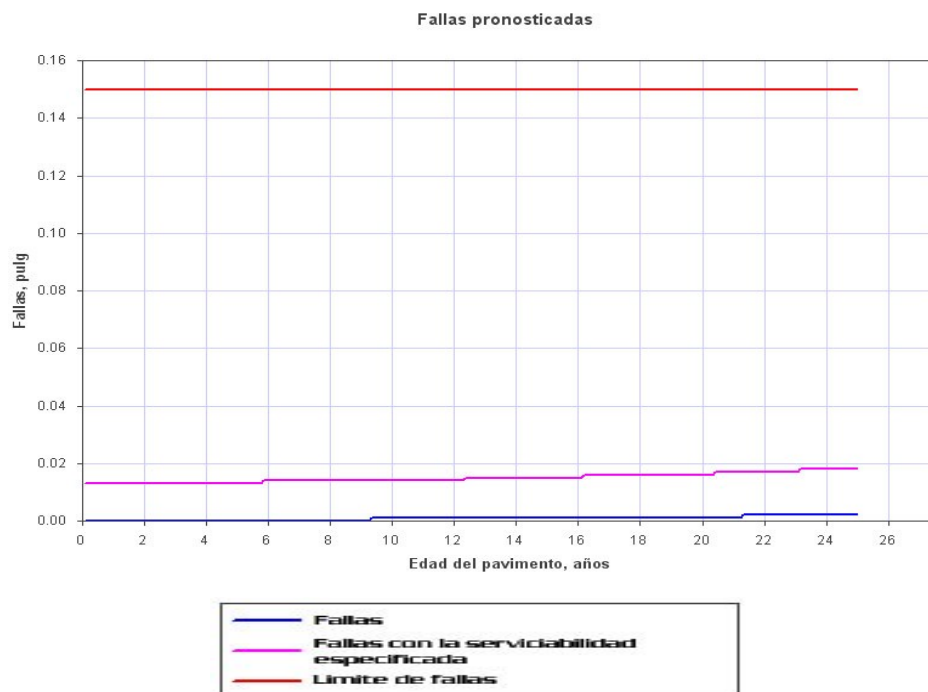
<b>Performance Criteria</b>	Distress	Reliability	Distress	Reliability	
	Target	Target	Predicted	Predicted Acceptable	
Terminal IRI (in/mi)	300	90	130.8	99.999	Pass
Transverse Cracking (% slabs cracked)	10	90	1.7	94.28	Pass
Mean Joint Faulting (in)	0.15	90	0.002	99.999	Pass

**Figura 6.39. Resumen de confiabilidad para toda la vida de diseño del pavimento.**

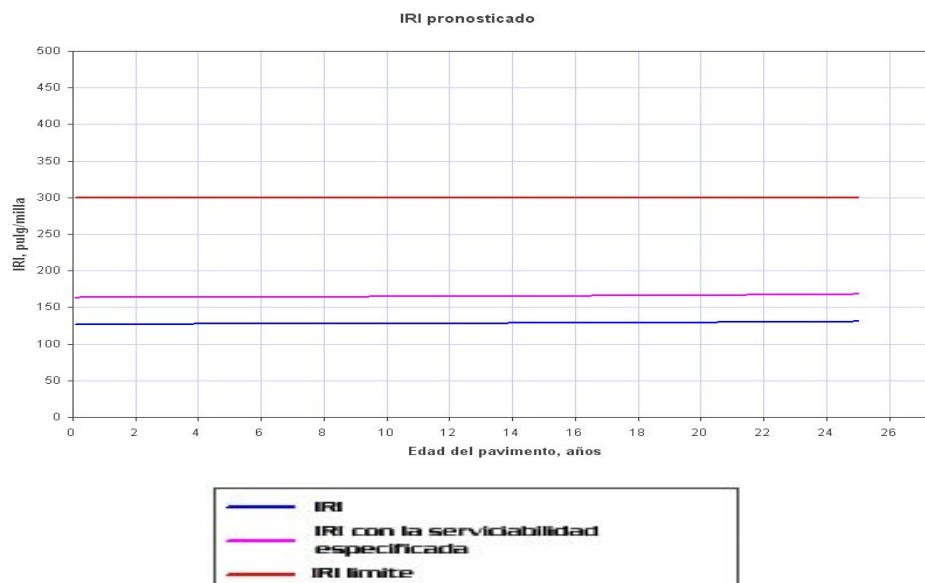
Para el diseño de prueba dado, la grieta transversal y las fallas a través de la vida del pavimento pronosticado por el software de la Guía de Diseño con un nivel de confiabilidad seleccionado, se muestran en la Figura 6.39 y en la Figura 6.40 respectivamente. El IRI pronosticado es mostrado en la Figura 6.41. De estas tres figuras, es claro verificar que el diseño de prueba satisface la rugosidad y el criterio transversal y también satisface los criterios de fallas especificados.



**Figura 6.39. Predicción de grietas transversales con una confiabilidad del 90% para la prueba de diseño.**



**Figura 6.40. Predicción de fallas con una confiabilidad del 90% para la prueba de diseño.**



**Figura 6.41. Predicción del IRI con una confiabilidad del 90% para la prueba de diseño.**

#### 6.4.10.7 MODIFICACIÓN DEL DISEÑO DE PRUEBA.

El usuario puede modificar el diseño de acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba de diseño.

El usuario puede hacer varias corridas de casos diferentes para seleccionar ó escoger el diseño óptimo ó factible haciendo ciertos cambios por ejemplo en las propiedades de los materiales si así lo deseara.

## **6.5 EJEMPLO DE DISEÑO DE UN JPCP UTILIZANDO EL MÉTODO DE DISEÑO AASHTO 1993.**

La mecánica es la ciencia del movimiento y de la acción de fuerzas en los cuerpos. Así, un acercamiento mecánico busca explicar los fenómenos por referencia a causas físicas. En el diseño de pavimentos, los fenómenos son las tensiones, los esfuerzos y las deflexiones dentro de una estructura de pavimento rígido, y las causas físicas son las cargas y las características de los materiales de la estructura de pavimento. La relación entre estos fenómenos y sus causas físicas es típicamente un modelo matemático. Pueden ser utilizados distintos modelos matemáticos; el más común es el modelo elástico de capas.

Para el diseño del pavimento rígido en esta sección, se hicieron uso de algunas de las entradas de datos necesarias del método AASHTO 2002 para utilizarlas con el software Darwin 3.01 del método de diseño AASHTO 1993.

A continuación se presenta la memoria del diseño de pavimento rígido calculado por el software de la Guía de Diseño AASHTO 1993.

Luego de la memoria de cálculo, se presenta un cuadro resumen donde se comparan los resultados de los espesores de capa de los dos métodos de diseño de pavimentos flexibles según AASHTO.

En las Figuras 6.42, 6.43 y 6.43 se muestran los resultados del diseño de un pavimento rígido utilizando el software Darwin 3.01.

1993 AASHTO Pavement Design  
**DARWin Pavement Design and Analysis System**

A Proprietary AASHTOWare  
**Computer Software Product**

ISCYC  
 Urb. Madreselva Av. El Espino y Blvd. Sur  
 Antiguo Cuscatlan, La Libertad  
 El Salvador

**Rigid Structural Design Module**

Ejemplo ilustrativo del diseño de un pavimento rígido nuevo de acuerdo al método de diseño AASHTO 1993, utilizando el programa DARWin 3.01

**Rigid Structural Design**

Pavement Type	JPCP
18-kip ESALs Over Initial Performance Period	172,813,881
Initial Serviceability	4.5
Terminal Serviceability	2.5
28-day Mean PCC Modulus of Rupture	640 psi
28-day Mean Elastic Modulus of Slab	3,850,000 psi
Mean Effective k-value	2,261 psi/in
Reliability Level	90 %
Overall Standard Deviation	0.35
Load Transfer Coefficient, J	2.5
Overall Drainage Coefficient, Cd	1.1
Calculated Design Thickness	10.71 in

**Effective Modulus of Subgrade Reaction**

Period	Description	Roadbed Soil Resilient Modulus (psi)	Base Elastic Modulus (psi)
I	Invierno/Verano	28,000	600,000
Base Type	Base de Suelo Cemento		
Base Thickness	8 in		
Depth to Bedrock	12 ft		
Projected Slab Thickness	12 in		
Loss of Support Category	0		
Effective Modulus of Subgrade Reaction		2,261 psi/in	

**Rigorous ESAL Calculation**

Performance Period (years)	25
Two-Way Traffic (ADT)	9,886
Number of Lanes in Design Direction	2
Percent of All Trucks in Design Lane	80 %
Percent Trucks in Design Direction	50 %

**Figura 6.42. Resultados del diseño de un pavimento rígido utilizando Darwin 3.01.**



Vehicle Class	Percent of ADT	Annual % Growth	Average Initial Truck Factor (ESALs/Truck)	Annual % Growth in Truck Factor	Accumulated 18-kip ESALs over Performance Period
4	72.5	4.5	2.6334	0	122,891,436
5	22.8	4.5	2.4823	0	36,429,725
9	4.7	4.5	4.46	0	13,492,720
Total	100	-	-	-	172,813,881

Growth Compound

Total Calculated Cumulative ESALs 172,813,881

### Tie Bar Steel Design

Steel Grade	40 ksi
Distance to Free Edge	11.9 ft
Slab Thickness	10.71 in
Friction Factor (F)	1.8
Percent of Yield Strength	75
Bar Diameter	0.5 in
	Calculated Results
Calculated Maximum Tie Bar Spacing	25.7 in
Recommended Maximum Tie Bar Spacing	25.7 in
Calculated Tie Bar Length	24.4 in
Calculated Area of Steel	0.092 sq in/ft

### Joint Reservoir and Sealant Design

PCC Coefficient of Thermal Contraction	4.8 (10 <sup>-6</sup> in/in)/F
Temperature Range from PCC Placement to Minimum Temp.	69.8 F
Drying Shrinkage Coefficient of PCC Slab	0.00045 in/in
Adjustment Factor for Friction B/T Slab and Subbase	0.8
Sealant Type	Silicone
Allowed Sealant Strain	0.5 in/in
Sealant Shape Factor	0.5
	Calculated Results*
Calculated Joint Opening	0.09 in
Calculated Recommended Minimum Joint Reservoir Width	0.17 in
Calculated Joint Sealant Depth	0.09 in

\*Note: This value is not represented by the inputs or an error occurred in calculation.

### Layer Information

Joint Spacing	12 ft
Dowel Material	steel
Dowel Diameter	1.27 in
Dowel Length	18 in
Dowel Space	12 in
Dowel Coating	ninguno

Figura 6.43. Resultados del diseño de un pavimento rígido utilizando Darwin 3.01.

Layer	Material Description	Thickness (in)	One Dir Width (ft)
1	JPCP	10.713751	12
2	Base de Suelo Cemento	6	12
3	Subrasante de tipo A-2-4	10	12
Total	-	26.71	-

**Figura 6.44. Resultados del diseño de un pavimento rígido utilizando Darwin 3.01.**

**Tabla 6.1 Tabla Comparativa de los métodos AASHTO 1993 y AASHTO 2002.**

<b>Capa</b>	<b>Material</b>	<b>AASHTO 1993</b>	<b>AASHTO 2002</b>
Rodadura	JPCP	10.71 pulg.	7.5 pulg.
Base	Suelo Cemento	6 pulg.	6 pulg.
Subrasante	A-2-4	10 pulg.	10 pulg.

Con esta comparación se puede afirmar que el método AASHTO 1993 es un método muy conservador y en cambio el método AASHTO 2002, es un método que optimiza todas las variables necesarias para el diseño de pavimentos rígidos.

# **CAPITULO 7**

# **CONCLUSIONES**

## **CONCLUSIONES.**

Algunos de los beneficios del método mecanicista-empírico de la Guía de Diseño AASHTO 2002 en el proceso de diseño son:

- Se pueden evaluar las estimaciones de las consecuencias de nuevas condiciones de cargas. Por ejemplo, los efectos de deterioro por el incremento de daños, altas presiones producidas por las llantas, ejes múltiples y otros factores pueden ser modelados utilizando procedimientos mecanicistas.
- Se puede considerar una mejor utilización de los materiales disponibles. Por ejemplo, el uso de materiales estabilizados en pavimentos rígidos y flexibles pueden simularse para pronosticar comportamientos futuros.
- Pueden ser desarrollados mejores procesos para la evaluación de deterioros prematuros y es posible analizar el por qué algunos pavimentos exceden sus diseños esperados. Con esto, pueden ser utilizadas mejores técnicas de diagnóstico.
- El envejecimiento puede ser incluido en estimaciones de comportamiento (el asfalto se endurece con el tiempo el cual genera grietas por fatiga y ahuellamiento).
- El método de diseño puede ser desarrollado para evaluar las ventajas a largo plazo para proporcionar un mejor drenaje en la carretera tanto en pavimentos asfálticos como rígidos.
- Otra característica de esta nueva guía es el uso de jerarquías. Estas se relacionan con el nivel de confiabilidad deseada por el diseñador ó por el tipo de carretera a ser diseñado. Si el nivel es alto, los datos requeridos tendrán que ser de mayor jerarquía. Esta nueva técnica es aplicada a los datos asociados con el tráfico y materiales.

- Se ha previsto que con el uso de modelos mecanicistas-empíricos se creen diseños tanto estructural como económicamente más efectivos. Además se espera mejorar la confianza del diseño, para que se reduzcan los costos a lo largo de la vida del pavimento.

De acuerdo a los resultados presentados con la comparación de los diseños AASHTO 1993 y 2002, se puede concluir lo siguiente:

- El método de diseño AASHTO 1993, es un método de diseño conservador debido a los resultados que presenta.
- La entrada de datos de AASHTO 1993, es muy limitada y solo se basa en datos que estén dentro de la ecuación que utiliza para el diseño.
- El método AASHTO 1993 no presenta ninguna aplicación para el estudio de fallas en la estructura y considera los efectos del medio ambiente en una forma indirecta, con el coeficiente de drenaje “Cd”.
- No existe un estudio para la predicción de fallas tanto para el pavimento rígido como flexible.

A pesar de que las guías de diseño implementadas por AASHTO (1972, 1986 y 1993) basadas en los resultados de las pruebas AASHO de 1950, han funcionado para las necesidades de nuestro país, es necesario utilizar nuevos métodos de diseño que se acoplen a las necesidades y condiciones actuales del país, generando diseños más económicos y duraderos. Además, el motivo principal para un cambio en la manera de ver el diseño de pavimentos nuevos y en especial los rehabilitados, está en función de los costos de construcción y rehabilitación.

# **RECOMENDACIONES**



## **RECOMENDACIONES.**

Esta guía de diseño ha presentado una forma de como utilizar este método para el diseño de pavimentos nuevos pero quedaría pendiente hacer un estudio del diseño de la rehabilitación de pavimentos ya que el objetivo primordial de nuestro país es construir, rehabilitar, reconstruir, ampliar, expandir y dar mantenimiento a la infraestructura vial de El Salvador.

También quedaría pendiente el estudio del diseño de drenaje basado en el diseño de AASHTO 2002. La Guía de Diseño provee un software especializado para el diseño del drenaje de pavimentos flexibles y rígidos denominado DRIP. El estudio de dicho software no quedó cubierto en este trabajo quedando de esta manera la invitación a la realización de dicho estudio.

Es importante hacer énfasis en la necesidad de empezar a coleccionar una base de datos con las propiedades fundamentales de los materiales necesarias para el método de diseño AASHTO 2002, como son:

- Coeficiente de expansión térmica (para los agregados de los concretos).
- Conductividad térmica (asfalto, concreto hidráulico, bases y subbases estabilizadas).
- Capacidad calorífica (asfalto, concreto hidráulico, bases y subbases estabilizadas).
- Coeficiente de presión lateral (para suelos de subrasante).
- El efecto de la contracción en el concreto hidráulico.
- Parámetros necesarios para la curva característica del suelo-agua.

- Relación de las propiedades de resistencia del concreto hidráulico de 20 años a 28 días.

También es importante hacer un estudio de las características típicas de tráfico de El Salvador como son:

- Factores de distribución de cargas por eje.
- Número de ejes por vehículo.
- Configuraciones de ejes.
- Distancia entre ejes.

Con la obtención de una base de datos, se podrán calibrar los modelos mecanicistas-empíricos con los que cuenta esta Guía de diseño para implementarlo apropiadamente en nuestro país. Al empezar lo más pronto posible ésta recolección de datos, producirá que las carreteras de nuestro país se vean beneficiadas con esta nueva metodología, ya que esta guía permitirá un uso más apropiado de los recursos con los que cuenta nuestro país.

El construir secciones de prueba donde estas características puedan ser controladas y medidas apropiadamente es una muy buena alternativa de investigación, ya que la recolección de esta base de datos no termina con la implementación de la guía, sino que debe convertirse en un proceso continuo para la progresiva mejora y actualización de los modelos que la guía contiene.

# **BIBLIOGRAFÍA**

## **BIBLIOGRAFÍA.**

- Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña. Universidad Nacional de San Juan, Argentina.  
Curso de actualización de diseño estructural de caminos según el método AASHTO 1993. Septiembre de 1998.
- Huang, Yang H.  
Pavement Analysis and Design, First Edition, Prentice-Hall, Inc., 1993.
- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 4th Edition, Supplement, 1998.
- Manual Centroamericano para el diseño de pavimentos. Secretaría de Integración Económica Centroamericana, SIECA.
- Catálogo de Daños. Secretaría de Integración Económica Centroamericana, SIECA.
- Subgrade/Foundation Design Inputs.  
Part 2, Chapter 1. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP, March 2004.
- Material Characterization.  
Part 2, Chapter 2. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP, March 2004.
- Environmental Effects.  
Part 2, Chapter 2. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP, March 2004.

- Traffic.  
Part 2, Chapter 4. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP, March 2004.
- Drainage.  
Part 3, Chapter 1. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP, March 2004.
- Shoulders.  
Part 3, Chapter 2. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP, March 2004.
- Design of New and Reconstructed Flexible Pavements.  
Part 3, Chapter 3. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP, March 2004.
- Design of New and Reconstructed Rigid Pavements.  
Part 3, Chapter 4. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP, March 2004.
- <http://www.trb.org/mepdg/>
- [http://www.hotmix.ce.washington.edu/wsdot\\_web](http://www.hotmix.ce.washington.edu/wsdot_web)
- [http://www.ara.com/transportation/mepdg/mepdg\\_about.htm](http://www.ara.com/transportation/mepdg/mepdg_about.htm)

# **GLOSARIO**

## **GLOSARIO DE TÉRMINOS<sup>138</sup>.**

### **A.**

#### **Agregado de base.**

Es una de agregados consistente de agregados minerales compactados.

#### **Agregado de subbase.**

Es una subbase de agregados consistente de agregados minerales compactados.

#### **Agregado graduado denso.**

Es un agregado mecánicamente triturado que tiene una distribución del tamaño de partícula tal que cuando es compactado, el resultado de vacíos entre las partículas de agregado, es expresado como un porcentaje del total de espacio ocupado por el material y es relativamente pequeño.

#### **Ahuellamiento.**

Es la depresión longitudinal ó fatiga del pavimento debido a la trayectoria de las llantas bajo cargas.

#### **Alabeo.**

Es la deformación de una losa de concreto hidráulico causada por una diferencia de humedad entre la parte más alta y baja de la superficie de la losa.

---

<sup>138</sup> Incluye materiales de la Guía de diseño AASHTO 1986-93, Reporte final del proyecto 1-32 de NCHRP, Síntesis 135, 204 y 211 de NCHRP y de normas ASTM aplicables.

**Análisis de costo del ciclo de vida (LCCA).**

Es una valoración económica de un ítem, área, sistema, finalidad y competitividad en alternativas de diseño que consideran todos los costos significativos de propiedad a través de la vida de diseño, expresado en su equivalente a dólar americano.

**Análisis de elementos finitos.**

El método de elementos finitos es una solución matemática rigurosa que emplea a menudo ecuaciones diferenciales complejas de problemas ingenieriles a ecuaciones algebraicas.

La geometría del problema es descrito para elementos discretos de dimensiones finitas que son analizadas a través de la aplicación de principios mecánicos ingenieriles. Los resultados del análisis de elementos finitos son agregados para aproximar a la solución matemática más exacta.

**Año base.**

Es el primer año de tráfico vehicular después de la construcción de la carretera, es utilizado como la base de cálculo para el diseño.

**B.****Barra de amarre.**

Es una barra de acero deformada ó conector embebida a través de la junta longitudinal en una losa rígida para prevenir la separación de losas colindantes.

**Base.**

Es la capa ó capas de material especificado ó selecto con un espesor diseñado que es colocado sobre la subbase ó subrasante para soportar la capa



de rodadura. La capa que está directamente debajo de la losa de concreto hidráulico es llamada capa de base.

**Base de agregados de graduación abierta.**

Es una base de agregado mineral triturado que tiene la distribución del tamaño de partículas tal que cuando es compactada, los intersticios proporcionaran propiedades mejoradas para el drenaje.

**Base de concreto asfáltico.**

Es un concreto asfáltico utilizado como base de agregados.

**Base de concreto de baja resistencia.**

Es una base construida de agregados minerales mezclados en una máquina con una cantidad suficiente de cemento Pórtland para proporcionar una plataforma fuerte para las capas adicionales del pavimento y que es colocada con una pavimentadota.

**Base de grava.**

Es una base construida de grava compactada. Puede ser o no graduada y/o triturada.

**Base de limo-ceniza.**

Es una mezcla de agregado mineral, limo, ceniza y agua combinado en proporciones adecuadas las cuales producen una masa densa cuando es compactada.

**Base de piedra triturada.**

Es una base de espesor diseñado, construida de agregados minerales graduados mecánicamente triturados y compactados arriba de la subbase ó subrasante.

**Base granular estabilizada.**

Es una base de material estabilizado no especificado, usualmente con cemento asfáltico ó cemento Pórtland.

**Base permeable.**

Es una base construida de agregados de graduación abierta tratados y no tratados.

**Base permeable estabilizada.**

Es una base permeable con un material estabilizado no especificado, usualmente con cemento asfáltico ó cemento Pórtland.

**Base permeable tratada con asfalto.**

Es una base permeable que contiene un pequeño porcentaje de cemento asfáltico para mejorar ó aumentar la estabilidad.

**Base permeable tratada con cemento.**

Es una base de agregado de graduación abierta tratada con cemento Pórtland para proporcionar una mejora en la resistencia de la base y para reducir la erosión.

**Base tratada con cemento.**

Es una base consistente de agregados minerales mezclados en el lugar ó por una concretera con un pequeño porcentaje de cemento Pórtland para proveer propiedades cementantes y de resistencia.

**Bombeo.**

Es la expulsión de los materiales de la fundación, ya sean mojados ó secos, a través de las juntas ó las grietas a lo largo de los bordes de la losa

rígida resultando movimientos verticales de la losa debajo el tráfico ó de grietas en pavimentos semi-rígidos.

## **C.**

### **Carga de eje simple equivalente (ESAL).**

Es un factor numérico que expresa la relación de una carga de eje dado a otra carga de eje en términos de los efectos relativos de las dos cargas sobre la serviciabilidad de una estructura de pavimento. A menudo es expresado en términos de carga por eje de 18,000 libras.

### **Carga de la llanta.**

Es la porción de la carga del vehículo impuesta sobre la llanta estática en el momento de pesarlo, expresado en unidades de masa, libras (kilogramos), debido solamente a la fuerza vertical hacia abajo de la gravedad que actúa en la masa del vehículo estático.

### **Carga de tracción.**

Es la sumatoria de la carga de la llanta en todos los neumáticos incluidos en el montaje de la rueda que abarca un medio eje.

### **Carga por eje.**

Es la sumatoria de todas las cargas de las llantas sobre un eje.

### **Carga por eje cuádruple.**

Son cuatro ejes cuyos centros quizá incluidos entre dos planos verticales transversales paralelos de más de 120 pulgadas pero no más de 160 pulgadas de separado, extendiendo a través de la anchura completa del vehículo.

**Carga por eje simple.**

Es el total de cargas transmitidas por todas las llantas cuyo centro puede ser incluido entre dos planos verticales transversales de más de 40 pulg., entendido a través de la anchura completa del vehículo.

**Carga por eje tandem.**

Es la carga total transmitida al pavimento por dos ejes consecutivos donde los centros pueden ser incluidos entre los planos verticales paralelos de más de 40 pulgadas solamente y no más que 8 pies, extendiéndose a través de la anchura completa del vehículo.

**Carga por eje tridem (triple eje de carga).**

Es el total de carga distribuida a la carretera por tres ejes consecutivos cuyos centros pueden ser incluidos entre planos verticales paralelos espaciados más de 40 pulgadas y no más de 96 pulgadas, extendiéndose a través de la anchura completa del vehículo.

**Clasificación de tráfico vehicular (TTC) (factor de distribución de la clase de vehículo).**

Es un factor que describe la proporción de vehículos en una clase dada ó sobre una carretera dada.

**Clasificación vehicular (composición vehicular).**

Es la identificación, resumen y reporte del volumen de tráfico por clasificación vehicular.

**Coefficiente de expansión térmica.**

Es el cambio de unidad de longitud por grado de temperatura que cambia.

**Comportamiento del pavimento.**

Es una medida del servicio acumulado proporcionado por un pavimento. A menudo es referido al registro de la condición del pavimento, la serviciabilidad a través del tiempo ó al tráfico acumulado.

**Concreto asfáltico.**

Es una mezcla controlada de cemento asfáltico y agregado graduado compactado formando una masa densa.

**Concreto hidráulico.**

Es un compuesto material consistente de cemento Pórtland, agua y partículas embebidas ó fragmentos de agregados. El cemento Pórtland y el agua, reaccionan químicamente para formar un sólido el cual ligan los agregados en una masa rocosa.

**Confiabilidad.**

Es la probabilidad de que un diseño de pavimento dado durará la anticipada vida de diseño.

**Curvatura.**

Es una deformación de la losa de concreto hidráulico causado por la diferencia de temperaturas entre la parte superior e inferior de la superficie.

**D.****Deflexión.**

Es la deformación vertical de un pavimento bajo una aplicación de carga.

**Despostillamiento.**

Es un área fracturada de un CRCP limitada por grietas cercanas espaciadas generalmente menos de 3 pies.

**Diferencia de temperatura.**

Es la diferencia entre la temperatura en superficie y en el fondo de la losa de concreto hidráulico.

**Dispositivo de transferencia de carga.**

Es un recurso mecánico diseñado para transferir cargas a través de una junta en una losa rígida.

**Dovela.**

Es un dispositivo de transferencia de carga a través de una junta (usualmente en una junta transversal) en una losa rígida, usualmente consistente de una barra de acero cilíndrica.

**E.****Eficiencia de transferencia de carga (LTE).**

Es la habilidad de una junta para transferir cargas de un lado a otro. La LTE es definida como la deflexión del lado descargado dividido por el lado cargado 100 veces.

**Esfuerzo desviador ó desviante.**

En la prueba triaxial, es la diferencia entre el esfuerzo axial aplicado por el aparato de prueba y el esfuerzo de confinamiento (presión).

**Estructura de pavimento.**

Es una combinación de subbase, base y superficie, colocadas sobre una subrasante para soportar las cargas de tráfico y distribuir las en el suelo firme.

**F.****Factor de calibración.**

Es el factor utilizado para ajustar un modelo de datos de comportamiento medidos adecuadamente.

**Factor de crecimiento de tráfico.**

Es un factor utilizado para describir la tasa de crecimiento anual del volumen de tráfico sobre una carretera.

**Factor de distribución de carril.**

Es un factor que describe el porcentaje (de tráfico en una dirección) de una composición vehicular dada utilizando un carril dado.

**Factor de distribución de dirección.**

Es un factor que describe el porcentaje de tráfico vehicular viajando en una dirección ó carretera dada.

**Factor de distribución horaria.**

Es un factor utilizado para describir la proporción de tráfico en una carretera dada para una hora del día estipulada.

**Factor de distribución mensual (MAF).**

Es un factor que describe la proporción total del tráfico en una carretera ó de una composición vehicular dada utilizando una carretera durante un mes del año estipulado.

**Falla.**

Es una elevación ó depresión de una losa de concreto hidráulico en relación a una losa colindante, usualmente a juntas transversales y grietas.

## **G.**

### **Geotextil.**

Tela permeable hecha de materiales de textil utilizados como filtros para prevenir la migración del suelo, es un separador para prevenir que el suelo se mezcle y se utiliza como refuerzo para añadir resistencia al esfuerzo cortante del suelo.

### **Gestión de pavimentos.**

Es la dirección efectiva y eficiente de varias actividades implicadas que proporcionan y sostienen al pavimento en condiciones aceptables a los usuarios a costos de ciclos de vida muy bajos.

### **Gradiente de temperatura.**

Es el cambio de temperatura a través de la losa de concreto hidráulico por unidad de longitud.

### **Grado de serviciabilidad presente (PSR).**

Es un grado principal de serviciabilidad de un pavimento (viajando en la superficie) establecido por un panel de clasificación bajo condiciones controladas. La escala usual para carreteras es 0 a 5, siendo 5 excelente.

### **Grava.**

Es el agregado grueso que resulta de la desintegración natural y la abrasión de las rocas ó del proceso de debilidad del límite de conglomerado.

### **Grieta.**

Es una fisura ó discontinuidad en la superficie del pavimento no necesariamente extendido a través del espesor del pavimento.



**Grieta longitudinal.**

Es la grieta del pavimento predominantemente paralelo a la dirección del tráfico.

**Grieta piel de cocodrilo.**

Son grietas interconectadas ó entrelazadas que forman un diseño semejante a la piel del cocodrilo.

**Grieta por temperatura.**

Son grietas en la superficie de pavimento asfáltico, usualmente de ancho transversal completo, como resultado de los cambios de volumen estacionales ó diurnos del pavimento restringidos por la fricción con la capa subyacente.

**Grieta transversal.**

Son grietas del pavimento predominantemente perpendiculares a la dirección del tráfico.

**I.****Índice de Rugosidad Internacional (IRI).**

Es el índice de rugosidad del pavimento calculado de una medida del perfil longitudinal utilizando una simulación de un cuarto de vehículo a una velocidad simulada de 50 mph (80 km/h).

**Índice de serviciabilidad presente (PSI).**

Es un índice derivado por fórmulas para estimar el grado de serviciabilidad de medidas de características físicas del pavimento.

## **J.**

### **Junta de construcción.**

Para pavimentos rígidos, es una junta hecha necesariamente para prolongar la interrupción en la colocación del concreto. Para pavimentos flexibles, es una junta longitudinal entre el carril colindante pavimentado en forma separada ó una junta transversal separando capas de diferentes edades ó que es pavimentado diferentes veces.

### **Junta de contracción.**

Es una junta normalmente colocada a intervalos recurrentes en una losa de concreto hidráulico para controlar las grietas transversales.

### **Junta de expansión.**

Es una junta localizada para proporcionar extensión a una losa, sin dañarla a sí misma, losas adyacentes o estructuras rígidas.

### **Junta longitudinal.**

Es una junta normalmente colocada entre los carriles de tráfico en pavimentos rígidos para controlar las grietas longitudinales.

## **M.**

### **Mantenimiento.**

Es la preservación de toda la carretera que incluye la superficie, hombros, bordes, estructuras y dispositivos de control de tráfico que son necesarios para que estén seguras y que tengan un uso eficiente.

### **Material no lineal.**

Es un material de pavimento que tiene propiedades tales que la relación entre esfuerzos y tensiones, no es lineal.

**Mecanicista-empírico.**

Es un diseño filosófico ó una aproximación de la mecánica clásica de los sólidos donde es utilizada en conjunción con las relaciones derivadas empíricamente para llevar a cabo los objetivos de diseño.

**Mezcla de asfalto en frío.**

Es una mezcla de concreto asfáltico compuesta de agregados y emulsiones asfálticas ó de reducción asfáltica el cual no requiere calor durante su mezcla.

**Mezcla estabilizada químicamente.**

Materiales de subrasante cuyas características de plasticidad han sido modificadas utilizando materiales tales como limo, ceniza ó cemento Pórtland.

**Módulo de ruptura (MR).**

Es el indicador de la resistencia a la flexión del concreto de cemento Pórtland, es el máximo esfuerzo de tensión en el fondo de una viga de concreto simplemente apoyada, que falla en los puntos tercios donde se encuentran las cargas.

**Módulo de reacción de la subrasante (k).**

Es el módulo de reacción de la subrasante de Westergaard para utilizar en el diseño de pavimentos rígidos (es la carga en libras por pulgada cuadrada sobre un área cargada del suelo firme ó subbase dividido por la deflexión en pulgadas del suelo firme ó subbase, psi/in.). El valor utilizado en el diseño es el módulo dinámico de reacción de subrasante que es procesado directamente de las deflexiones de FWD ó de deflexiones obtenidas de los programas de computadora de capas elásticas donde los valores de módulo resiliente son asignadas a cada capa. El tradicional módulo de reacción de la subrasante es el valor estático, el cual es aproximadamente  $\frac{1}{2}$  del valor dinámico.

**Módulo dinámico ( $E^*$ ).**

Es la relación entre el esfuerzo y la tensión bajo continuas cargas sinusoidales utilizados para evaluar los parámetros de respuesta elástico-viscoelástico de un material. El módulo dinámico de un material es típicamente definido como el valor absoluto del módulo complejo  $E^*$ .

**Módulo elástico ( $E$ ).**

Es la relación de esfuerzos a tensión en la porción elástica de una curva de esfuerzo de tensión.

**Módulo resiliente ( $M_r$ ).**

Es una medida estandarizada del módulo elástico del suelo firme ó de otro material de pavimento.

**P.****Pavimento compuesto.**

Es una estructura de pavimento compuesto de concreto asfáltico que cubre la superficie y de una losa de concreto hidráulico. Una sobrecapa de concreto asfáltico sobre una losa de concreto hidráulico es referido como un pavimento compuesto.

**Pavimento de concreto asfáltico.**

Es una estructura de pavimento colocada arriba de la subrasante ó en una subrasante mejorada y consiste de una ó más tipos de concreto asfáltico ó una combinación de concreto asfáltico y agregados estabilizados ó no estabilizados.

**Pavimento de concreto con refuerzo continuo (CRCP).**

Es el pavimento de concreto hidráulico que contiene refuerzo longitudinal arriba de la mitad del espesor de la losa para contener las grietas de contracción bien cerradas. Las juntas transversales existen solamente para propósitos de construcción y de refuerzo estructural. El refuerzo transversal puede ó no puede existir.

**Pavimento de concreto con junta reforzada (JRCP).**

Es el pavimento de concreto hidráulico que contiene acero de refuerzo distribuido para controlar las grietas aleatorias y usualmente contiene dispositivos de transferencia de cargas en las juntas transversales.

**Pavimento de concreto con junta simple (JPCP).**

Es el pavimento de concreto hidráulico que contiene juntas transversales espaciadas para acomodar el gradiente de temperatura y los esfuerzo de la contracción por secado para evitar grietas. Este pavimento no contiene acero distribuido para control de grietas aleatorias y puede o no contener dispositivos de transferencia de cargas en las juntas.

**Pavimento flexible.**

Es una estructura de pavimento que mantiene un contacto íntimo y que distribuye las cargas en la subrasante y depende de la trabazón de agregados, fricción de las partículas y de la cohesión para la estabilidad.

**Pavimento rígido.**

Es una estructura de pavimento que distribuye las cargas a la subrasante, que tiene una losa de concreto de cemento Pórtland de resistencia relativamente de alta flexión.

**Peladura.**

Son las grietas, fracturas ó descascaramiento de los bordes del pavimento en las proximidades de una junta o una grieta.

**Perfil longitudinal.**

Es la desviación perpendicular de la superficie del pavimento de una referencia paralela establecida a la dirección del carril, usualmente medido por el rastro dejado por las llantas.

**Perfil transversal.**

Es la desviación vertical de la superficie del pavimento desde una referencia horizontal perpendicular a la dirección de carril.

**Período de análisis.**

Es el período de tiempo utilizado para comparar alternativas de diseño. Un período de análisis puede contener varias actividades de mantenimiento y rehabilitación durante el ciclo de vida del pavimento que está siendo evaluado.

**Período de comportamiento.**

Es el período de tiempo en la que una estructura inicialmente construida o rehabilitada de pavimento, durará (realizarse) antes de alcanzar su condición terminal cuando se realiza la rehabilitación. Esto también se refiere como el período del diseño.

**R.****Rehabilitación.**

Es el acto de restaurar un pavimento a una condición anterior.

**Rehabilitación del pavimento.**

Trabajo emprendido para ampliar la vida de servicio de una factibilidad existente. Esto incluye la colocación del material superficial adicional y/u otro trabajo necesario para regresar una carretera existente, incluyendo hombros, para una adecuada condición estructural o funcional.

Esto podría incluir la remoción y el reemplazo completa de una porción de la estructura de pavimento.

**Reventadura.**

Es una erupción hacia arriba de una losa de pavimento hidráulico cerca de una grieta ó una junta.

**S.****Serviciabilidad.**

Es la capacidad de observación en el tiempo de un pavimento para servir al tráfico.

**Subbase.**

Es la capa ó capas de material selecto ó especificado de espesor diseñado colocado en una subrasante para soportar la base. Nótese que la capa directamente debajo de la losa de concreto hidráulico es llamada capa de base y no capa de subbase.

**Subbase de grava.**

Es una subbase construida de grava compactada. Puede ser o no graduada y/o triturada.

**Subbase de piedra triturada.**

Es una subbase de espesor diseñado, construida de agregados minerales graduados mecánicamente triturados y compactados arriba de la subrasante.

**Subbase granular drenable.**

Es una subbase construida de agregados triturados graduados y compactados.

**Subrasante.**

Es la parte alta de la superficie del suelo firme en el cual la estructura de pavimento y los hombros están contruidos.

**Subrasante estabilizada con limo.**

Es una mezcla preparada y compactada mecánicamente de limo hidratado, agua y suelo que soporta el sistema de pavimento y que ha sido planeado con la finalidad de proporcionar soporte estructural.

**Suelo cemento.**

Es una mezcla compactada mecánicamente de suelo, cemento Pórtland y agua utilizados como una capa en un sistema de pavimento para reforzar y proteger la subrasante ó subbase.

**Suelo firme.**

Es la porción graduada de una carretera entre la parte alta y los lados de las pendientes, preparada como fundación para la estructura de pavimento y los hombros.

**Superficie.**

Es una ó más capas de una estructura de pavimento diseñada para acomodar las cargas de tráfico, es la capa de arriba el cual resiste el derrape,



abrasión del tráfico y los efectos de desintegración del clima. La capa mas superficial del pavimento asfáltico es llamado a veces rodadura.

**Superficie del concreto asfáltico.**

Es el concreto asfáltico utilizado como superficie de la vía.

**T.**

**Temperatura de esfuerzo cero.**

Es la temperatura (después de la colocación y durante el curado) en que la capa de concreto hidráulico exhibe esfuerzo termal cero (en las temperaturas menores a esta, el concreto exhibe tensiones extensible).

**Tensión resiliente.**

Es la tensión recuperable de un material cuando una carga es removida.

**Teoría de la capa elástica.**

Es un proceso matemático en donde las capas de una estructura de pavimento son asumidas con un comportamiento elástico.

**Trabazón de agregados.**

Es un mecanismo de transferencia de carga en el cual el esfuerzo cortante es acarreado por la interfase que existe entre el agregado y la pasta de cemento.

**Tráfico promedio diario anual (TPDA).**

Es el estimado del tráfico típico vehicular sobre un segmento de carretera para todos los días de la semana a través de un período de un año.

## **V.**

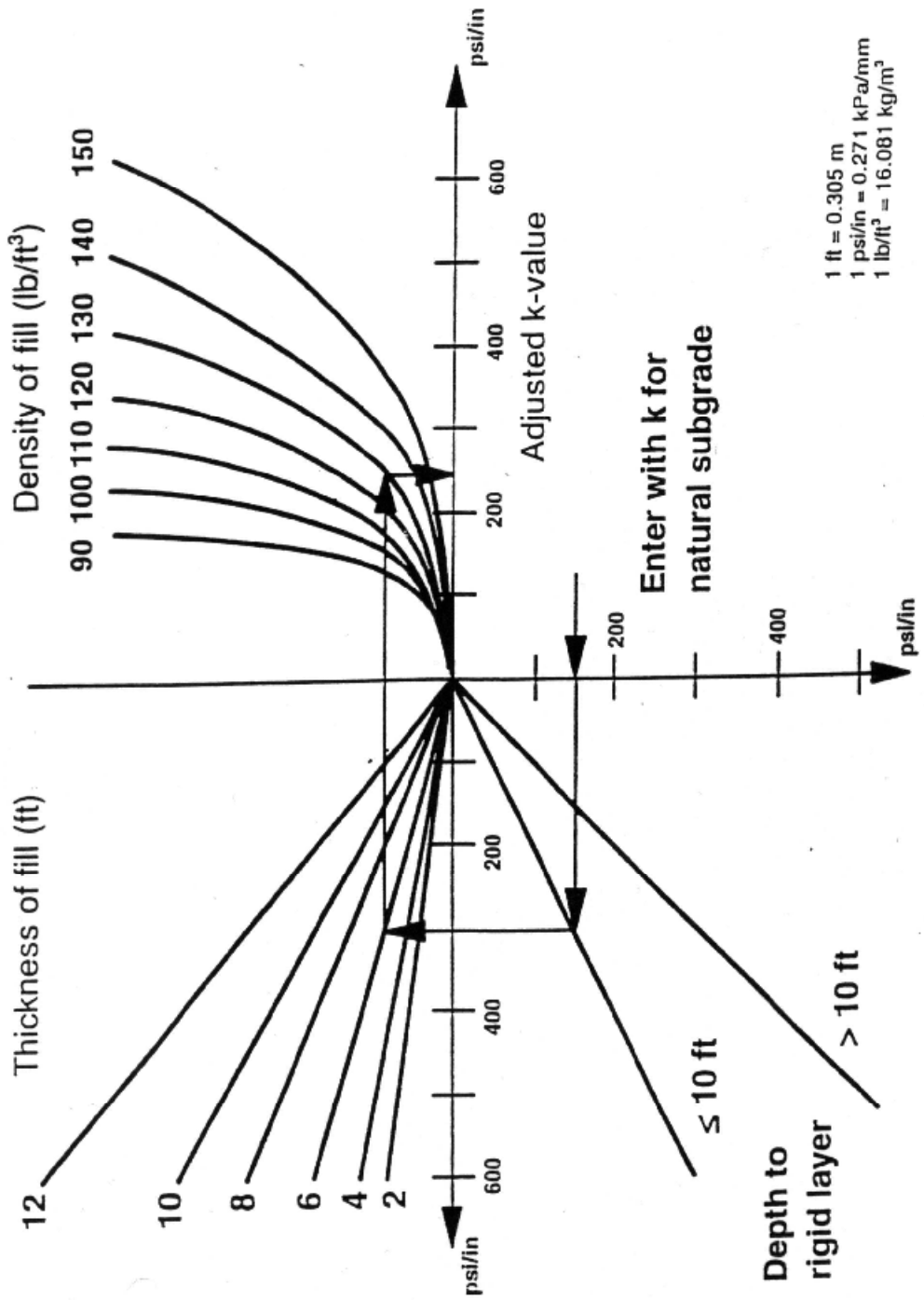
### **Vida de diseño.**

Es la longitud de tiempo para el cual la estructura de pavimento está siendo diseñada, incluyendo el tiempo de construcción hasta la rehabilitación principal programada.

### **Viscoelástico.**

Es utilizado para describir el asfalto y muchos polímeros que exhiben propiedades viscosas y elásticas cuando se deforman.

# **ANEXOS**



ANEXO 1.

Adjustment to k for fill and/or rigid layer.

## **ANEXO 2**

# **MEMORIA DE CÁLCULO DEL DISEÑO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE NUEVO SEGÚN EL METODO DE DISEÑO AASHTO 2002**



June	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
July	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
August	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
September	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
October	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
November	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
December	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

**Vehicle Class Distribution**

(Level 3, Default Distribution)

**AADTT distribution by vehicle class**

Class 4	2.9%
Class 5	56.9%
Class 6	10.4%
Class 7	3.7%
Class 8	9.2%
Class 9	15.3%
Class 10	0.6%
Class 11	0.3%
Class 12	0.4%
Class 13	0.3%

**Hourly truck traffic distribution**

by period beginning:

Midnight	0.7%	Noon	5.7%
1:00 am	0.4%	1:00 pm	5.4%
2:00 am	0.4%	2:00 pm	5.4%
3:00 am	0.5%	3:00 pm	5.6%
4:00 am	1.2%	4:00 pm	5.8%
5:00 am	4.0%	5:00 pm	6.2%
6:00 am	7.3%	6:00 pm	5.7%
7:00 am	6.7%	7:00 pm	5.0%
8:00 am	5.9%	8:00 pm	4.1%
9:00 am	5.8%	9:00 pm	3.1%
10:00 am	5.7%	10:00 pm	2.3%
11:00 am	5.7%	11:00 pm	1.4%

**Traffic Growth Factor**

Vehicle Class	Growth Rate	Growth Function
Class 4	4.5%	Compound
Class 5	4.5%	Compound
Class 6	4.5%	Compound
Class 7	4.5%	Compound
Class 8	4.5%	Compound
Class 9	4.5%	Compound
Class 10	4.5%	Compound
Class 11	4.5%	Compound
Class 12	4.5%	Compound
Class 13	4.5%	Compound

**Traffic -- Axle Load Distribution Factors**

Level 3: Default

**Traffic -- General Traffic Inputs**

Mean wheel location (inches from the lane marking):	18
Traffic wander standard deviation (in):	10
Design lane width (ft):	12

**Number of Axles per Truck**

Vehicle Class	Single Axle	Tandem Axle	Tridem Axle	Quad Axle
Class 4	1.62	0.39	0.00	0.00
Class 5	2.00	0.00	0.00	0.00

Class 6	1.02	0.99	0.00	0.00
Class 7	1.00	0.26	0.83	0.00
Class 8	2.38	0.67	0.00	0.00
Class 9	1.13	1.93	0.00	0.00
Class 10	1.19	1.09	0.89	0.00
Class 11	4.29	0.26	0.06	0.00
Class 12	3.52	1.14	0.06	0.00
Class 13	2.15	2.13	0.35	0.00

### Axle Configuration

Average axle width (edge-to-edge) outside dimensions,ft): 8.5  
 Dual tire spacing (in): 12

### Axle Configuration

Single Tire (psi): 120  
 Dual Tire (psi): 120

### Average Axle Spacing

Tandem axle(psi): 51.6  
 Tridem axle(psi): 49.2  
 Quad axle(psi): 49.2

### Climate

icm file:

C:\DG2002\Projects\Mi clima.icm

Latitude (degrees.minutes) 25.49  
 Longitude (degrees.minutes) -80.18  
 Elevation (ft) 26  
 Depth of water table (ft) 32.8

### Structure--Design Features

### Structure--Layers

#### Layer 1 -- Asphalt concrete

Material type: Asphalt concrete  
 Layer thickness (in): 3

#### General Properties

##### General

Reference temperature (F°): 70

##### Volumetric Properties as Built

Effective binder content (%): 5  
 Air voids (%): 3.5  
 Total unit weight (pcf): 139.2

Poisson's ratio: 0.3 (user entered)

##### Thermal Properties

Thermal conductivity asphalt (BTU/hr-ft-F°): 0.67  
 Heat capacity asphalt (BTU/lb-F°): 0.23



**Asphalt Mix**

Cumulative % Retained 3/4 inch sieve:	5
Cumulative % Retained 3/8 inch sieve:	30
Cumulative % Retained #4 sieve:	46
% Passing #200 sieve:	4

**Asphalt Binder**

Option:	Conventional viscosity grade
Viscosity Grade	AC 20
A	10.7709 (correlated)
VTS:	-3.6017 (correlated)

**Layer 2 -- Soil Cement****General Properties**

Material type:	Soil Cement
Layer thickness (in):	6
Unit weight (pcf):	100
Poisson's ratio:	0.28

**Strength Properties**

Elastic/resilient modulus (psi):	600000
----------------------------------	--------

**Thermal Properties**

Thermal conductivity (BTU/hr-ft-F°) :	1.25
Heat capacity (BTU/lb-F°):	0.28

**Layer 3 -- Crushed gravel**

Unbound Material:	Crushed gravel
Thickness(in):	6

**Strength Properties**

Input Level:	Level 3
Analysis Type:	ICM inputs (ICM Calculated Modulus)
Poisson's ratio:	0.28
Coefficient of lateral pressure, Ko:	0.5
Modulus (input) (psi):	41867

**ICM Inputs**Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI:	0
Passing #200 sieve (%):	5
Passing #4 sieve (%):	30
D60 (mm):	7

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf):	120 (user input)
Specific gravity of solids, Gs:	2.6 (user input)
Saturated hydraulic conductivity (ft/hr):	236 (derived)
Optimum gravimetric water content (%):	6 (user input)
Calculated degree of saturation (%):	78 (calculated)

Soil water characteristic curve parameters: Default values

Parameters	Value
a	0.2
b	7.5
c	1.12
Hr.	0.0279

**Layer 4 -- A-2-4**

Unbound Material: A-2-4  
 Thickness(in): Semi-infinite

**Strength Properties**

Input Level: Level 3  
 Analysis Type: ICM inputs (ICM Calculated Modulus)  
 Poisson's ratio: 0.25  
 Coefficient of lateral pressure, Ko: 0.5  
 Modulus (input) (psi): 28000

**ICM Inputs**

Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI: 6  
 Passing #200 sieve (%): 23  
 Passing #4 sieve (%): 70  
 D60 (mm): 0.15

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf): 100 (user input)  
 Specific gravity of solids, Gs: 2.5 (user input)  
 Saturated hydraulic conductivity (ft/hr): 3.25e-005 (derived)  
 Optimum gravimetric water content (%): 28 (user input)  
 Calculated degree of saturation (%): 85.1 (calculated)

Soil water characteristic curve parameters: Default values

Parameters	Value
a	16.5
b	1.44
c	0.56
Hr.	550

**Distress Model Calibration Settings - Flexible**

**AC Fatigue** Level 3 (Nationally calibrated values)

k1 0.00432  
 k2 3.9492  
 k3 1.281

**AC Rutting** Level 3 (Nationally calibrated values)

k1 -3.4488  
 k2 1.5606  
 k3 0.4791

Standard Deviation Total 0.1587\*POWER(RUT,0.4579)+0.001

Rutting (RUT):

**Thermal Fracture** Level 3 (Nationally calibrated values)  
k1 5

Std. Dev. (THERMAL):  $0.2474 * THERMAL + 10.619$

**CSM Fatigue** Level 3 (Nationally calibrated values)  
k1 1  
k2 1

**Subgrade Rutting** Level 3 (Nationally calibrated values)  
**Granular:**  
k1 1.673  
**Fine-grain:**  
k1 1.35

### AC Cracking

#### AC Top Down Cracking

C1 (top) 7  
C2 (top) 3.5  
C3 (top) 0  
C4 (top) 1000

Standard Deviation (TOP)  $200 + 2300/(1+\exp(1.072-2.1654*\log(TOP+0.0001)))$

#### AC Bottom Up Cracking

C1 (bottom) 1  
C2 (bottom) 1  
C3 (bottom) 0  
C4 (bottom) 6000

Standard Deviation (TOP)  $32.7 + 995.1 / (1+\exp(2-2*\log(BOTTOM+0.0001)))$

### CSM Cracking

C1 (CSM) 1  
C2 (CSM) 1  
C3 (CSM) 0  
C4 (CSM) 1000

Standard Deviation (CSM)  $CTB*1$

### IRI

#### IRI Flexible Pavements with GB

C1 (GB) 0.0463  
C2 (GB) 0.00119  
C3 (GB) 0.1834  
C4 (GB) 0.00384  
C5 (GB) 0.00736

C6 (GB)	0.00115
Std. Dev (GB)	0.387

**IRI Flexible Pavements with ATB**

C1 (ATB)	0.009995
C2 (ATB)	0.000518
C3 (ATB)	0.00235
C4 (ATB)	18.36
C5 (ATB)	0.9694
Std. Dev (ATB)	0.292

**IRI Flexible Pavements with CSM**

C1 (CSM)	0.00732
C2 (CSM)	0.07647
C3 (CSM)	0.000145
C4 (CSM)	0.00842
C5 (CSM)	0.000212
Std. Dev (CSM)	0.229

## Project: AC2005 Reliability Summary

<b>Performance Criteria</b>	Distress Target	Reliability Target	Distress Predicted	Reliability Predicted	Acceptable
Terminal IRI (in/mi)	316.8	90	115.4	99.999	Pass
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) (ft/500):	800	90	0.5	99.42	Pass
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	35	90	0	99.999	Pass
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	100	90	1	99.999	Pass
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture)	25	90			N/A
Permanent Deformation (AC Only) (in):	1	90	0.42	99.999	Pass
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	2	90	0.55	99.999	Pass

## Predicted distress: Project AC2005

Pavement age (mo)	Pavement age (yr)	Month	Longitudinal Cracking (ft/mi)	Alligator Cracking (%)	Transverse Cracking (ft/mi)	Subtotal AC Roving (in)	Total Roving (in)	IRI (in/mi)	Heavy Trucks (cumulative)	IRI at Reliability (in/mi)
1	0.08	December	0	0	0	0.015	0.069	113	146745	144.57
2	0.17	January	0	0	0	0.02	0.081	113	293491	144.58
3	0.25	February	0	0	0	0.025	0.09	113	440236	141.58
4	0.33	March	0	0.0001	0	0.029	0.098	113	586981	141.59
5	0.42	April	0	0.0001	0	0.037	0.109	113	734726	141.6
6	0.5	May	0	0.0001	0	0.053	0.128	113	880472	141.6
7	0.58	June	0	0.0001	0	0.069	0.147	113	1027220	141.61
8	0.67	July	0	0.0001	0	0.081	0.161	113	1173960	141.61
9	0.75	August	0	0.0001	0	0.092	0.173	113	1320710	144.62
10	0.83	September	0	0.0001	0	0.097	0.18	113	1467450	144.63
11	0.92	October	0	0.0001	0	0.101	0.185	113	1614200	144.63
12	1	November	0	0.0001	0	0.102	0.188	113	1760940	144.64
13	1.08	December	0	0.0001	0	0.104	0.19	113	1914290	144.64
14	1.17	January	0	0.0002	0	0.105	0.191	113.1	2067640	144.65
15	1.25	February	0.01	0.0002	0	0.106	0.193	113.1	2220990	141.66
16	1.33	March	0.01	0.0003	0	0.107	0.195	113.1	2374340	141.66
17	1.42	April	0.01	0.0003	0	0.111	0.2	113.1	2527690	141.67
18	1.5	May	0.01	0.0003	0	0.116	0.205	113.1	2681040	141.68
19	1.58	June	0.01	0.0003	0	0.12	0.21	113.1	2834380	141.68
20	1.67	July	0.01	0.0003	0	0.125	0.216	113.1	2987730	141.69
21	1.75	August	0.01	0.0003	0	0.13	0.222	113.1	3141080	141.69
22	1.83	September	0.01	0.0003	0	0.133	0.226	113.1	3294430	144.7
23	1.92	October	0.01	0.0003	0	0.135	0.229	113.1	3447780	144.71
24	2	November	0.01	0.0004	0	0.136	0.23	113.1	3601130	144.72
25	2.08	December	0.01	0.0004	0	0.137	0.231	113.1	3761380	144.72
26	2.17	January	0.01	0.0005	0	0.137	0.232	113.1	3921630	144.73
27	2.25	February	0.01	0.0006	0	0.138	0.233	113.1	4081880	144.74
28	2.33	March	0.01	0.0006	0	0.139	0.235	113.1	4242130	141.74
29	2.42	April	0.01	0.0006	0	0.141	0.237	113.2	4402380	141.75
30	2.5	May	0.01	0.0007	0	0.141	0.24	113.2	4562630	141.76
31	2.58	June	0.02	0.0007	0	0.146	0.241	113.2	4722880	141.76
32	2.67	July	0.02	0.0007	0	0.151	0.248	113.2	4883130	141.77
33	2.75	August	0.02	0.0007	0	0.154	0.252	113.2	5043370	141.78
34	2.83	September	0.02	0.0007	0	0.158	0.256	113.2	5203620	141.78
35	2.92	October	0.02	0.0007	0	0.159	0.258	113.2	5363870	144.79
36	3	November	0.02	0.0008	0	0.16	0.259	113.2	5524120	144.8
37	3.08	December	0.02	0.0009	0	0.16	0.26	113.2	5684370	144.8

38	3-17	January	0.02	0.001	0	0.161	0.261	113.2	5859040	144.81
39	3-25	February	0.02	0.001	0	0.161	0.262	113.2	6026510	141.82
40	3-33	March	0.02	0.0011	0	0.162	0.263	113.2	6193970	141.82
41	3-12	April	0.02	0.0011	0	0.164	0.265	113.2	6461430	141.83
42	3-5	May	0.02	0.0012	0	0.166	0.267	113.2	6528890	141.84
43	3-28	June	0.03	0.0012	0	0.168	0.27	113.2	6696350	141.85
44	3-67	July	0.03	0.0012	0	0.172	0.274	113.3	6863810	141.85
45	3-75	August	0.03	0.0012	0	0.176	0.278	113.3	7031270	144.86
46	3-83	September	0.03	0.0013	0	0.178	0.281	113.3	7198730	144.87
47	3-92	October	0.03	0.0013	0	0.179	0.282	113.3	7366190	144.88
48	4	November	0.03	0.0014	0	0.179	0.283	113.3	7533650	144.88
49	4-08	December	0.03	0.0015	0	0.18	0.284	113.3	7701110	144.89
50	4-17	January	0.03	0.0016	0	0.18	0.284	113.3	7868570	144.9
51	4-25	February	0.03	0.0017	0	0.18	0.285	113.3	8036030	144.91
52	4-33	March	0.03	0.0018	0	0.181	0.285	113.3	8203490	141.91
53	4-12	April	0.03	0.0019	0	0.182	0.286	113.3	8408630	141.92
54	4-5	May	0.04	0.0019	0	0.185	0.29	113.3	8583680	141.93
55	4-28	June	0.04	0.0019	0	0.189	0.294	113.3	8758630	141.94
56	4-67	July	0.04	0.0019	0	0.193	0.298	113.3	8933620	141.94
57	4-75	August	0.04	0.0019	0	0.196	0.303	113.3	9108620	141.95
58	4-83	September	0.04	0.002	0	0.198	0.305	113.4	9283620	144.96
59	4-92	October	0.04	0.002	0	0.2	0.307	113.4	9458610	144.97
60	5	November	0.04	0.0021	0	0.201	0.308	113.4	9633610	144.97
61	5-08	December	0.04	0.0022	0	0.201	0.309	113.4	9816480	144.98
62	5-17	January	0.04	0.0023	0	0.201	0.309	113.4	9999350	144.99
63	5-25	February	0.05	0.0024	0	0.202	0.31	113.4	10182200	145
64	5-33	March	0.05	0.0025	0	0.203	0.31	113.4	10365100	145.01
65	5-12	April	0.05	0.0026	0	0.201	0.313	113.4	10548000	145.01
66	5-5	May	0.05	0.0026	0	0.206	0.315	113.4	10740800	145.02
67	5-28	June	0.05	0.0027	0	0.208	0.317	113.4	10913700	145.03
68	5-67	July	0.05	0.0027	0	0.21	0.321	113.4	11086600	145.04
69	5-75	August	0.05	0.0027	0	0.21	0.324	113.4	11279500	145.05
70	5-83	September	0.06	0.0027	0	0.216	0.326	113.4	11462300	145.06
71	5-92	October	0.06	0.0028	0	0.217	0.327	113.5	11645200	145.06
72	6	November	0.06	0.0029	0	0.218	0.328	113.5	11828100	145.07
73	6-08	December	0.06	0.003	0	0.218	0.329	113.5	12019200	145.08
74	6-17	January	0.06	0.0032	0	0.218	0.329	113.5	12210300	145.09
75	6-25	February	0.06	0.0033	0	0.219	0.33	113.5	12401400	145.1
76	6-33	March	0.06	0.0034	0	0.219	0.33	113.5	12592500	145.11
77	6-42	April	0.06	0.0035	0	0.22	0.332	113.5	12783600	145.11
78	6-5	May	0.06	0.0036	0	0.222	0.334	113.5	12974700	145.12
79	6-28	June	0.07	0.0036	0	0.224	0.336	113.5	13165800	145.13

80	6.67	July	0.07	0.0026	0	0.227	0.339	113.5	133,569,000	145.14
81	6.75	August	0.07	0.0047	0	0.229	0.342	113.5	133,180,000	145.15
82	6.83	September	0.07	0.0047	0	0.232	0.345	113.5	137,491,000	145.16
83	6.92	October	0.07	0.0048	0	0.233	0.346	113.6	139,402,000	145.17
84	7	November	0.07	0.0049	0	0.235	0.346	113.6	141,213,000	145.18
85	7.08	December	0.07	0.0041	0	0.234	0.347	113.6	143,210,000	145.18
86	7.17	January	0.07	0.0043	0	0.234	0.347	113.6	145,207,000	145.19
87	7.25	February	0.08	0.0044	0	0.234	0.348	113.6	147,204,000	145.2
88	7.33	March	0.08	0.0045	0	0.235	0.349	113.6	149,201,000	145.21
89	7.42	April	0.08	0.0046	0	0.236	0.35	113.6	151,198,000	145.22
90	7.5	May	0.08	0.0046	0	0.237	0.351	113.6	153,195,000	145.23
91	7.58	June	0.08	0.0047	0	0.239	0.354	113.6	155,192,000	145.24
92	7.67	July	0.08	0.0047	0	0.242	0.357	113.6	157,189,000	145.25
93	7.75	August	0.09	0.0047	0	0.245	0.36	113.6	159,186,000	145.26
94	7.83	September	0.09	0.0048	0	0.247	0.362	113.6	161,183,000	145.27
95	7.92	October	0.09	0.0049	0	0.248	0.363	113.7	163,180,000	145.28
96	8	November	0.09	0.005	0	0.248	0.364	113.7	165,177,000	145.29
97	8.08	December	0.09	0.0052	0	0.248	0.364	113.7	167,174,000	145.29
98	8.17	January	0.09	0.0054	0	0.249	0.364	113.7	169,171,000	145.3
99	8.25	February	0.09	0.0056	0	0.249	0.365	113.7	171,168,000	145.31
100	8.33	March	0.09	0.0058	0	0.249	0.365	113.7	173,165,000	145.32
101	8.42	April	0.09	0.0059	0	0.25	0.366	113.7	175,162,000	145.33
102	8.5	May	0.1	0.0059	0	0.252	0.369	113.7	177,159,000	145.34
103	8.58	June	0.1	0.006	0	0.256	0.372	113.7	179,156,000	145.35
104	8.67	July	0.1	0.006	0	0.258	0.375	113.7	181,153,000	145.36
105	8.75	August	0.1	0.006	0	0.261	0.379	113.7	183,150,000	145.37
106	8.83	September	0.1	0.0061	0	0.263	0.38	113.8	185,147,000	145.38
107	8.92	October	0.11	0.0062	0	0.264	0.382	113.8	187,144,000	145.39
108	9	November	0.11	0.0063	0	0.265	0.383	113.8	190,141,000	145.4
109	9.08	December	0.11	0.0064	0	0.265	0.383	113.8	192,138,000	145.41
110	9.17	January	0.11	0.0067	0	0.266	0.383	113.8	194,135,000	145.42
111	9.25	February	0.11	0.0069	0	0.266	0.384	113.8	196,132,000	145.43
112	9.33	March	0.11	0.0071	0	0.266	0.384	113.8	198,129,000	145.44
113	9.42	April	0.11	0.0072	0	0.267	0.385	113.8	201,126,000	145.45
114	9.5	May	0.12	0.0073	0	0.269	0.387	113.8	203,123,000	145.46
115	9.58	June	0.12	0.0073	0	0.272	0.391	113.8	205,120,000	145.47
116	9.67	July	0.12	0.0074	0	0.275	0.394	113.8	207,117,000	145.48
117	9.75	August	0.12	0.0074	0	0.278	0.397	113.9	209,114,000	145.49
118	9.83	September	0.13	0.0075	0	0.28	0.399	113.9	212,111,000	145.5
119	9.92	October	0.13	0.0075	0	0.281	0.4	113.9	214,108,000	145.51
120	10	November	0.13	0.0077	0	0.281	0.401	113.9	216,105,000	145.53
121	10.1	December	0.13	0.0079	0	0.282	0.401	113.9	218,102,000	145.54



122	10.2	January	0.13	0.0081	0	0.282	0.402	113.9	220648600	145.55
123	10.3	February	0.13	0.0083	0	0.282	0.402	113.9	224225000	145.56
124	10.3	March	0.13	0.0085	0	0.283	0.403	113.9	225504000	145.57
125	10.4	April	0.14	0.0086	0	0.284	0.404	113.9	227783000	145.58
126	10.5	May	0.14	0.0087	0	0.286	0.406	113.9	240062000	145.59
127	10.6	June	0.14	0.0088	0	0.287	0.408	111	252341000	145.6
128	10.7	July	0.14	0.0088	0	0.29	0.41	111	246200000	145.61
129	10.8	August	0.15	0.0089	0	0.292	0.413	114	246899000	145.62
130	10.8	September	0.15	0.0089	0	0.294	0.415	114	249177000	145.63
131	10.9	October	0.15	0.009	0	0.295	0.416	114	241456000	145.65
132	11	November	0.15	0.0092	0	0.295	0.416	114	243735000	145.66
133	11.1	December	0.15	0.0093	0	0.295	0.417	114	246115000	145.67
134	11.2	January	0.16	0.0097	0	0.295	0.417	114	248498000	145.68
135	11.3	February	0.16	0.01	0	0.296	0.417	114	250880000	145.69
136	11.3	March	0.16	0.0102	0	0.296	0.418	111	253261000	145.7
137	11.4	April	0.16	0.0103	0	0.297	0.419	114.1	255643000	145.72
138	11.5	May	0.16	0.0104	0	0.299	0.421	114.1	258024000	145.73
139	11.6	June	0.17	0.0105	0	0.3	0.423	114.1	260406000	145.74
140	11.7	July	0.17	0.0105	0	0.305	0.425	114.1	262787000	145.75
141	11.8	August	0.17	0.0106	0	0.305	0.427	114.1	265168000	145.76
142	11.8	September	0.17	0.0107	0	0.307	0.43	114.1	267550000	145.77
143	11.9	October	0.18	0.0108	0	0.308	0.431	114.1	269931000	145.79
144	12	November	0.18	0.01	0	0.308	0.431	114.1	272313000	145.8
145	12.1	December	0.18	0.0113	0	0.308	0.432	114.1	274695000	145.81
146	12.2	January	0.18	0.0116	0	0.309	0.432	114.2	277200000	145.82
147	12.3	February	0.18	0.0118	0	0.309	0.433	114.2	279700000	145.83
148	12.3	March	0.19	0.02	0	0.31	0.433	114.2	282267000	145.85
149	12.4	April	0.19	0.0122	0	0.31	0.434	114.2	284756000	145.86
150	12.5	May	0.19	0.0123	0	0.31	0.435	114.2	287245000	145.87
151	12.6	June	0.19	0.0124	0	0.315	0.437	114.2	289733000	145.88
152	12.7	July	0.2	0.0124	0	0.316	0.44	114.2	292222000	145.9
153	12.8	August	0.2	0.0125	0	0.319	0.443	114.2	294710000	145.91
154	12.8	September	0.2	0.0126	0	0.32	0.444	114.2	297199000	145.92
155	12.9	October	0.2	0.0127	0	0.321	0.445	114.2	299688000	145.94
156	13	November	0.2	0.0129	0	0.321	0.446	114.3	302176000	145.95
157	13.1	December	0.21	0.0132	0	0.321	0.446	114.3	304675000	145.96
158	13.2	January	0.21	0.0136	0	0.321	0.446	114.3	307178000	145.97
159	13.3	February	0.21	0.0139	0	0.322	0.447	114.3	309678000	145.99
160	13.3	March	0.21	0.0142	0	0.322	0.447	114.3	312179000	146
161	13.4	April	0.21	0.0144	0	0.323	0.448	114.3	315179000	146.01
162	13.5	May	0.22	0.0145	0	0.324	0.45	114.3	317780000	146.03
163	13.6	June	0.22	0.0145	0	0.328	0.453	114.3	320381000	146.04

164	13.7	July	0.22	0.0146	0	0.33	0.456	114.4	32258100	146.05
165	13.8	August	0.23	0.0146	0	0.343	0.459	111.1	32338200	146.07
166	13.8	September	0.23	0.0147	0	0.344	0.46	111.4	32818300	146.08
167	13.9	October	0.23	0.0149	0	0.346	0.462	111.4	34078300	146.09
168	14	November	0.23	0.015	0	0.346	0.462	111.4	33348400	146.11
169	14.1	December	0.23	0.0153	0	0.346	0.463	111.4	34610100	146.12
170	14.2	January	0.24	0.0157	0	0.347	0.463	111.4	33881900	146.13
171	14.3	February	0.24	0.016	0	0.347	0.463	114.4	34133700	146.15
172	14.3	March	0.24	0.0164	0	0.347	0.463	114.4	34425400	146.16
173	14.4	April	0.24	0.0166	0	0.338	0.464	114.5	34697200	146.18
174	14.5	May	0.25	0.0167	0	0.34	0.466	114.5	34969000	146.19
175	14.6	June	0.25	0.0167	0	0.343	0.469	114.5	35240700	146.2
176	14.7	July	0.25	0.0168	0	0.345	0.472	114.5	35512500	146.22
177	14.8	August	0.26	0.0169	0	0.348	0.475	114.5	35784200	146.23
178	14.8	September	0.26	0.017	0	0.349	0.477	111.5	36056000	146.25
179	14.9	October	0.27	0.0171	0	0.35	0.478	111.5	36427800	146.26
180	15	November	0.27	0.0173	0	0.351	0.478	111.5	36599500	146.28
181	15.1	December	0.27	0.0176	0	0.351	0.479	111.6	36883500	146.29
182	15.2	January	0.27	0.018	0	0.351	0.479	111.6	37167500	146.31
183	15.3	February	0.27	0.0183	0	0.352	0.48	111.6	37431500	146.32
184	15.3	March	0.28	0.0186	0	0.352	0.48	114.6	37745500	146.34
185	15.4	April	0.28	0.0188	0	0.353	0.481	114.6	38019500	146.35
186	15.5	May	0.28	0.0189	0	0.355	0.483	114.6	38203500	146.37
187	15.6	June	0.29	0.019	0	0.357	0.485	114.6	38587500	146.38
188	15.7	July	0.29	0.0191	0	0.359	0.487	114.6	38871500	146.4
189	15.8	August	0.29	0.0192	0	0.361	0.49	114.7	39155500	146.41
190	15.8	September	0.3	0.0193	0	0.363	0.491	114.7	39439500	146.43
191	15.9	October	0.3	0.0195	0	0.364	0.492	111.7	39723500	146.44
192	16	November	0.3	0.0198	0	0.364	0.493	111.7	40007500	146.46
193	16.1	December	0.31	0.0202	0	0.364	0.493	111.7	40304200	146.47
194	16.2	January	0.31	0.0206	0	0.364	0.493	111.7	40601000	146.49
195	16.3	February	0.31	0.021	0	0.365	0.494	111.7	40897800	146.5
196	16.3	March	0.31	0.0213	0	0.365	0.494	111.8	41194600	146.52
197	16.4	April	0.32	0.0215	0	0.366	0.495	114.8	41491300	146.54
198	16.5	May	0.32	0.0216	0	0.367	0.497	114.8	41788100	146.55
199	16.6	June	0.33	0.0218	0	0.369	0.499	114.8	42084900	146.57
200	16.7	July	0.33	0.0218	0	0.371	0.501	114.8	42381600	146.58
201	16.8	August	0.33	0.0219	0	0.373	0.503	114.8	42678400	146.6
202	16.8	September	0.34	0.0221	0	0.375	0.505	114.8	42975200	146.62
203	16.9	October	0.34	0.0222	0	0.376	0.506	114.8	43272000	146.63
204	17	November	0.34	0.0226	0	0.377	0.507	111.9	43568700	146.65
205	17.1	December	0.35	0.0231	0	0.377	0.507	111.9	43878900	146.67

206	17.2	January	0.35	0.0235	0	0.377	0.507	114.9	44189000	146.68
207	17.3	February	0.35	0.0249	0	0.377	0.508	114.9	44499100	146.7
208	17.3	March	0.35	0.0241	0	0.378	0.509	114.9	44809300	146.72
209	17.4	April	0.36	0.0244	0	0.379	0.509	114.9	45119400	146.73
210	17.5	May	0.36	0.0246	0	0.38	0.511	114.9	45429500	146.75
211	17.6	June	0.37	0.0247	0	0.382	0.512	115	45739600	146.77
212	17.7	July	0.37	0.0248	0	0.384	0.515	115	46049800	146.79
213	17.8	August	0.38	0.0249	0	0.387	0.518	115	46359900	146.8
214	17.8	September	0.38	0.025	0	0.388	0.519	115	46670000	146.82
215	17.9	October	0.38	0.0252	0	0.389	0.52	115	46980200	146.84
216	18	November	0.39	0.0255	0	0.389	0.521	115	47290300	146.86
217	18.1	December	0.39	0.0261	0	0.389	0.521	115	47614400	146.87
218	18.2	January	0.39	0.0265	0	0.389	0.521	115.1	47938400	146.89
219	18.3	February	0.39	0.027	0	0.39	0.521	115.1	48262500	146.91
220	18.3	March	0.39	0.0275	0	0.39	0.522	115.1	48586600	146.93
221	18.4	April	0.4	0.0278	0	0.39	0.522	115.1	48910700	146.94
222	18.5	May	0.4	0.0279	0	0.392	0.524	115.1	49234800	146.96
223	18.6	June	0.41	0.028	0	0.395	0.527	115.1	49558900	146.98
224	18.7	July	0.41	0.0281	0	0.398	0.53	115.1	49883000	147
225	18.8	August	0.42	0.0282	0	0.401	0.533	115.2	50207000	147.02
226	18.8	September	0.42	0.0283	0	0.402	0.535	115.2	50531100	147.04
227	18.9	October	0.42	0.0285	0	0.403	0.536	115.2	50855200	147.06
228	19	November	0.43	0.0288	0	0.404	0.536	115.2	51179300	147.07
229	19.1	December	0.43	0.0292	0	0.404	0.537	115.2	51503400	147.09
230	19.2	January	0.43	0.0297	0	0.404	0.537	115.2	51827500	147.11
231	19.3	February	0.43	0.0303	0	0.404	0.537	115.3	52151600	147.13
232	19.3	March	0.44	0.0308	0	0.405	0.538	115.3	52475700	147.15
233	19.4	April	0.44	0.0311	0	0.405	0.538	115.3	52800000	147.17
234	19.5	May	0.45	0.0313	0	0.407	0.54	115.3	53124100	147.19
235	19.6	June	0.45	0.0314	0	0.41	0.543	115.3	53448200	147.21
236	19.7	July	0.46	0.0314	0	0.413	0.546	115.3	53772300	147.23
237	19.8	August	0.47	0.0316	0	0.415	0.549	115.3	54096400	147.25
238	19.8	September	0.47	0.0317	0	0.417	0.551	115.4	54420500	147.27
239	19.9	October	0.47	0.0319	0	0.418	0.552	115.4	54744600	147.29
240	20	November	0.48	0.0322	0	0.418	0.552	115.4	55068700	147.31

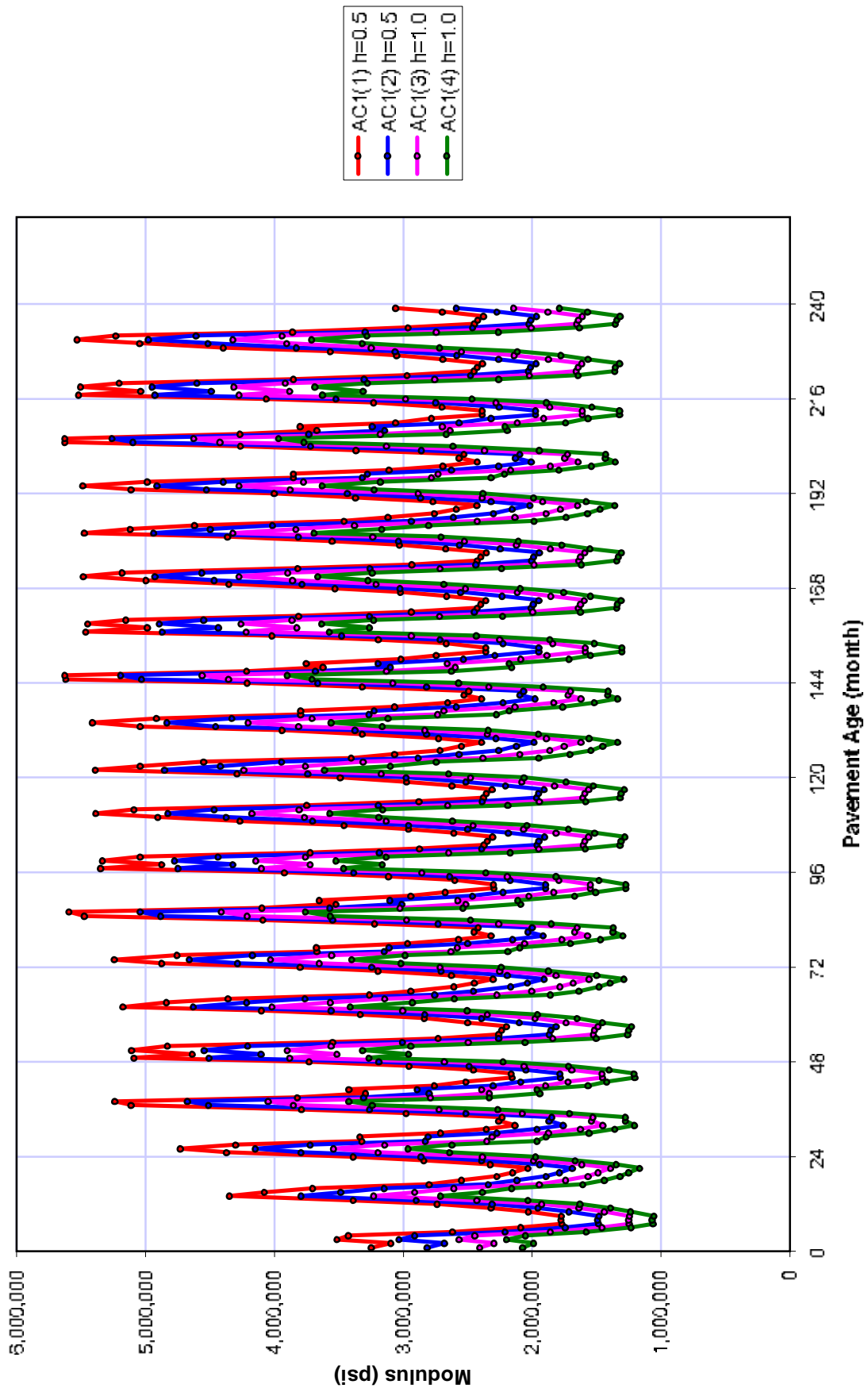
Subseason Layer Modulus: Project AC2005

Time step	Subseasonal Modulus										Subseasonal Modulus										Subseasonal Modulus										Subseasonal Modulus																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000





Asphalt Sub-Layers Modulus Vs Time



## Fatigue Cracking: Project AC2005

Payement age mo yr	Month	Top Down at Surface				Top Down at 4.5"				Bottom Up at 1bc				Reliability	
		Maximum Damage (%)	Maximum Cracking (ft/mi)	Location (ft)	Maximum Damage (%)	Maximum Cracking (ft/mi)	Location (ft)	Maximum Damage (%)	Maximum Cracking (ft/mi)	Location (ft)	Maximum Damage (%)	Maximum Cracking (ft/mi)	Location (ft)	Top Down Cracking (ft/mi)	Bottom Up Cracking (%)
1	0.08	December	0.000336	0	0	0.00013	0	0	1.86F.06	0	0	0	257.01	0.7	
2	0.17	January	0.000664	0	0	0.000255	0	0	3.53F.06	0	0	0	257.49	0.7	
3	0.25	February	0.000995	0	0	0.000382	0	0	5.94F.06	0	0	0	257.97	0.7	
4	0.33	March	0.00134	0	0	0.000517	0	0	0.0000085	0	0	0	238.45	0.7	
5	0.42	April	0.00179	0	0	0.000706	0	0	9.98F.06	0	0	0	239.08	0.7	
6	0.5	May	0.00243	0	0	0.001	0	0	0.0000116	0	0	0	239.95	0.7	
7	0.58	June	0.00315	0	0	0.00134	0	0	0.0000141	0	0	0	260.93	0.7	
8	0.67	July	0.00388	0	0	0.00168	0	0	0.0000147	0	0	0	261.88	0.7	
9	0.75	August	0.00462	0	0	0.00202	0	0	0.0000163	0	0	0	262.85	0.7	
10	0.83	September	0.0052	0	0	0.00228	0	0	0.0000174	0	0	0	263.6	0.7	
11	0.92	October	0.00572	0	0	0.00251	0	0	0.0000188	0	0	0	264.27	0.7	
12	1	November	0.00613	0	0	0.00267	0	0	0.0000207	0	0	0	264.8	0.7	
13	1.08	December	0.00649	0	0	0.00281	0	0	0.0000238	0	0	0	265.26	0.7	
14	1.17	January	0.0068	0	0	0.00293	0	0	0.0000287	0	0	0	265.65	0.7	
15	1.25	February	0.00714	0.01	0	0.00306	0	0	0.0000336	0	0	0	266.08	0.7	
16	1.33	March	0.0075	0.01	0	0.0032	0	0	0.0000378	0	0	0	266.54	0.7	
17	1.42	April	0.00802	0.01	0	0.00342	0	0	0.0000403	0	0	0	267.19	0.7	
18	1.5	May	0.00861	0.01	0	0.00363	0	0	0.0000424	0	0	0	267.93	0.7	
19	1.58	June	0.00918	0.01	0	0.00383	0	0	0.0000439	0	0	0	268.64	0.7	
20	1.67	July	0.00982	0.01	0	0.00422	0	0	0.0000455	0	0	0	269.44	0.7	
21	1.75	August	0.0105	0.01	0	0.00452	0	0	0.0000471	0	0	0	270.28	0.7	
22	1.83	September	0.011	0.01	0	0.00476	0	0	0.0000487	0	0	0	270.89	0.7	
23	1.92	October	0.0115	0.01	0	0.00494	0	0	0.0000509	0	0	0	271.51	0.7	
24	2	November	0.0118	0.01	0	0.00507	0	0	0.0000545	0	0	0	271.87	0.7	
25	2.08	December	0.0121	0.01	0	0.00518	0	0	0.0000605	0	0	0	272.24	0.7	
26	2.17	January	0.0124	0.01	0	0.00528	0	0	0.0000674	0	0	0	272.61	0.7	
27	2.25	February	0.0127	0.01	0	0.0054	0	0	0.0000732	0	0	0	272.97	0.7	
28	2.33	March	0.0131	0.01	0	0.00556	0	0	0.0000768	0	0	0	273.46	0.7	
29	2.42	April	0.0136	0.01	0	0.00574	0	0	0.0000807	0	0	0	274.07	0.7	
30	2.5	May	0.0141	0.01	0	0.00597	0	0	0.000083	0	0	0	274.67	0.7	
31	2.58	June	0.0147	0.02	0	0.00621	0	0	0.0000847	0	0	0	275.4	0.7	
32	2.67	July	0.0153	0.02	0	0.0065	0	0	0.0000864	0	0	0	276.12	0.7	
33	2.75	August	0.0159	0.02	0	0.00677	0	0	0.0000882	0	0	0	276.81	0.7	
34	2.83	September	0.0165	0.02	0	0.00704	0.01	0	0.00009	0	0	0	277.56	7.31	
35	2.92	October	0.017	0.02	0	0.00721	0.01	0	0.0000929	0	0	0	278.15	0.7	
36	3	November	0.0173	0.02	0	0.00734	0.01	0	0.0000977	0	0	0	278.51	0.7	
37	3.08	December	0.0176	0.02	0	0.00744	0.01	0	0.000106	0	0	0	278.87	0.7	



38	3.17	January	0.0179	0.02	0	0.00754	0.01	0	0.000114	0	0	0	279.23	0.7
39	3.23	February	0.0182	0.02	0	0.00767	0.01	0	0.000119	0	0	0	279.58	0.7
40	3.33	March	0.0187	0.02	0	0.00783	0.01	0	0.000122	0	0	0	280.18	0.7
41	3.42	April	0.0191	0.02	0	0.008	0.01	0	0.000126	0	0	0	280.65	0.7
42	3.5	May	0.0196	0.02	0	0.00821	0.01	0	0.000129	0	0	0	281.24	0.7
43	3.58	June	0.0202	0.03	0	0.00846	0.01	0	0.000131	0	0	0	281.95	0.7
44	3.67	July	0.0209	0.03	0	0.00877	0.01	0	0.000133	0	0	0	282.77	0.7
45	3.75	August	0.0215	0.03	0	0.00906	0.01	0	0.000135	0	0	0	283.48	0.7
46	3.83	September	0.0221	0.03	0	0.00928	0.01	0	0.000137	0	0	0	284.18	0.7
47	3.92	October	0.0225	0.03	0	0.00945	0.01	0	0.00014	0	0	0	284.65	0.7
48	4	November	0.0228	0.03	0	0.00958	0.01	0	0.000144	0	0	0	285	0.7
49	4.08	December	0.0231	0.03	0	0.00967	0.01	0	0.000153	0	0	0	285.35	0.7
50	4.17	January	0.0234	0.03	0	0.00976	0.01	0	0.000161	0	0	0	285.7	0.7
51	4.25	February	0.0237	0.03	0	0.00987	0.01	0	0.000169	0	0	0	286.05	0.7
52	4.33	March	0.024	0.03	0	0.00998	0.01	0	0.000177	0	0	0	286.39	0.7
53	4.42	April	0.0244	0.03	0	0.0101	0.01	0	0.000181	0	0	0	286.86	0.7
54	4.5	May	0.025	0.04	0	0.0104	0.01	0	0.000184	0	0	0	287.56	0.7
55	4.58	June	0.0257	0.04	0	0.0107	0.01	0	0.000186	0	0	0	288.37	0.7
56	4.67	July	0.0264	0.04	0	0.011	0.01	0	0.000188	0	0	0	289.18	0.7
57	4.75	August	0.0271	0.04	0	0.0113	0.01	0	0.00019	0	0	0	289.98	0.7
58	4.83	September	0.0277	0.04	0	0.0116	0.01	0	0.000193	0	0	0	290.67	0.7
59	4.92	October	0.0282	0.04	0	0.0118	0.01	0	0.000195	0	0	0	291.25	0.7
60	5	November	0.0286	0.04	0	0.012	0.01	0	0.0002	0	0	0	291.71	0.7
61	5.08	December	0.029	0.04	0	0.0121	0.01	0	0.000206	0	0	0	292.16	0.7
62	5.17	January	0.0293	0.04	0	0.0122	0.01	0	0.000215	0	0	0	292.51	0.7
63	5.25	February	0.0296	0.05	0	0.0123	0.01	0	0.000223	0	0	0	292.85	0.7
64	5.33	March	0.03	0.05	0	0.0124	0.01	0	0.000231	0	0	0	293.31	0.7
65	5.42	April	0.0305	0.05	0	0.0127	0.01	0	0.000245	0	0	0	293.88	0.7
66	5.5	May	0.0311	0.05	0	0.0129	0.01	0	0.000238	0	0	0	294.56	0.7
67	5.58	June	0.0317	0.05	0	0.0132	0.01	0	0.000241	0	0	0	295.25	0.7
68	5.67	July	0.0323	0.05	0	0.0134	0.01	0	0.000243	0	0	0	295.93	0.7
69	5.75	August	0.033	0.05	0	0.0137	0.01	0	0.000245	0	0	0	296.72	0.7
70	5.83	September	0.0336	0.06	0	0.014	0.01	0	0.000248	0	0	0	297.4	0.7
71	5.92	October	0.0341	0.06	0	0.0142	0.01	0	0.000251	0	0	0	297.97	0.7
72	6	November	0.0344	0.06	0	0.0143	0.02	0	0.000257	0	0	0	298.51	0.7
73	6.08	December	0.0347	0.06	0	0.0144	0.02	0	0.000266	0	0	0	298.64	0.7
74	6.17	January	0.035	0.06	0	0.0145	0.02	0	0.000277	0	0	0	298.98	0.7
75	6.25	February	0.0354	0.06	0	0.0146	0.02	0	0.000285	0	0	0	299.43	0.7
76	6.33	March	0.0358	0.06	0	0.0148	0.02	0	0.000291	0	0	0	299.88	0.71
77	6.42	April	0.0362	0.06	0	0.015	0.02	0	0.000296	0	0	0	300.33	0.71
78	6.5	May	0.0368	0.06	0	0.0152	0.02	0	0.0003	0	0	0	301.01	0.71
79	6.58	June	0.0374	0.07	0	0.0155	0.02	0	0.000302	0	0	0	301.68	0.71

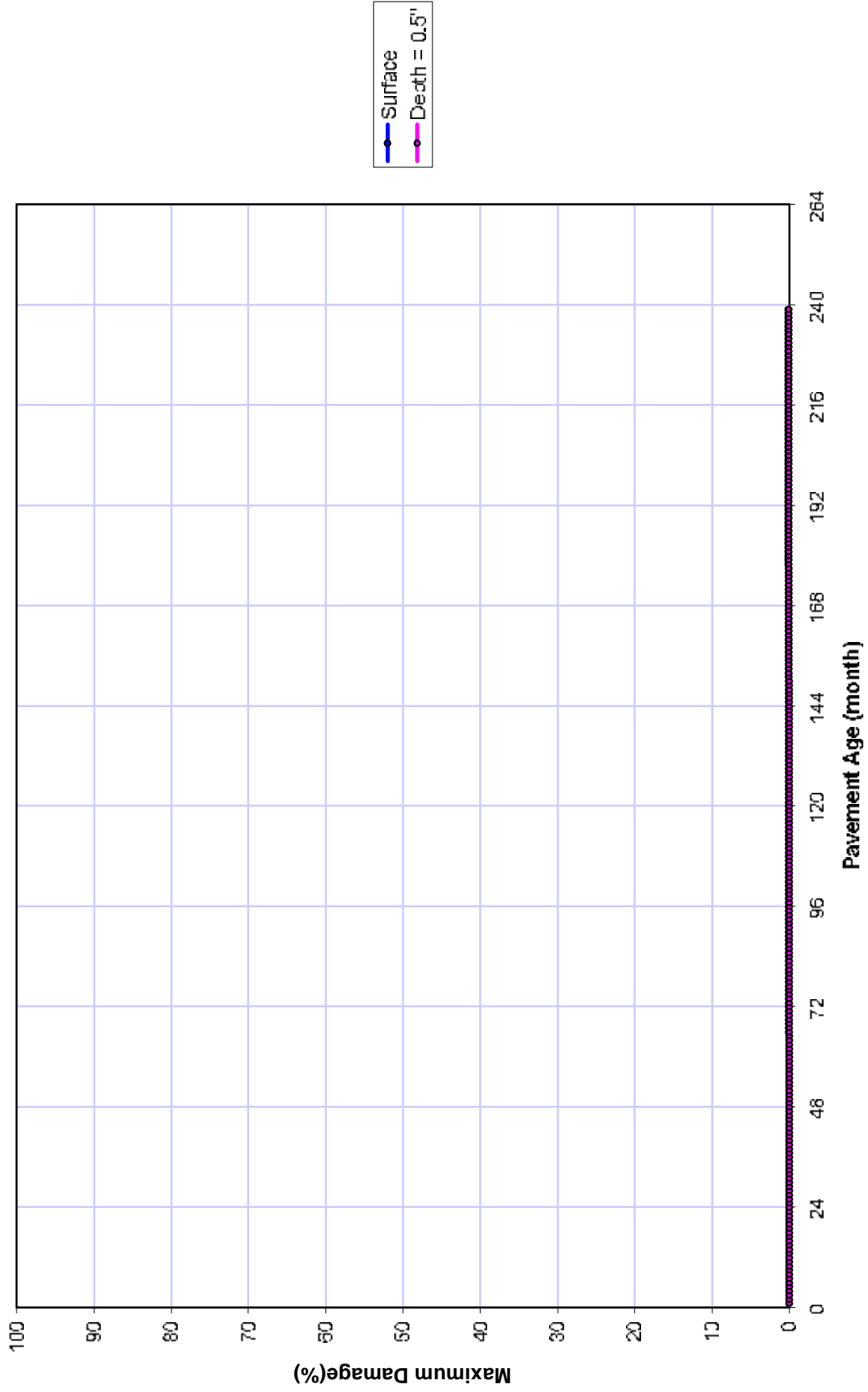
80	6:67	July	0.0381	0.07	0	0.0158	0.02	0	0.000304	0	0	302.47	0.71
81	6:75	August	0.0388	0.07	0	0.0161	0.02	0	0.000307	0	0	303.25	0.71
82	6:83	September	0.0395	0.07	0	0.0164	0.02	0	0.000309	0	0	304.03	0.71
83	6:92	October	0.0399	0.07	0	0.0165	0.02	0	0.000313	0	0	304.48	0.71
84	7	November	0.0403	0.07	0	0.0167	0.02	0	0.00032	0	0	304.92	0.71
85	7:08	December	0.0406	0.07	0	0.0168	0.02	0	0.000331	0	0	305.26	0.71
86	7:17	January	0.0409	0.07	0	0.0169	0.02	0	0.000343	0	0	305.59	0.71
87	7:25	February	0.0413	0.08	0	0.017	0.02	0	0.000349	0	0	306.04	0.71
88	7:33	March	0.0417	0.08	0	0.0172	0.02	0	0.000354	0	0	306.48	0.71
89	7:42	April	0.0422	0.08	0	0.0173	0.02	0	0.00036	0	0	307.04	0.71
90	7:5	May	0.0428	0.08	0	0.0176	0.02	0	0.000364	0	0	307.7	0.71
91	7:28	June	0.0434	0.08	0	0.0179	0.02	0	0.000366	0	0	308.37	0.71
92	7:67	July	0.0441	0.08	0	0.0182	0.02	0	0.000369	0	0	309.14	0.71
93	7:75	August	0.0447	0.09	0	0.0185	0.02	0	0.000371	0	0	309.8	0.71
94	7:83	September	0.0453	0.09	0	0.0187	0.02	0	0.000374	0	0	310.16	0.71
95	7:92	October	0.0457	0.09	0	0.0188	0.02	0	0.000378	0	0	310.9	0.71
96	8	November	0.046	0.09	0	0.019	0.02	0	0.000385	0.01	0	311.24	0.71
97	8:08	December	0.0463	0.09	0	0.019	0.02	0	0.000397	0.01	0	311.57	0.71
98	8:17	January	0.0466	0.09	0	0.0191	0.02	0	0.000406	0.01	0	311.89	0.71
99	8:25	February	0.0469	0.09	0	0.0192	0.02	0	0.000416	0.01	0	312.23	0.71
100	8:33	March	0.0472	0.09	0	0.0193	0.02	0	0.000427	0.01	0	312.55	0.71
101	8:42	April	0.0476	0.09	0	0.0195	0.02	0	0.000433	0.01	0	312.99	0.71
102	8:5	May	0.0482	0.1	0	0.0197	0.02	0	0.000436	0.01	0	313.65	0.71
103	8:58	June	0.0489	0.1	0	0.0201	0.03	0	0.000439	0.01	0	314.42	0.71
104	8:67	July	0.0496	0.1	0	0.0204	0.03	0	0.000442	0.01	0	315.18	0.71
105	8:75	August	0.0503	0.1	0	0.0207	0.03	0	0.000444	0.01	0	315.95	0.71
106	8:83	September	0.0508	0.1	0	0.0209	0.03	0	0.000447	0.01	0	316.49	0.71
107	8:92	October	0.0513	0.11	0	0.0211	0.03	0	0.000451	0.01	0	317.01	0.71
108	9	November	0.0517	0.11	0	0.0212	0.03	0	0.000457	0.01	0	317.48	0.71
109	9:08	December	0.0524	0.11	0	0.0214	0.03	0	0.000465	0.01	0	317.8	0.71
110	9:17	January	0.0524	0.11	0	0.0215	0.03	0	0.000475	0.01	0	318.24	0.71
111	9:25	February	0.0527	0.11	0	0.0216	0.03	0	0.000486	0.01	0	318.56	0.71
112	9:33	March	0.0531	0.11	0	0.0217	0.03	0	0.000497	0.01	0	319	0.71
113	9:42	April	0.0536	0.11	0	0.0219	0.03	0	0.000503	0.01	0	319.54	0.71
114	9:5	May	0.0543	0.12	0	0.0222	0.03	0	0.000507	0.01	0	320.3	0.71
115	9:58	June	0.0552	0.12	0	0.0226	0.03	0	0.00051	0.01	0	321.27	0.71
116	9:67	July	0.056	0.12	0	0.0229	0.03	0	0.000513	0.01	0	322.14	0.71
117	9:75	August	0.0568	0.12	0	0.0233	0.03	0	0.000516	0.01	0	323	0.71
118	9:83	September	0.0575	0.13	0	0.0236	0.03	0	0.000519	0.01	0	323.76	0.71
119	9:92	October	0.0581	0.13	0	0.0238	0.03	0	0.000523	0.01	0	324.4	0.71
120	10	November	0.0585	0.13	0	0.0241	0.03	0	0.000529	0.01	0	324.83	0.71
121	10:1	December	0.0589	0.13	0	0.0241	0.03	0	0.000538	0.01	0	325.26	0.71

122	10.2	January	0.0593	0.13	0	0.0243	0.03	0	0.00055	0.01	0	325.69	0.71
123	10.3	February	0.0597	0.13	0	0.0244	0.03	0	0.000562	0.01	0	326.12	0.71
124	10.3	March	0.0602	0.13	0	0.0246	0.03	0	0.000573	0.01	0	326.66	0.71
125	10.4	April	0.0608	0.14	0	0.0248	0.04	0	0.000579	0.01	0	327.3	0.71
126	10.5	May	0.0615	0.14	0	0.0251	0.04	0	0.000583	0.01	0	328.05	0.71
127	10.6	June	0.0622	0.14	0	0.0254	0.04	0	0.000586	0.01	0	328.8	0.71
128	10.7	July	0.063	0.14	0	0.0258	0.04	0	0.000589	0.01	0	329.65	0.71
129	10.8	August	0.0638	0.15	0	0.0261	0.04	0	0.000592	0.01	0	330.51	0.71
130	10.8	September	0.0645	0.15	0	0.0264	0.04	0	0.000596	0.01	0	331.25	0.71
131	10.9	October	0.065	0.15	0	0.0266	0.04	0	0.000601	0.01	0	331.78	0.71
132	11	November	0.0655	0.15	0	0.0267	0.04	0	0.000609	0.01	0	332.32	0.71
133	11.1	December	0.0658	0.15	0	0.0269	0.04	0	0.000621	0.01	0	332.63	0.71
134	11.2	January	0.0662	0.16	0	0.027	0.04	0	0.000634	0.01	0	333.06	0.71
135	11.3	February	0.0666	0.16	0	0.0271	0.04	0	0.000646	0.01	0	333.48	0.71
136	11.3	March	0.0671	0.16	0	0.0273	0.04	0	0.000653	0.01	0	334.01	0.71
137	11.4	April	0.0676	0.16	0	0.0275	0.04	0	0.000661	0.01	0	334.54	0.71
138	11.5	May	0.0683	0.16	0	0.0278	0.04	0	0.000666	0.01	0	335.29	0.71
139	11.6	June	0.0691	0.17	0	0.0281	0.04	0	0.000669	0.01	0	336.13	0.71
140	11.7	July	0.0699	0.17	0	0.0285	0.04	0	0.000672	0.01	0	336.98	0.71
141	11.8	August	0.0707	0.17	0	0.0288	0.04	0	0.000675	0.01	0	337.82	0.71
142	11.8	September	0.0715	0.17	0	0.0292	0.04	0	0.000678	0.01	0	338.66	0.71
143	11.9	October	0.0721	0.18	0	0.0294	0.05	0	0.000684	0.01	0	339.3	0.72
144	12	November	0.0725	0.18	0	0.0296	0.05	0	0.000693	0.01	0	339.71	0.72
145	12.1	December	0.0729	0.18	0	0.0297	0.05	0	0.000707	0.01	0	340.14	0.72
146	12.2	January	0.0733	0.18	0	0.0298	0.05	0	0.000732	0.01	0	340.56	0.72
147	12.3	February	0.0737	0.18	0	0.03	0.05	0	0.00073	0.01	0	340.98	0.72
148	12.3	March	0.0742	0.19	0	0.0302	0.05	0	0.000737	0.01	0	341.5	0.72
149	12.4	April	0.0748	0.19	0	0.0304	0.05	0	0.000745	0.01	0	342.13	0.72
150	12.5	May	0.0755	0.19	0	0.0307	0.05	0	0.00075	0.01	0	342.86	0.72
151	12.6	June	0.0763	0.19	0	0.031	0.05	0	0.000753	0.01	0	343.7	0.72
152	12.7	July	0.0771	0.2	0	0.0313	0.05	0	0.000757	0.01	0	344.54	0.72
153	12.8	August	0.0779	0.2	0	0.0317	0.05	0	0.00076	0.01	0	345.37	0.72
154	12.8	September	0.0785	0.2	0	0.032	0.05	0	0.000764	0.01	0	346	0.72
155	12.9	October	0.079	0.2	0	0.0322	0.05	0	0.000769	0.01	0	346.52	0.72
156	13	November	0.0794	0.2	0	0.0323	0.05	0	0.000778	0.01	0	346.93	0.72
157	13.1	December	0.0798	0.21	0	0.0324	0.05	0	0.000793	0.01	0	347.35	0.72
158	13.2	January	0.0801	0.21	0	0.0325	0.05	0	0.000806	0.01	0	347.66	0.72
159	13.3	February	0.0804	0.21	0	0.0326	0.05	0	0.000819	0.01	0	347.97	0.72
160	13.3	March	0.0808	0.21	0	0.0328	0.05	0	0.000832	0.01	0	348.39	0.72
161	13.4	April	0.0813	0.21	0	0.033	0.05	0	0.00084	0.01	0	348.91	0.72
162	13.5	May	0.082	0.22	0	0.0333	0.05	0	0.000815	0.01	0	349.63	0.72
163	13.6	June	0.0829	0.22	0	0.0336	0.06	0	0.000848	0.01	0	350.57	0.72

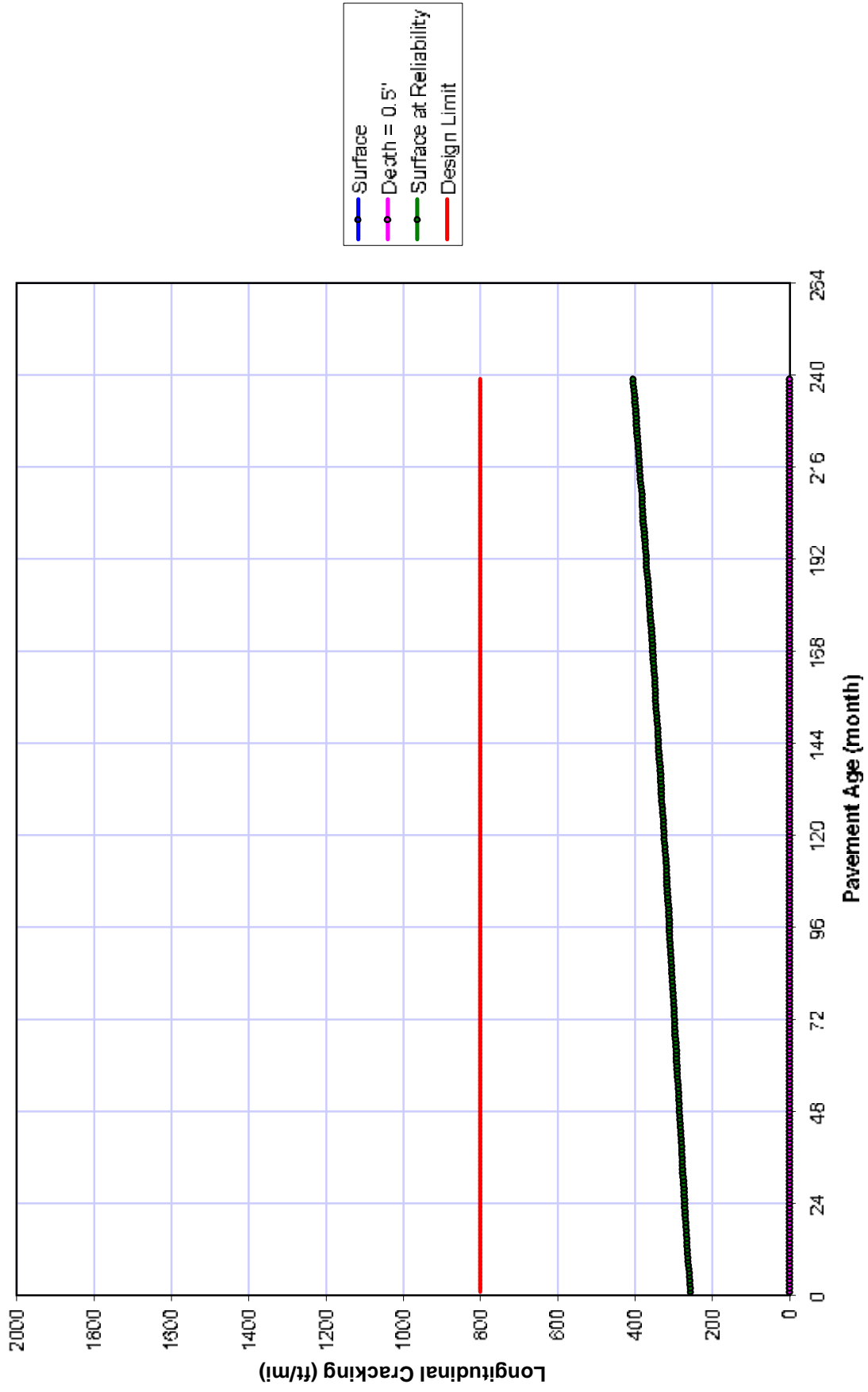
164	13.7	July	0.0837	0.22	0	0.0334	0.06	0	0.000852	0.01	0	351.39	0.72
165	13.8	August	0.0816	0.23	0	0.0413	0.06	0	0.000835	0.01	0	352.42	0.72
166	13.8	September	0.0852	0.23	0	0.0346	0.06	0	0.000859	0.01	0	352.94	0.72
167	13.9	October	0.0858	0.23	0	0.0349	0.06	0	0.000864	0.01	0	353.56	0.72
168	14	November	0.0865	0.23	0	0.035	0.06	0	0.000871	0.01	0	354.08	0.72
169	14.1	December	0.0867	0.23	0	0.0352	0.06	0	0.000882	0.02	0	354.49	0.72
170	14.2	January	0.0871	0.24	0	0.0353	0.06	0	0.000895	0.02	0	354.9	0.72
171	14.3	February	0.0876	0.24	0	0.0355	0.06	0	0.000909	0.02	0	355.42	0.72
172	14.3	March	0.088	0.24	0	0.0356	0.06	0	0.000923	0.02	0	355.83	0.72
173	14.4	April	0.0886	0.24	0	0.0359	0.06	0	0.000932	0.02	0	356.44	0.72
174	14.5	May	0.0895	0.25	0	0.0362	0.06	0	0.000937	0.02	0	357.37	0.72
175	14.6	June	0.0905	0.25	0	0.0367	0.06	0	0.000941	0.02	0	358.39	0.72
176	14.7	July	0.0915	0.25	0	0.0371	0.06	0	0.000944	0.02	0	359.42	0.72
177	14.8	August	0.0925	0.26	0	0.0376	0.07	0	0.000948	0.02	0	360.44	0.72
178	14.8	September	0.0943	0.26	0	0.0379	0.07	0	0.000952	0.02	0	361.26	0.72
179	14.9	October	0.0941	0.27	0	0.0382	0.07	0	0.000957	0.02	0	362.07	0.72
180	15	November	0.0946	0.27	0	0.0384	0.07	0	0.000964	0.02	0	362.58	0.72
181	15.1	December	0.0951	0.27	0	0.0386	0.07	0	0.000976	0.02	0	363.09	0.72
182	15.2	January	0.0956	0.27	0	0.0387	0.07	0	0.000983	0.02	0	363.6	0.72
183	15.3	February	0.0961	0.27	0	0.0389	0.07	0	0.000991	0.02	0	364.11	0.72
184	15.3	March	0.0966	0.28	0	0.0391	0.07	0	0.000992	0.02	0	364.62	0.72
185	15.4	April	0.0974	0.28	0	0.0394	0.07	0	0.00103	0.02	0	365.43	0.73
186	15.5	May	0.0982	0.28	0	0.0397	0.07	0	0.00103	0.02	0	366.24	0.73
187	15.6	June	0.0991	0.29	0	0.0401	0.07	0	0.00094	0.02	0	367.15	0.73
188	15.7	July	0.1	0.29	0	0.0405	0.07	0	0.00094	0.02	0	368.07	0.73
189	15.8	August	0.101	0.29	0	0.0409	0.07	0	0.00105	0.02	0	369.08	0.73
190	15.8	September	0.102	0.3	0	0.0413	0.08	0	0.00105	0.02	0	370.09	0.73
191	15.9	October	0.103	0.3	0	0.0416	0.08	0	0.00096	0.02	0	371.1	0.73
192	16	November	0.103	0.3	0	0.0417	0.08	0	0.00097	0.02	0	371.1	0.73
193	16.1	December	0.103	0.31	0	0.0419	0.08	0	0.00108	0.02	0	371.1	0.73
194	16.2	January	0.104	0.31	0	0.042	0.08	0	0.0011	0.02	0	372.11	0.73
195	16.3	February	0.105	0.31	0	0.0422	0.08	0	0.000912	0.02	0	373.11	0.73
196	16.3	March	0.105	0.31	0	0.0424	0.08	0	0.00113	0.02	0	373.11	0.73
197	16.4	April	0.106	0.32	0	0.0427	0.08	0	0.00113	0.02	0	374.12	0.73
198	16.5	May	0.107	0.32	0	0.043	0.08	0	0.000914	0.02	0	375.12	0.73
199	16.6	June	0.108	0.33	0	0.0434	0.08	0	0.00115	0.02	0	376.12	0.73
200	16.7	July	0.109	0.33	0	0.0439	0.08	0	0.00115	0.02	0	377.12	0.73
201	16.8	August	0.11	0.33	0	0.0443	0.08	0	0.00115	0.02	0	378.12	0.73
202	16.8	September	0.11	0.34	0	0.0447	0.09	0	0.000916	0.02	0	379.12	0.73
203	16.9	October	0.11	0.34	0	0.045	0.09	0	0.000916	0.02	0	379.13	0.73
204	17	November	0.112	0.34	0	0.0452	0.09	0	0.00118	0.02	0	380.12	0.73
205	17.1	December	0.112	0.35	0	0.0453	0.09	0	0.0012	0.02	0	380.12	0.73

206	17.2	January	0.113	0.35	0	0.0455	0.09	0	0.00 21	0.02	0	381.12	0.73
207	17.3	February	0.113	0.35	0	0.0457	0.09	0	0.00 22	0.02	0	381.12	0.73
208	17.3	March	0.114	0.35	0	0.0459	0.09	0	0.00 23	0.02	0	382.11	0.73
209	17.4	April	0.114	0.36	0	0.0462	0.09	0	0.00 24	0.02	0	382.12	0.73
210	17.5	May	0.115	0.36	0	0.0465	0.09	0	0.00 25	0.02	0	383.11	0.73
211	17.6	June	0.116	0.37	0	0.0469	0.09	0	0.00 25	0.02	0	384.1	0.73
212	17.7	July	0.117	0.37	0	0.0474	0.09	0	0.00 26	0.02	0	385.09	0.73
213	17.8	August	0.118	0.38	0	0.0478	0.09	0	0.00 26	0.02	0	386.08	0.73
214	17.8	September	0.119	0.38	0	0.0481	0.1	0	0.00 27	0.03	0	387.07	0.73
215	17.9	October	0.12	0.38	0	0.0483	0.1	0	0.00 27	0.03	0	388.06	0.73
216	18	November	0.12	0.39	0	0.0485	0.1	0	0.00 29	0.03	0	388.06	0.73
217	18.1	December	0.121	0.39	0	0.0486	0.1	0	0.00 13	0.03	0	389.05	0.73
218	18.2	January	0.121	0.39	0	0.0488	0.1	0	0.00 32	0.03	0	389.05	0.73
219	18.3	February	0.122	0.39	0	0.0489	0.1	0	0.00 24	0.03	0	390.03	0.74
220	18.3	March	0.122	0.39	0	0.0491	0.1	0	0.00 35	0.03	0	390.03	0.74
221	18.4	April	0.123	0.4	0	0.0493	0.1	0	0.00 46	0.03	0	391.01	0.74
222	18.5	May	0.123	0.4	0	0.0497	0.1	0	0.00 47	0.03	0	391.02	0.74
223	18.6	June	0.125	0.41	0	0.0501	0.1	0	0.00 38	0.03	0	392.98	0.74
224	18.7	July	0.126	0.41	0	0.0506	0.1	0	0.00 38	0.03	0	393.96	0.74
225	18.8	August	0.127	0.42	0	0.051	0.11	0	0.00 38	0.03	0	394.94	0.74
226	18.8	September	0.127	0.42	0	0.0513	0.11	0	0.00 49	0.03	0	394.95	0.74
227	18.9	October	0.128	0.42	0	0.0517	0.11	0	0.00 14	0.03	0	395.93	0.74
228	19	November	0.129	0.43	0	0.0519	0.11	0	0.00 14	0.03	0	396.9	0.74
229	19.1	December	0.129	0.43	0	0.052	0.11	0	0.00 42	0.03	0	396.9	0.74
230	19.2	January	0.13	0.43	0	0.0522	0.11	0	0.00 44	0.03	0	397.88	0.74
231	19.3	February	0.13	0.43	0	0.0524	0.11	0	0.00 45	0.03	0	397.88	0.74
232	19.3	March	0.131	0.44	0	0.0526	0.11	0	0.00 47	0.03	0	398.85	0.74
233	19.4	April	0.132	0.44	0	0.0529	0.11	0	0.00 18	0.03	0	399.83	0.74
234	19.5	May	0.133	0.45	0	0.0533	0.11	0	0.00 49	0.03	0	400.8	0.74
235	19.6	June	0.134	0.45	0	0.0539	0.11	0	0.00 49	0.03	0	401.78	0.74
236	19.7	July	0.135	0.46	0	0.0544	0.12	0	0.00 15	0.03	0	402.75	0.74
237	19.8	August	0.136	0.47	0	0.0549	0.12	0	0.00 15	0.03	0	403.72	0.74
238	19.8	September	0.137	0.47	0	0.0553	0.12	0	0.00 51	0.03	0	404.69	0.74
239	19.9	October	0.138	0.47	0	0.0557	0.12	0	0.00 52	0.03	0	405.66	0.74
240	20	November	0.139	0.48	0	0.056	0.12	0	0.00 52	0.03	0	406.62	0.74

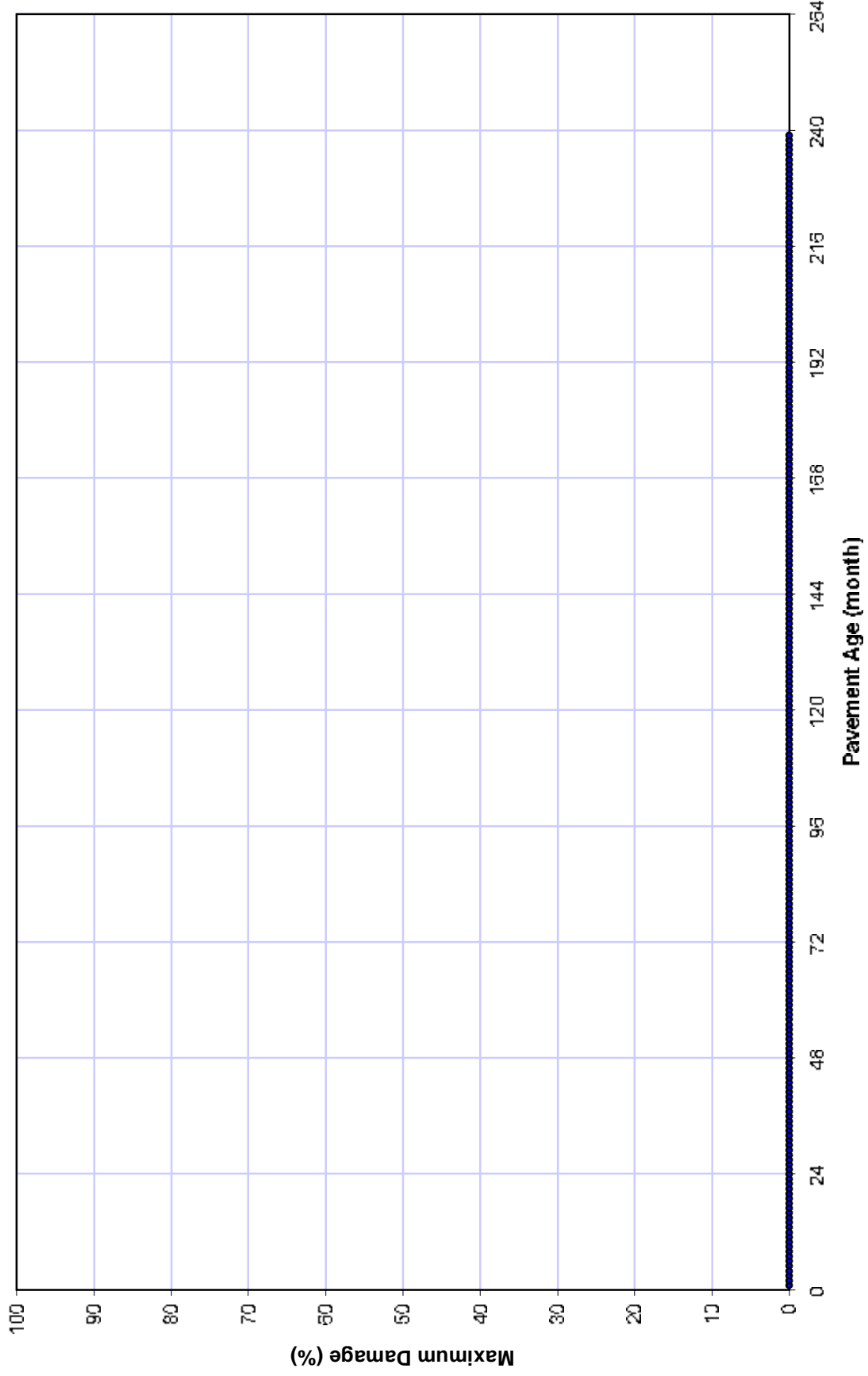
### Surface Down Cracking - Longitudinal



# Surface Down Cracking - Longitudinal

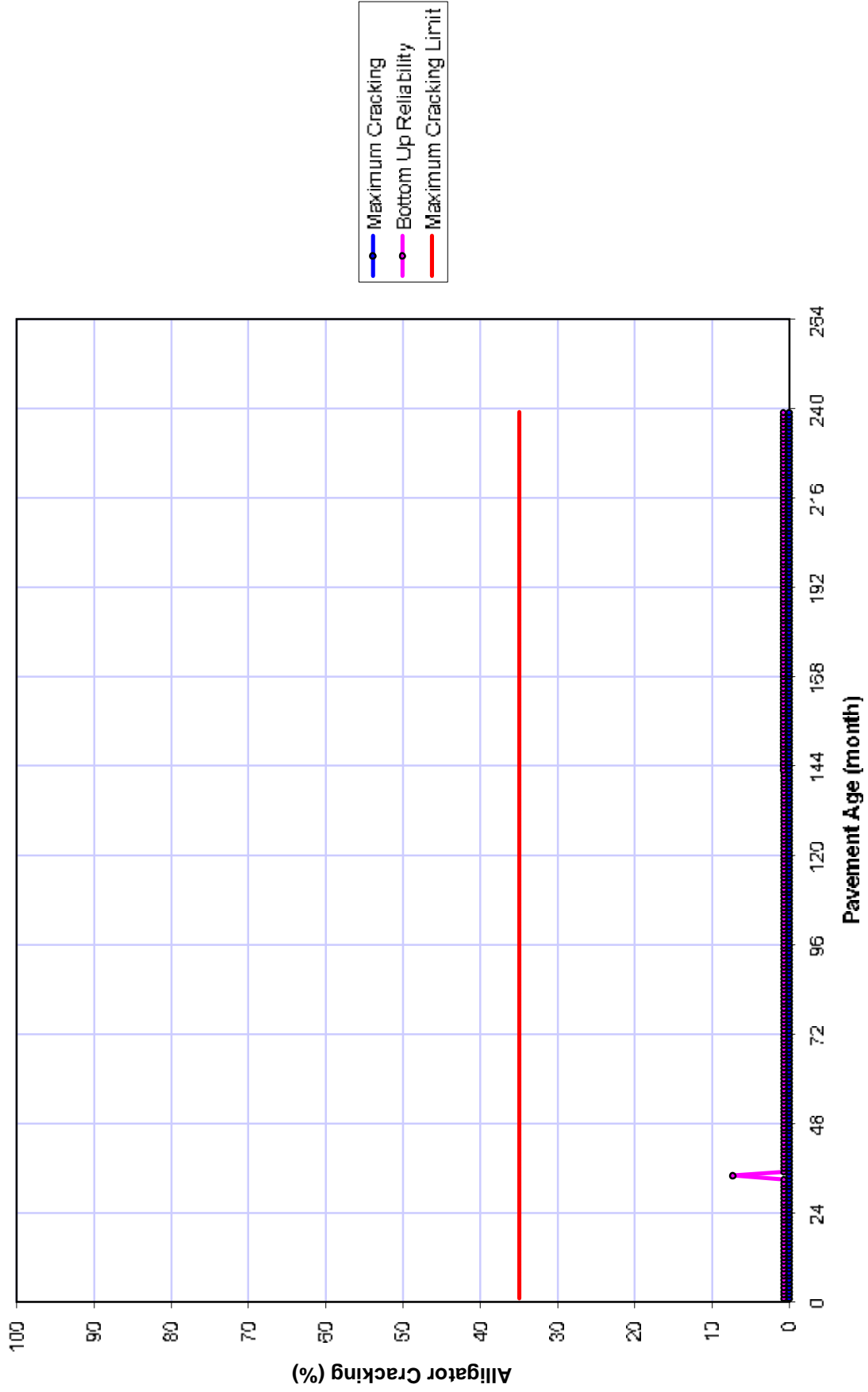


### Bottom Up Damage for Alligator Cracking





# Bottom Up Cracking - Alligator



## Thermal Cracking: Project AC2005

Pavement age		Month	Crack Depth $C_{ave}$ (in)	Depth Ratio $C/h_{ac}$	Crack Length (ft/mi)	Average Crack Spacing (ft)	Crack Length at Reliability (ft/mi)
mo	yr						
1	0.08	December	0	0	0		14.6
2	0.17	January	0	0	0		14.6
3	0.25	February	0	0	0		14.6
4	0.33	March	0	0	0		14.6
5	0.42	April	0	0	0		14.6
6	0.5	May	0	0	0		14.6
7	0.58	June	0	0	0		14.6
8	0.67	July	0	0	0		14.6
9	0.75	August	0	0	0		14.6
10	0.83	September	0	0	0		14.6
11	0.92	October	0	0	0		14.6
12	1	November	0	0	0		14.6
13	1.08	December	0	0	0		14.6
14	1.17	January	0	0	0		14.6
15	1.25	February	0	0	0		14.6
16	1.33	March	0	0	0		14.6
17	1.42	April	0	0	0		14.6
18	1.5	May	0	0	0		14.6
19	1.58	June	0	0	0		14.6
20	1.67	July	0	0	0		14.6
21	1.75	August	0	0	0		14.6
22	1.83	September	0	0	0		14.6
23	1.92	October	0	0	0		14.6
24	2	November	0	0	0		14.6
25	2.08	December	0	0	0		14.6
26	2.17	January	0	0	0		14.6
27	2.25	February	0	0	0		14.6
28	2.33	March	0	0	0		14.6
29	2.42	April	0	0	0		14.6
30	2.5	May	0	0	0		14.6
31	2.58	June	0	0	0		14.6
32	2.67	July	0	0	0		14.6
33	2.75	August	0	0	0		14.6
34	2.83	September	0	0	0		14.6
35	2.92	October	0	0	0		14.6
36	3	November	0	0	0		14.6
37	3.08	December	0	0	0		14.6
38	3.17	January	0	0	0		14.6
39	3.25	February	0	0	0		14.6
40	3.33	March	0	0	0		14.6
41	3.42	April	0	0	0		14.6
42	3.5	May	0	0	0		14.6
43	3.58	June	0	0	0		14.6
44	3.67	July	0	0	0		14.6
45	3.75	August	0	0	0		14.6
46	3.83	September	0	0	0		14.6
47	3.92	October	0	0	0		14.6
48	4	November	0	0	0		14.6
49	4.08	December	0	0	0		14.6
50	4.17	January	0	0	0		14.6
51	4.25	February	0	0	0		14.6
52	4.33	March	0	0	0		14.6
53	4.42	April	0	0	0		14.6

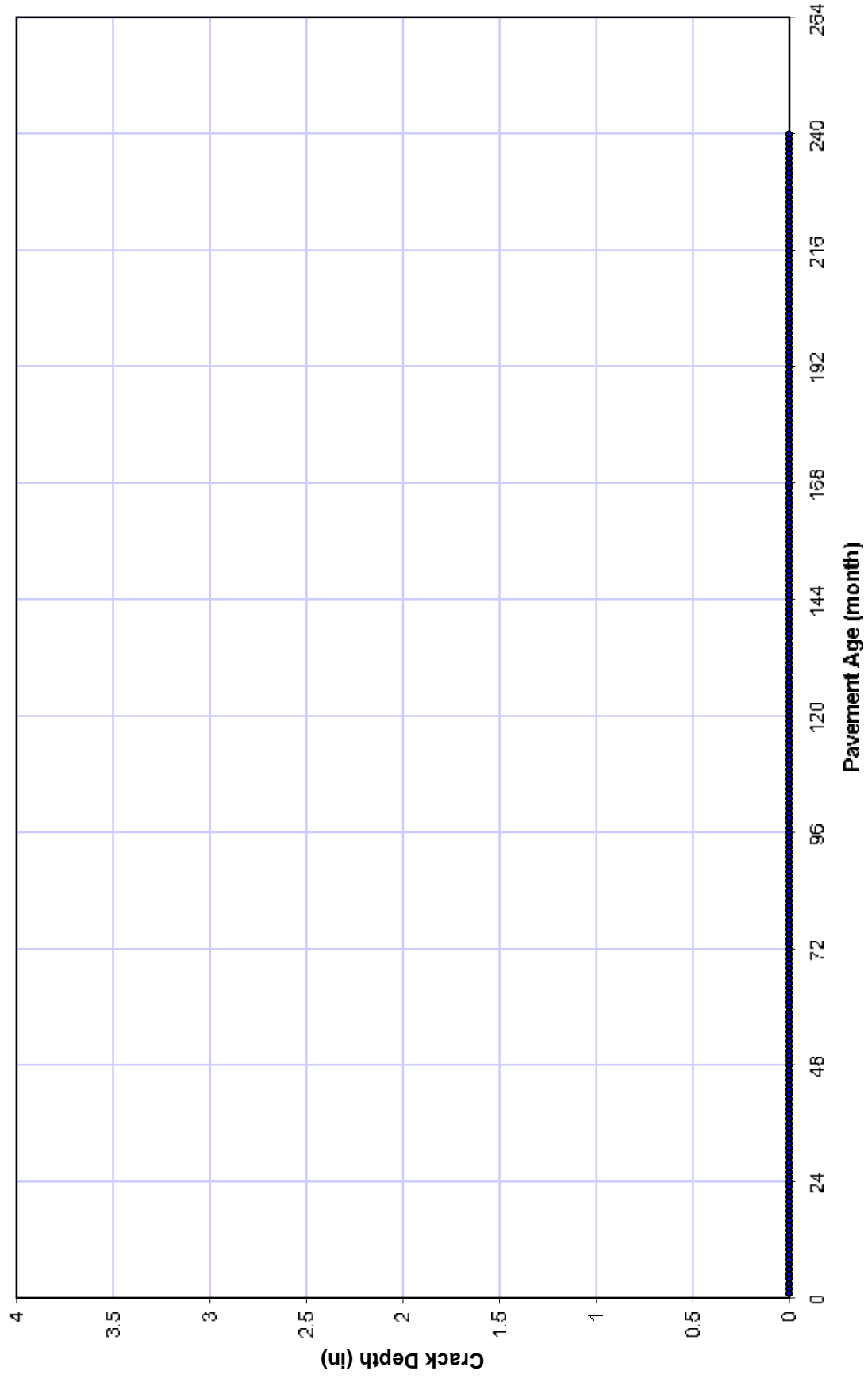
54	4.5	May	0	0	0	14.6
55	4.58	June	0	0	0	14.6
56	4.67	July	0	0	0	14.6
57	4.75	August	0	0	0	14.6
58	4.83	September	0	0	0	14.6
59	4.92	October	0	0	0	14.6
60	5	November	0	0	0	14.6
61	5.08	December	0	0	0	14.6
62	5.17	January	0	0	0	14.6
63	5.25	February	0	0	0	14.6
64	5.33	March	0	0	0	14.6
65	5.42	April	0	0	0	14.6
66	5.5	May	0	0	0	14.6
67	5.58	June	0	0	0	14.6
68	5.67	July	0	0	0	14.6
69	5.75	August	0	0	0	14.6
70	5.83	September	0	0	0	14.6
71	5.92	October	0	0	0	14.6
72	6	November	0	0	0	14.6
73	6.08	December	0	0	0	14.6
74	6.17	January	0	0	0	14.6
75	6.25	February	0	0	0	14.6
76	6.33	March	0	0	0	14.6
77	6.42	April	0	0	0	14.6
78	6.5	May	0	0	0	14.6
79	6.58	June	0	0	0	14.6
80	6.67	July	0	0	0	14.6
81	6.75	August	0	0	0	14.6
82	6.83	September	0	0	0	14.6
83	6.92	October	0	0	0	14.6
84	7	November	0	0	0	14.6
85	7.08	December	0	0	0	14.6
86	7.17	January	0	0	0	14.6
87	7.25	February	0	0	0	14.6
88	7.33	March	0	0	0	14.6
89	7.42	April	0	0	0	14.6
90	7.5	May	0	0	0	14.6
91	7.58	June	0	0	0	14.6
92	7.67	July	0	0	0	14.6
93	7.75	August	0	0	0	14.6
94	7.83	September	0	0	0	14.6
95	7.92	October	0	0	0	14.6
96	8	November	0	0	0	14.6
97	8.08	December	0	0	0	14.6
98	8.17	January	0	0	0	14.6
99	8.25	February	0	0	0	14.6
100	8.33	March	0	0	0	14.6
101	8.42	April	0	0	0	14.6
102	8.5	May	0	0	0	14.6
103	8.58	June	0	0	0	14.6
104	8.67	July	0	0	0	14.6
105	8.75	August	0	0	0	14.6
106	8.83	September	0	0	0	14.6
107	8.92	October	0	0	0	14.6
108	9	November	0	0	0	14.6
109	9.08	December	0	0	0	14.6
110	9.17	January	0	0	0	14.6
111	9.25	February	0	0	0	14.6

112	9.33	March	0	0	0	14.6
113	9.42	April	0	0	0	14.6
114	9.5	May	0	0	0	14.6
115	9.58	June	0	0	0	14.6
116	9.67	July	0	0	0	14.6
117	9.75	August	0	0	0	14.6
118	9.83	September	0	0	0	14.6
119	9.92	October	0	0	0	14.6
120	10	November	0	0	0	14.6
121	10.1	December	0	0	0	14.6
122	10.2	January	0	0	0	14.6
123	10.3	February	0	0	0	14.6
124	10.3	March	0	0	0	14.6
125	10.4	April	0	0	0	14.6
126	10.5	May	0	0	0	14.6
127	10.6	June	0	0	0	14.6
128	10.7	July	0	0	0	14.6
129	10.8	August	0	0	0	14.6
130	10.8	September	0	0	0	14.6
131	10.9	October	0	0	0	14.6
132	11	November	0	0	0	14.6
133	11.1	December	0	0	0	14.6
134	11.2	January	0	0	0	14.6
135	11.3	February	0	0	0	14.6
136	11.3	March	0	0	0	14.6
137	11.4	April	0	0	0	14.6
138	11.5	May	0	0	0	14.6
139	11.6	June	0	0	0	14.6
140	11.7	July	0	0	0	14.6
141	11.8	August	0	0	0	14.6
142	11.8	September	0	0	0	14.6
143	11.9	October	0	0	0	14.6
144	12	November	0	0	0	14.6
145	12.1	December	0	0	0	14.6
146	12.2	January	0	0	0	14.6
147	12.3	February	0	0	0	14.6
148	12.3	March	0	0	0	14.6
149	12.4	April	0	0	0	14.6
150	12.5	May	0	0	0	14.6
151	12.6	June	0	0	0	14.6
152	12.7	July	0	0	0	14.6
153	12.8	August	0	0	0	14.6
154	12.8	September	0	0	0	14.6
155	12.9	October	0	0	0	14.6
156	13	November	0	0	0	14.6
157	13.1	December	0	0	0	14.6
158	13.2	January	0	0	0	14.6
159	13.3	February	0	0	0	14.6
160	13.3	March	0	0	0	14.6
161	13.4	April	0	0	0	14.6
162	13.5	May	0	0	0	14.6
163	13.6	June	0	0	0	14.6
164	13.7	July	0	0	0	14.6
165	13.8	August	0	0	0	14.6
166	13.8	September	0	0	0	14.6
167	13.9	October	0	0	0	14.6
168	14	November	0	0	0	14.6
169	14.1	December	0	0	0	14.6

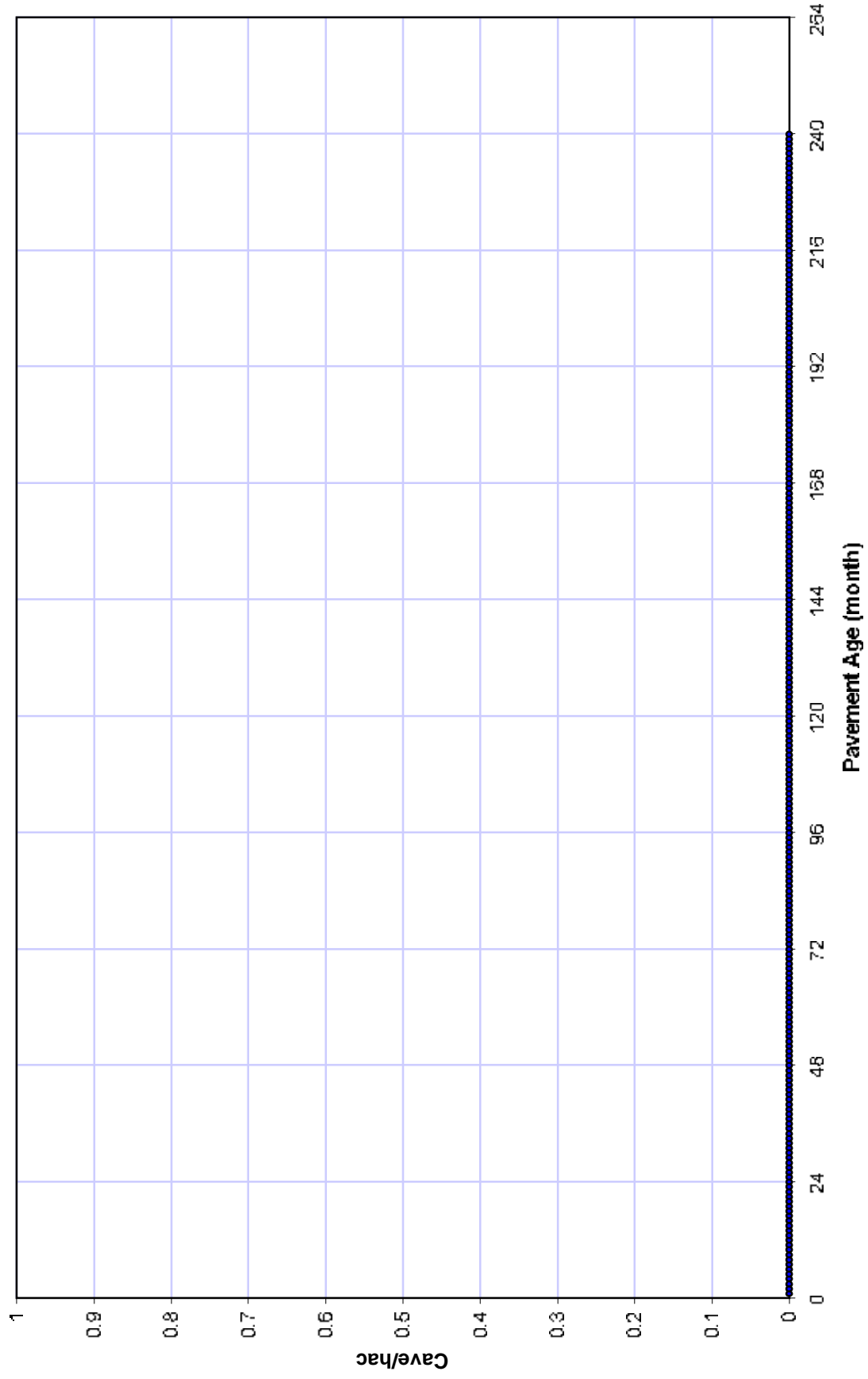
170	14.2	January	0	0	0	14.6
171	14.3	February	0	0	0	14.6
172	14.3	March	0	0	0	14.6
173	14.4	April	0	0	0	14.6
174	14.5	May	0	0	0	14.6
175	14.6	June	0	0	0	14.6
176	14.7	July	0	0	0	14.6
177	14.8	August	0	0	0	14.6
178	14.8	September	0	0	0	14.6
179	14.9	October	0	0	0	14.6
180	15	November	0	0	0	14.6
181	15.1	December	0	0	0	14.6
182	15.2	January	0	0	0	14.6
183	15.3	February	0	0	0	14.6
184	15.3	March	0	0	0	14.6
185	15.4	April	0	0	0	14.6
186	15.5	May	0	0	0	14.6
187	15.6	June	0	0	0	14.6
188	15.7	July	0	0	0	14.6
189	15.8	August	0	0	0	14.6
190	15.8	September	0	0	0	14.6
191	15.9	October	0	0	0	14.6
192	16	November	0	0	0	14.6
193	16.1	December	0	0	0	14.6
194	16.2	January	0	0	0	14.6
195	16.3	February	0	0	0	14.6
196	16.3	March	0	0	0	14.6
197	16.4	April	0	0	0	14.6
198	16.5	May	0	0	0	14.6
199	16.6	June	0	0	0	14.6
200	16.7	July	0	0	0	14.6
201	16.8	August	0	0	0	14.6
202	16.8	September	0	0	0	14.6
203	16.9	October	0	0	0	14.6
204	17	November	0	0	0	14.6
205	17.1	December	0	0	0	14.6
206	17.2	January	0	0	0	14.6
207	17.3	February	0	0	0	14.6
208	17.3	March	0	0	0	14.6
209	17.4	April	0	0	0	14.6
210	17.5	May	0	0	0	14.6
211	17.6	June	0	0	0	14.6
212	17.7	July	0	0	0	14.6
213	17.8	August	0	0	0	14.6
214	17.8	September	0	0	0	14.6
215	17.9	October	0	0	0	14.6
216	18	November	0	0	0	14.6
217	18.1	December	0	0	0	14.6
218	18.2	January	0	0	0	14.6
219	18.3	February	0	0	0	14.6
220	18.3	March	0	0	0	14.6
221	18.4	April	0	0	0	14.6
222	18.5	May	0	0	0	14.6
223	18.6	June	0	0	0	14.6
224	18.7	July	0	0	0	14.6
225	18.8	August	0	0	0	14.6
226	18.8	September	0	0	0	14.6
227	18.9	October	0	0	0	14.6

228	19	November	0	0	0		14.6
229	19.1	December	0	0	0		14.6
230	19.2	January	0	0	0		14.6
231	19.3	February	0	0	0		14.6
232	19.3	March	0	0	0		14.6
233	19.4	April	0	0	0		14.6
234	19.5	May	0	0	0		14.6
235	19.6	June	0	0	0		14.6
236	19.7	July	0	0	0		14.6
237	19.8	August	0	0	0		14.6
238	19.8	September	0	0	0		14.6
239	19.9	October	0	0	0		14.6
240	20	November	0	0	0		14.6

**Therma Cracking: Crack Depth Vs Time**

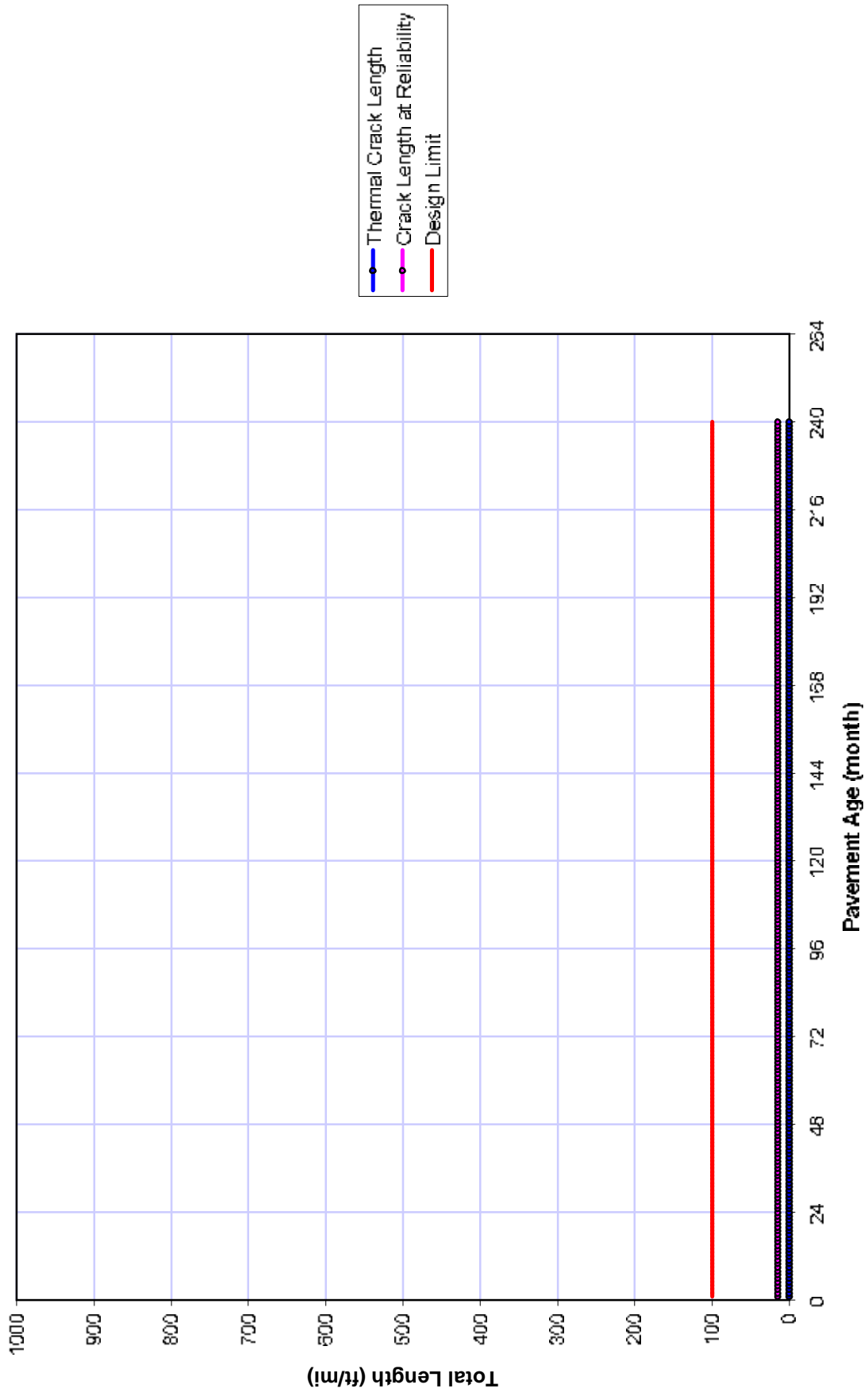


### Therma Cracking: Depth Ratio Vs Time

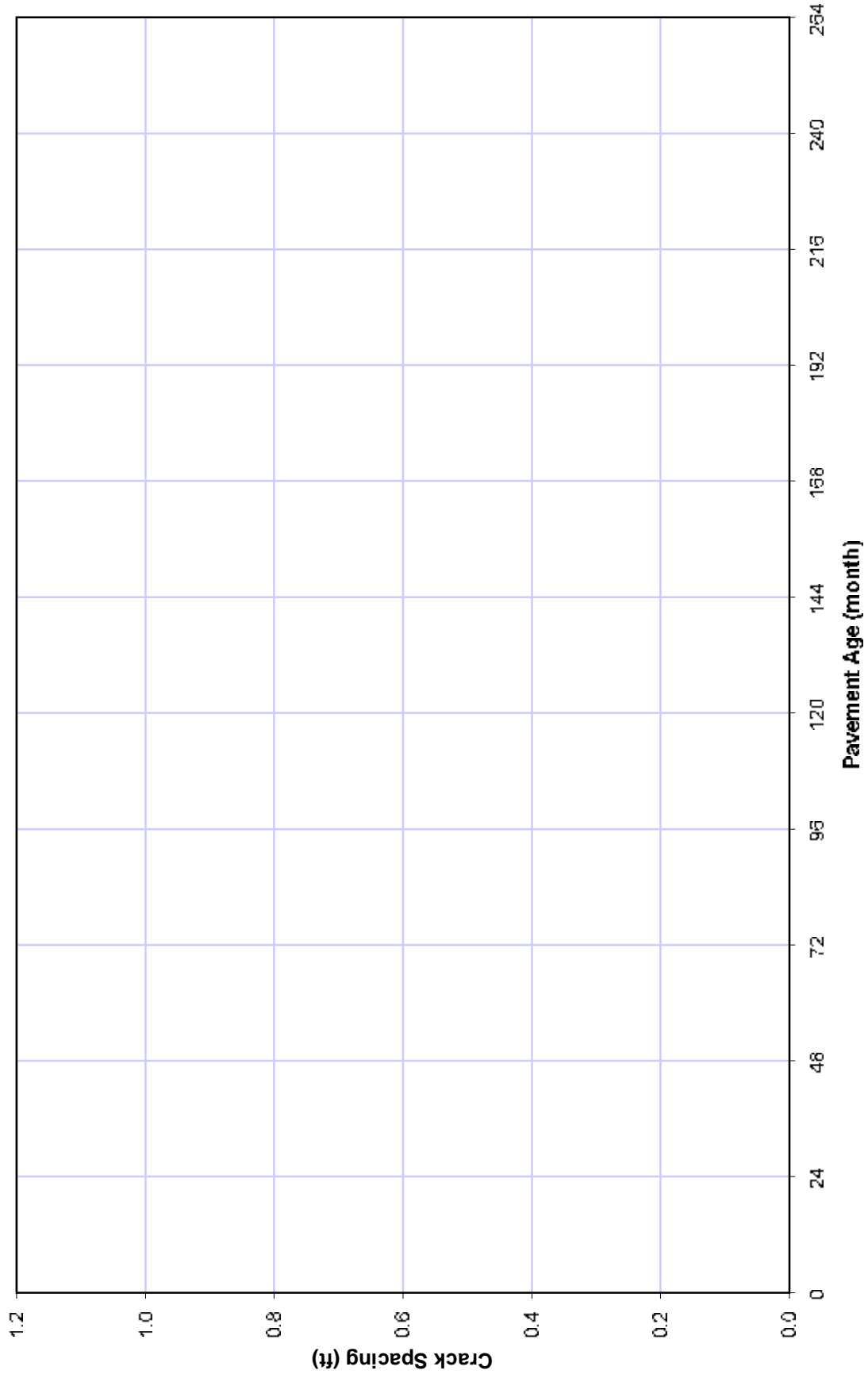




# Therma Cracking: Tota Length Vs Tiime



# Transverse Crack Spacing



Predicted Rutting: Project AC2005

Pavement no	yr	Month	Maximum Rutting (inches)											Total Rutted Inches		
			AC1	Location (in)	CR12	CR13	Location (in)	SP4	Location (in)	SubtotalAC	SubtotalSP4	SubtotalAC	Total		Location (in)	
1	2008	December	0.0147	0	0	0.0001	0	0.003	0	0.0117	0.003	0.0067	0	0.0184	0	0.0184
2	2009	January	0.002	0	0	0.0017	0	0.0055	0	0.0072	0.0055	0.0127	0	0.0199	0	0.0199
3	2009	February	0.0247	0	0	0.0047	0	0.0065	0	0.0305	0.0065	0.037	0	0.0437	0	0.0437
4	2009	March	0.0092	0	0	0.0028	0	0.0038	0	0.0078	0.0038	0.0116	0	0.0154	0	0.0154
5	2009	April	0.0366	0	0	0.0069	0	0.0178	0	0.0386	0.0069	0.0455	0	0.0524	0	0.0524
6	2009	May	0.0034	0	0	0.0028	0	0.0065	0	0.0034	0.0028	0.0062	0	0.009	0	0.009
7	2009	June	0.0092	0	0	0.0052	0	0.0082	0	0.0092	0.0052	0.0144	0	0.0196	0	0.0196
8	2009	July	0.0081	0	0	0.003	0	0.0089	0	0.0081	0.003	0.0111	0	0.0151	0	0.0151
9	2009	August	0.0077	0	0	0.0007	0	0.0057	0	0.0077	0.0007	0.0084	0	0.0111	0	0.0111
10	2009	September	0.0066	0	0	0.0012	0	0.0011	0	0.0066	0.0012	0.0078	0	0.01	0	0.01
11	2009	October	0.009	0	0	0.003	0	0.0029	0	0.009	0.003	0.012	0	0.015	0	0.015
12	2009	November	0.0054	0	0	0.0018	0	0.0032	0	0.0054	0.0018	0.0072	0	0.009	0	0.009
13	2009	December	0.0037	0	0	0.0012	0	0.0038	0	0.0037	0.0012	0.0049	0	0.0061	0	0.0061
14	2009	January	0.0086	0	0	0.0022	0	0.0021	0	0.0086	0.0022	0.0108	0	0.013	0	0.013
15	2009	February	0.0037	0	0	0.0024	0	0.0029	0	0.0037	0.0024	0.0061	0	0.0085	0	0.0085
16	2009	March	0.001	0	0	0.0026	0	0.0021	0	0.001	0.0026	0.0026	0	0.0052	0	0.0052
17	2009	April	0.008	0	0	0.0029	0	0.008	0	0.008	0.0029	0.0109	0	0.0138	0	0.0138
18	2009	May	0.0057	0	0	0.0033	0	0.0066	0	0.0057	0.0033	0.009	0	0.0123	0	0.0123
19	2009	June	0.0019	0	0	0.0037	0	0.0037	0	0.0019	0.0037	0.0056	0	0.0075	0	0.0075
20	2009	July	0.0086	0	0	0.0031	0	0.0027	0	0.0086	0.0031	0.0117	0	0.0144	0	0.0144
21	2009	August	0.0028	0	0	0.0011	0	0.0038	0	0.0028	0.0011	0.0039	0	0.005	0	0.005
22	2009	September	0.0037	0	0	0.0042	0	0.0037	0	0.0037	0.0042	0.0079	0	0.0116	0	0.0116
23	2009	October	0.003	0	0	0.0033	0	0.0031	0	0.003	0.0033	0.0063	0	0.0094	0	0.0094
24	2009	November	0.0059	0	0	0.0039	0	0.0039	0	0.0059	0.0039	0.0098	0	0.0137	0	0.0137
25	2009	December	0.0036	0	0	0.0039	0	0.0036	0	0.0036	0.0039	0.0075	0	0.0111	0	0.0111
26	2009	January	0.003	0	0	0.0046	0	0.0061	0	0.003	0.0046	0.0076	0	0.0106	0	0.0106
27	2009	February	0.0037	0	0	0.0047	0	0.0039	0	0.0037	0.0047	0.0084	0	0.0123	0	0.0123
28	2009	March	0.0089	0	0	0.0048	0	0.0068	0	0.0089	0.0048	0.0137	0	0.0176	0	0.0176
29	2009	April	0.0067	0	0	0.0039	0	0.0061	0	0.0067	0.0039	0.0106	0	0.0145	0	0.0145
30	2009	May	0.0036	0	0	0.0039	0	0.0039	0	0.0036	0.0039	0.0075	0	0.0111	0	0.0111
31	2009	June	0.0055	0	0	0.0033	0	0.0033	0	0.0055	0.0033	0.0088	0	0.0127	0	0.0127
32	2009	July	0.0069	0	0	0.0039	0	0.0069	0	0.0069	0.0039	0.0108	0	0.0147	0	0.0147
33	2009	August	0.0051	0	0	0.0036	0	0.0066	0	0.0051	0.0036	0.0087	0	0.0123	0	0.0123
34	2009	September	0.0036	0	0	0.0036	0	0.0066	0	0.0036	0.0036	0.0072	0	0.0108	0	0.0108
35	2009	October	0.0036	0	0	0.0036	0	0.0066	0	0.0036	0.0036	0.0072	0	0.0108	0	0.0108
36	2009	November	0.0036	0	0	0.0036	0	0.0066	0	0.0036	0.0036	0.0072	0	0.0108	0	0.0108
37	2009	December	0.0036	0	0	0.0036	0	0.0066	0	0.0036	0.0036	0.0072	0	0.0108	0	0.0108
38	2009	January	0.0069	0	0	0.0036	0	0.0067	0	0.0069	0.0036	0.0105	0	0.0144	0	0.0144
39	2009	February	0.0069	0	0	0.0036	0	0.0067	0	0.0069	0.0036	0.0105	0	0.0144	0	0.0144
40	2009	March	0.0052	0	0	0.0065	0	0.0065	0	0.0052	0.0065	0.0117	0	0.0169	0	0.0169
41	2009	April	0.0069	0	0	0.0065	0	0.0067	0	0.0069	0.0065	0.0134	0	0.0186	0	0.0186
42	2009	May	0.0069	0	0	0.0069	0	0.0069	0	0.0069	0.0069	0.0138	0	0.0186	0	0.0186
43	2009	June	0.0067	0	0	0.0066	0	0.0067	0	0.0067	0.0066	0.0133	0	0.018	0	0.018
44	2009	July	0.0067	0	0	0.0066	0	0.0066	0	0.0067	0.0066	0.0133	0	0.018	0	0.018
45	2009	August	0.0067	0	0	0.0066	0	0.0066	0	0.0067	0.0066	0.0133	0	0.018	0	0.018
46	2009	September	0.0067	0	0	0.0066	0	0.0066	0	0.0067	0.0066	0.0133	0	0.018	0	0.018
47	2009	October	0.0067	0	0	0.0066	0	0.0066	0	0.0067	0.0066	0.0133	0	0.018	0	0.018
48	2009	November	0.0067	0	0	0.0066	0	0.0066	0	0.0067	0.0066	0.0133	0	0.018	0	0.018
49	2009	December	0.0067	0	0	0.0066	0	0.0066	0	0.0067	0.0066	0.0133	0	0.018	0	0.018

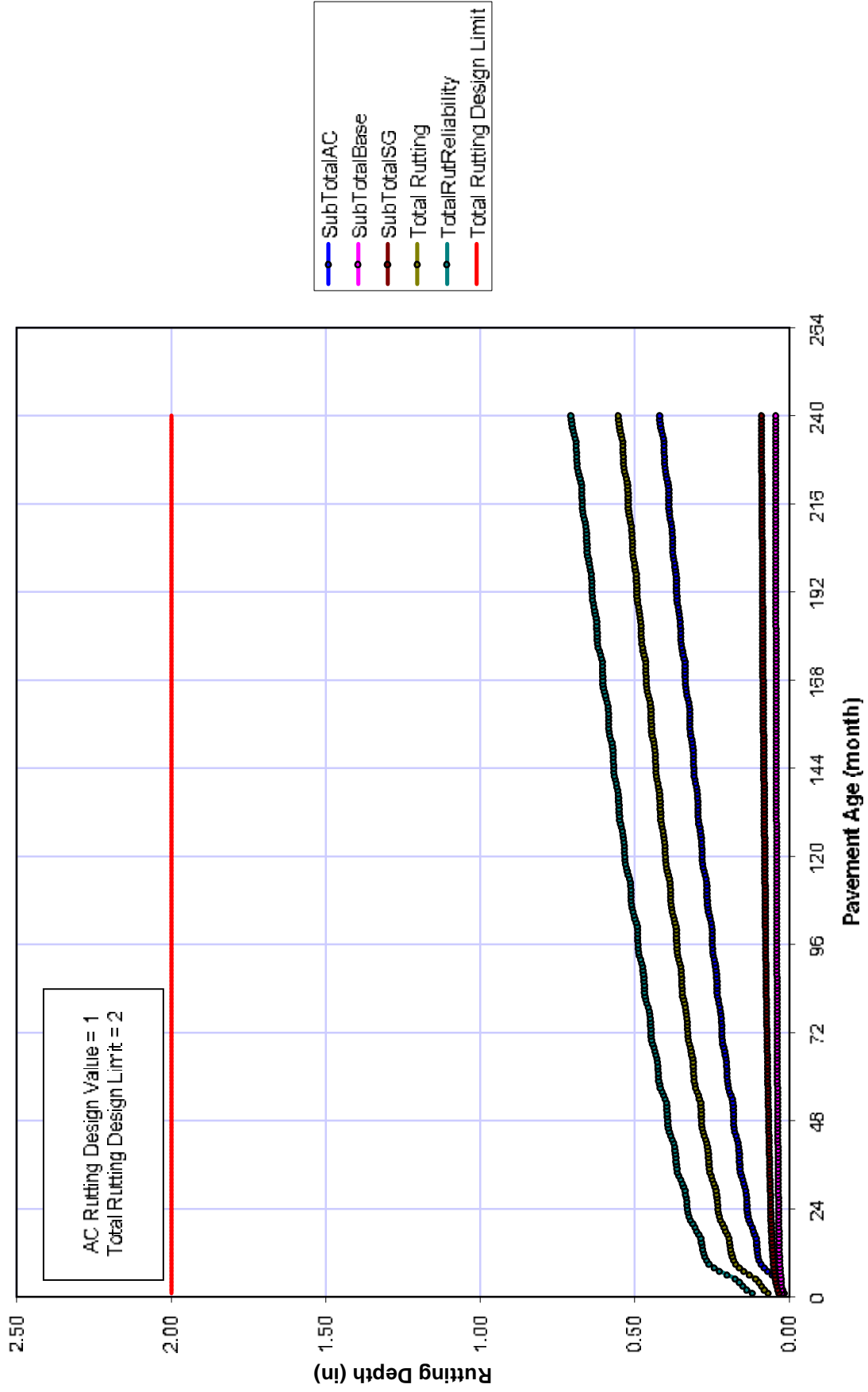




57	13.08	November	0.521	0	0	0	0	0.0887	0	0	0.211	0.2418	0.2029	0.1777	0	0	0.5817
57	13.08	December	0.3213	0	0	0	0	0.081	0	0	0.2113	0.2418	0.087	0.440	0	0	0.5847
58	13.11	January	0.527	0	0	0	0	0.0831	0	0	0.217	0.2418	0.083	0.1721	0	0	0.5847
58	13.25	February	0.5279	0	0	0	0	0.0831	0	0	0.2179	0.2418	0.083	0.1699	0	0	0.5847
59	13.33	March	0.5279	0	0	0	0	0.0832	0	0	0.2179	0.2418	0.0832	0.469	0	0	0.587
60	13.72	April	0.5279	0	0	0	0	0.0831	0	0	0.2179	0.2418	0.0831	0.179	0	0	0.5879
60	13.72	May	0.5247	0	0	0	0	0.0829	0	0	0.2147	0.2418	0.0831	0.177	0	0	0.5883
60	13.38	June	0.5279	0	0	0	0	0.0835	0	0	0.2179	0.2418	0.0836	0.433	0	0	0.592
60	13.67	July	0.5362	0	0	0	0	0.0837	0	0	0.2192	0.2417	0.0837	0.1878	0	0	0.5973
60	13.75	August	0.5379	0	0	0	0	0.0837	0	0	0.2197	0.2417	0.0837	0.1887	0	0	0.5987
60	13.83	September	0.5344	0	0	0	0	0.086	0	0	0.2144	0.2419	0.084	0.457	0	0	0.6004
60	13.92	October	0.5379	0	0	0	0	0.0811	0	0	0.2179	0.2417	0.081	0.1615	0	0	0.6069
60	13.92	November	0.536	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.216	0.2417	0.0812	0.1621	0	0	0.6072
60	14.08	December	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2417	0.082	0.1626	0	0	0.6072
61	14.12	January	0.5369	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2169	0.2417	0.0824	0.1626	0	0	0.6077
61	14.25	February	0.5367	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2167	0.2417	0.0824	0.1621	0	0	0.6077
62	14.33	March	0.537	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.217	0.2417	0.0824	0.434	0	0	0.6087
62	14.32	April	0.5379	0	0	0	0	0.0829	0	0	0.2179	0.2417	0.0829	0.1611	0	0	0.6089
62	14.7	May	0.5379	0	0	0	0	0.0829	0	0	0.2179	0.2417	0.0829	0.1664	0	0	0.6089
62	14.38	June	0.5379	0	0	0	0	0.0829	0	0	0.2179	0.2417	0.0829	0.1664	0	0	0.6089
62	14.38	July	0.5379	0	0	0	0	0.0829	0	0	0.2179	0.2417	0.0829	0.1664	0	0	0.6089
62	14.38	August	0.5379	0	0	0	0	0.0829	0	0	0.2179	0.2417	0.0829	0.1664	0	0	0.6089
62	14.38	September	0.5379	0	0	0	0	0.0829	0	0	0.2179	0.2417	0.0829	0.1664	0	0	0.6089
62	14.38	October	0.5379	0	0	0	0	0.0829	0	0	0.2179	0.2417	0.0829	0.1664	0	0	0.6089
62	14.38	November	0.5379	0	0	0	0	0.0829	0	0	0.2179	0.2417	0.0829	0.1664	0	0	0.6089
62	14.38	December	0.5379	0	0	0	0	0.0829	0	0	0.2179	0.2417	0.0829	0.1664	0	0	0.6089
63	15.25	January	0.5375	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2175	0.2417	0.0824	0.177	0	0	0.617
63	15.33	February	0.5375	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2175	0.2417	0.0824	0.177	0	0	0.617
63	15.42	March	0.5375	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2175	0.2417	0.0824	0.177	0	0	0.617
63	15.5	April	0.5375	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2175	0.2417	0.0824	0.177	0	0	0.617
63	15.5	May	0.5375	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2175	0.2417	0.0824	0.177	0	0	0.617
63	15.58	June	0.5369	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2169	0.2416	0.0829	0.1878	0	0	0.6189
63	15.67	July	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2417	0.0827	0.4877	0	0	0.6217
63	15.75	August	0.537	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.217	0.2417	0.0824	0.1889	0	0	0.621
63	15.83	September	0.537	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.217	0.2417	0.0824	0.1889	0	0	0.621
63	15.92	October	0.5376	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2176	0.2417	0.0824	0.1889	0	0	0.621
63	15.92	November	0.5376	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2176	0.2417	0.0824	0.1889	0	0	0.621
63	15.92	December	0.5376	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2176	0.2417	0.0824	0.1889	0	0	0.621
64	16.33	January	0.5373	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2173	0.2417	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.08	February	0.5369	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2169	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.17	March	0.5367	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2167	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.25	April	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	May	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	June	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	July	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	August	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	September	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	October	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	November	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	December	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	January	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	February	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	March	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	April	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	May	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	June	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	July	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	August	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	September	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	October	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	November	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	December	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	January	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	February	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	March	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	April	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	May	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	June	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	July	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	August	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	September	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	October	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	November	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	December	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	January	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	February	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	March	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	April	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	May	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	June	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	July	0.5366	0	0	0	0	0.0824	0	0	0.2166	0.2418	0.0824	0.1921	0	0	0.629
64	16.33	August	0.5366	0	0												

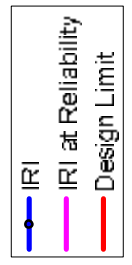
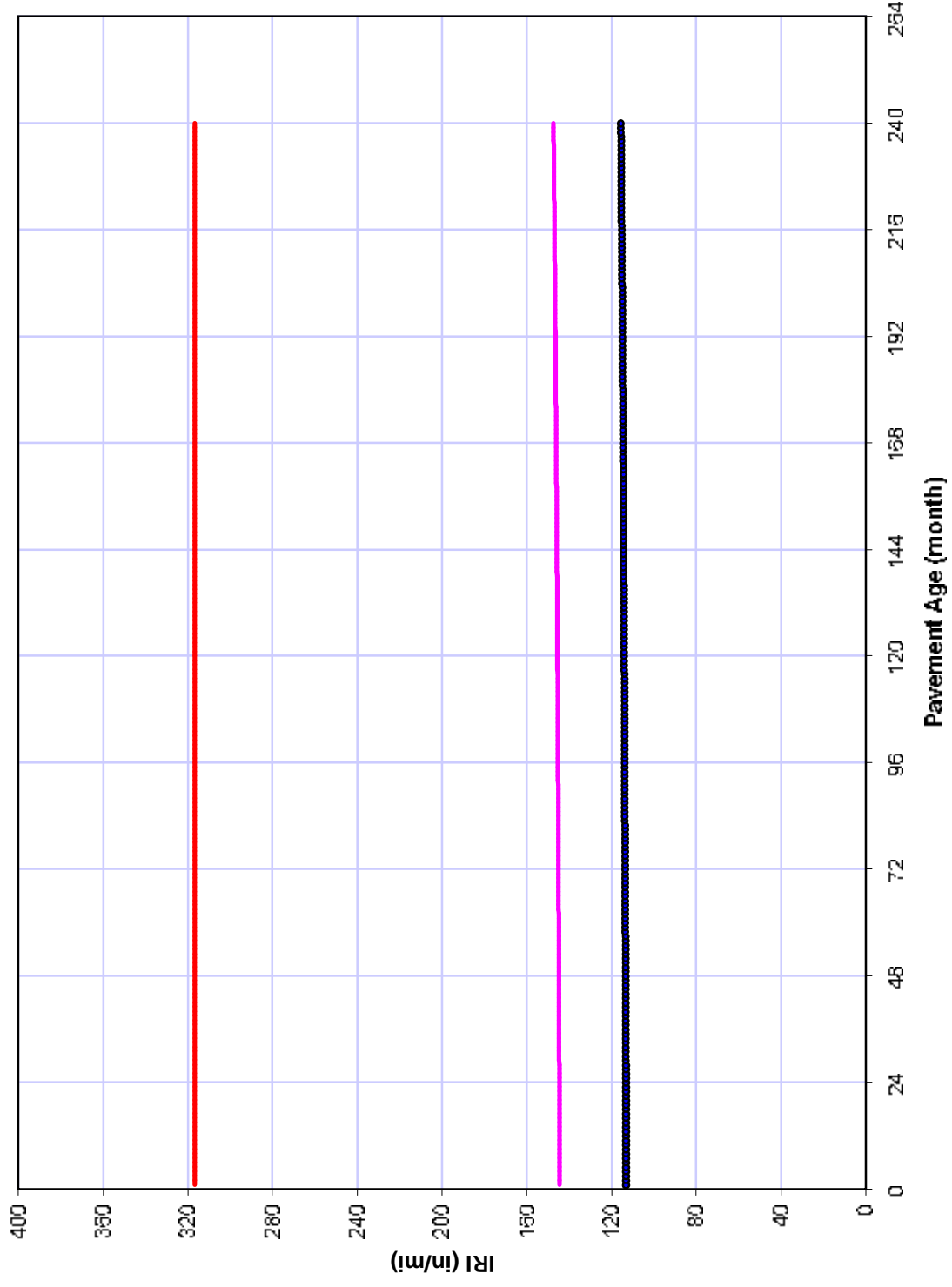


# Permanant Deformation: Rutting





# IRI



## **ANEXO 3**

**MEMORIA DE CÁLCULO DEL DISEÑO DE  
UN PAVIMENTO RIGIDO NUEVO SEGÚN  
EL METODO DE DISEÑO AASHTO 2002**



October	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
November	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
December	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

**Vehicle Class Distribution**

(Level 3, Default Distribution)

**AADTT distribution by vehicle class**

Class 4	72.5%
Class 5	22.8%
Class 6	0.0%
Class 7	0.0%
Class 8	0.0%
Class 9	4.7%
Class 10	0.0%
Class 11	0.0%
Class 12	0.0%
Class 13	0.0%

**Hourly truck traffic distribution**

by period beginning:

Midnight	0.6%	Noon	5.6%
1:00 am	0.4%	1:00 pm	5.3%
2:00 am	0.3%	2:00 pm	5.5%
3:00 am	0.5%	3:00 pm	5.2%
4:00 am	1.5%	4:00 pm	5.6%
5:00 am	4.8%	5:00 pm	5.8%
6:00 am	9.1%	6:00 pm	5.7%
7:00 am	7.6%	7:00 pm	4.4%
8:00 am	5.9%	8:00 pm	3.6%
9:00 am	5.4%	9:00 pm	2.8%
10:00 am	5.4%	10:00 pm	2.2%
11:00 am	5.6%	11:00 pm	1.2%

**Traffic Growth Factor**

Vehicle Class	Growth Rate	Growth Function
Class 4	4.5%	Compound
Class 5	4.5%	Compound
Class 6	4.5%	Compound
Class 7	4.5%	Compound
Class 8	4.5%	Compound
Class 9	4.5%	Compound
Class 10	4.5%	Compound
Class 11	4.5%	Compound
Class 12	4.5%	Compound
Class 13	4.5%	Compound

**Traffic -- Axle Load Distribution Factors**

Level 3: Default

**Traffic -- General Traffic Inputs**

Mean wheel location (inches from the lane marking):	18
Traffic wander standard deviation (in):	10
Design lane width (ft):	12

**Number of Axles per Truck**

Vehicle Class	Single Axle	Tandem Axle	Tridem Axle	Quad Axle
Class 4	1.62	0.39	0.00	0.00
Class 5	2.00	0.00	0.00	0.00
Class 6	1.02	0.99	0.00	0.00
Class 7	1.00	0.26	0.83	0.00
Class 8	2.38	0.67	0.00	0.00
Class 9	1.13	1.93	0.00	0.00

Class 10	1.19	1.09	0.89	0.00
Class 11	4.29	0.26	0.06	0.00
Class 12	3.52	1.14	0.06	0.00
Class 13	2.15	2.13	0.35	0.00

### Axle Configuration

Average axle width (edge-to-edge) outside dimensions,ft): 8.5

Dual tire spacing (in): 12

### Axle Configuration

Single Tire (psi): 120

Dual Tire (psi): 120

### Average Axle Spacing

Tandem axle(psi): 51.6

Tridem axle(psi): 49.2

Quad axle(psi): 49.2

### Wheelbase Truck Tractor

	Short	Medium	Long
Average Axle Spacing (ft)	12	15	18
Percent of trucks	33%	33%	34%

### Climate

icm file:

C:\DG2002\Projects\Mi clima.icm

Latitude (degrees.minutes) 25.49

Longitude (degrees.minutes) -80.18

Elevation (ft) 26

Depth of water table (ft) 32.8

### Structure--Design Features

Permanent curl/warp effective temperature difference (°F): -10

### Joint Design

Joint spacing (ft): 12

Sealant type: Silicone

Dowel diameter (in): 1

Dowel bar spacing (in): 12

### Edge Support

Tied PCC shoulder, Widened slab

Long-term LTE(%): 40

Widened Slab (ft): 12

### Base Properties

Base type: Lime treated

Erodibility index: Erosion Resistant (3)

Base/slab friction coefficient: 0.65

PCC-Base Interface Unbonded

Loss of bond age (months): n/a

**Structure--ICM Properties**

Surface shortwave absorptivity:	0.85
---------------------------------	------

**Drainage Parameters**

Infiltration:	Minor (10%)
Drainage path length (ft):	12
Pavement cross slope (%):	2

**Structure--Layers****Layer 1 -- JPCP****General Properties**

PCC material	JPCP
Layer thickness (in):	7.5
Unit weight (pcf):	149.8
Poisson's ratio	0.15

**Thermal Properties**

Coefficient of thermal expansion (per F° x 10- 6):	4.8
Thermal conductivity (BTU/hr-ft-F°) :	1.25
Heat capacity (BTU/lb-F°):	0.28

**Mix Properties**

Cement type:	Type I
Cementitious material content (lb/yd <sup>3</sup> ):	505.7
Water/cement ratio:	0.4
Aggregate type:	Basalt
PCC zero-stress temperature (F°)	73.4
Ultimate shrinkage at 40% R.H (microstrain)	Derived
Reversible shrinkage (% of ultimate shrinkage):	50
Time to develop 50% of ultimate shrinkage (days):	35
Curing method:	Curing compound

**Strength Properties**

Input level:	Level 3
28-day PCC modulus of rupture (psi):	640
28-day PCC compressive strength (psi):	n/a

**Layer 2 -- Soil Cement****General Properties**

Material type:	Soil Cement
Layer thickness (in):	8
Unit weight (pcf):	100
Poisson's ratio:	0.28

**Strength Properties**

Elastic/resilient modulus (psi):	600000
----------------------------------	--------

**Thermal Properties**

Thermal conductivity (BTU/hr-ft-F°) :	1.25
Heat capacity (BTU/lb-F°):	0.28

**Layer 3 -- A-2-4**

Unbound Material: A-2-4  
 Thickness(in): 10

**Strength Properties**

Input Level: Level 3  
 Analysis Type: ICM inputs (ICM Calculated Modulus)  
 Poisson's ratio: 0.28  
 Coefficient of lateral pressure, Ko: 0.5  
 Modulus (input) (psi): 28000

**ICM Inputs**

Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI: 6  
 Passing #200 sieve (%): 23  
 Passing #4 sieve (%): 70  
 D60 (mm): 0.15

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf): 100 (user input)  
 Specific gravity of solids, Gs: 2.5 (user input)  
 Saturated hydraulic conductivity (ft/hr): 3.25e-005 (derived)  
 Optimum gravimetric water content (%): 28 (user input)  
 Calculated degree of saturation (%): 85.1 (calculated)

Soil water characteristic curve parameters: Default values

Parameters	Value
a	16.5
b	1.44
c	0.56
Hr.	550

**Layer 4 -- A-2-4**

Unbound Material: A-2-4  
 Thickness(in): Semi-infinite

**Strength Properties**

Input Level: Level 3  
 Analysis Type: ICM inputs (ICM Calculated Modulus)  
 Poisson's ratio: 0.28  
 Coefficient of lateral pressure, Ko: 0.5  
 Modulus (input) (psi): 28000

**ICM Inputs**

Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI: 6  
 Passing #200 sieve (%): 23  
 Passing #4 sieve (%): 70  
 D60 (mm): 0.15

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf): 100 (user input)

Specific gravity of solids, Gs: 2.5 (user input)  
 Saturated hydraulic conductivity (ft/hr): 3.2175e-005 (derived)  
 Optimum gravimetric water content (%): 28 (user input)  
 Calculated degree of saturation (%): 85.1 (calculated)

Soil water characteristic curve parameters: Default values

Parameters	Value
a	16.5
b	1.44
c	0.56
Hr.	550

## Distress Model Calibration Settings - Rigid (new)

### Faulting

#### Faulting Coefficients

C1 1.29  
 C2 1.1  
 C3 0.001725  
 C4 0.0008  
 C5 250  
 C6 0.4  
 C7 1.2  
 C8 400

#### Reliability (FAULT)

Std. Dev.  $\text{POWER}((0.03261*\text{FAULT} + 0.00009799), 0.5)$

### Cracking

#### Fatigue Coefficients

C1 2  
 C2 1.22

#### Cracking Coefficients

C4 1  
 C5 -1.68

#### Reliability (CRACK)

Std. Dev.  $-0.00172*\text{POWER}(\text{CRACK}, 2) + 0.3447*\text{CRACK} + 4.6772$

### IRI(jpcp)

C1 0.8203  
 C2 0.4417  
 C3 20.37  
 C4 1.4929  
 C5 25.24  
 Standard deviation in initial IRI (in/mile): 5.4



## Project: PCC2005 Reliability Summary

<b>Performance Criteria</b>	Distress Target	Reliability Target	Distress Predicted	Reliability Predicted	Acceptable
Terminal IRI (in/mi)	300	90	130.6	99.999	Pass
Transverse Cracking (% slabs cracked)	10	90	1.5	94.93	Pass
Mean Joint Faulting (in)	0.15	90	0.002	99.999	Pass

### Predicted distress: Project PCC2005

Pavement age		Month	Epsc Mpsi	Ebase ksi	Dyn. k psi/in	Faulting in	Percent slabs cracked	IRI in/mile	Heavy Trucks (cumulative)	IRI at specified reliability
mo	yr									
1	0.08	December	4.35	600	706	0	0	126.7	120362	163.3
2	0.17	January	4.39	600	706	0	0	127	240724	163.6
3	0.25	February	4.43	600	706	0	0	127	361086	163.7
4	0.33	March	4.46	600	706	0	0	127	481448	163.7
5	0.42	April	4.48	600	706	0	0	127	601810	163.7
6	0.5	May	4.5	600	706	0	0	127	722172	163.7
7	0.58	June	4.52	600	706	0	0	127	842534	163.7
8	0.67	July	4.54	600	706	0	0	127	962896	163.7
9	0.75	August	4.55	600	706	0	0	127	1083260	163.7
10	0.83	September	4.57	600	704	0	0	127	1203620	163.7
11	0.92	October	4.58	600	706	0	0	127	1323980	163.7
12	1	November	4.59	600	706	0	0	127	1444340	163.7
13	1.08	December	4.6	600	706	0	0	127	1570120	163.7
14	1.17	January	4.61	600	706	0	0	127.1	1695900	163.7
15	1.25	February	4.62	600	706	0	0	127.1	1821680	163.7
16	1.33	March	4.63	600	706	0	0	127.1	1947460	163.7
17	1.42	April	4.64	600	706	0	0	127.1	2073240	163.7
18	1.5	May	4.64	600	706	0	0	127.1	2199010	163.7
19	1.58	June	4.65	600	706	0	0	127.1	2324790	163.8
20	1.67	July	4.66	600	706	0	0	127.1	2450570	163.8
21	1.75	August	4.66	600	706	0	0	127.1	2576350	163.8
22	1.83	September	4.67	600	704	0	0	127.1	2702130	163.8
23	1.92	October	4.67	600	706	0	0	127.1	2827910	163.8
24	2	November	4.68	600	706	0	0	127.1	2953680	163.8
25	2.08	December	4.68	600	706	0	0	127.1	3085120	163.8
26	2.17	January	4.69	600	706	0	0	127.1	3216560	163.8
27	2.25	February	4.69	600	706	0	0	127.1	3348000	163.8
28	2.33	March	4.7	600	706	0	0	127.1	3479440	163.8
29	2.42	April	4.7	600	706	0	0	127.1	3610880	163.8
30	2.5	May	4.7	600	706	0	0	127.1	3742310	163.8
31	2.58	June	4.71	600	706	0	0	127.2	3873750	163.8
32	2.67	July	4.71	600	706	0	0	127.2	4005190	163.8
33	2.75	August	4.72	600	706	0	0	127.2	4136630	163.8
34	2.83	September	4.72	600	704	0	0	127.2	4268070	163.8
35	2.92	October	4.72	600	706	0	0	127.2	4399510	163.8
36	3	November	4.73	600	706	0	0	127.2	4530950	163.8
37	3.08	December	4.73	600	706	0	0	127.2	4668300	163.8
38	3.17	January	4.73	600	706	0	0	127.2	4805650	163.8
39	3.25	February	4.74	600	706	0	0	127.2	4943000	163.8
40	3.33	March	4.74	600	706	0	0	127.2	5080360	163.8
41	3.42	April	4.74	600	706	0	0	127.2	5217710	163.8
42	3.5	May	4.75	600	706	0	0	127.2	5355060	163.8
43	3.58	June	4.75	600	706	0	0	127.2	5492420	163.8
44	3.67	July	4.75	600	706	0	0	127.2	5629770	163.8
45	3.75	August	4.75	600	706	0	0	127.2	5767120	163.8
46	3.83	September	4.76	600	704	0	0	127.2	5904480	163.8
47	3.92	October	4.76	600	706	0	0.1	127.3	6041830	164
48	4	November	4.76	600	706	0	0.1	127.3	6179180	164
49	4.08	December	4.76	600	706	0	0.1	127.3	6322720	164
50	4.17	January	4.77	600	706	0	0.1	127.3	6466250	164
51	4.25	February	4.77	600	706	0	0.1	127.3	6609780	164
52	4.33	March	4.77	600	706	0	0.1	127.3	6753320	164
53	4.42	April	4.77	600	706	0	0.1	127.3	6896850	164

54	4.5	May	4.78	600	706	0	0.1	127.3	7040390	164
55	4.58	June	4.78	600	706	0	0.1	127.3	7183920	164.1
56	4.67	July	4.78	600	706	0	0.1	127.4	7327450	164.1
57	4.75	August	4.78	600	706	0	0.1	127.4	7470990	164.1
58	4.83	September	4.78	600	704	0	0.1	127.4	7614520	164.1
59	4.92	October	4.79	600	706	0	0.1	127.4	7758060	164.1
60	5	November	4.79	600	706	0	0.1	127.4	7901590	164.1
61	5.08	December	4.79	600	706	0	0.1	127.4	8051580	164.1
62	5.17	January	4.79	600	706	0	0.1	127.4	8201580	164.1
63	5.25	February	4.79	600	706	0	0.1	127.4	8351570	164.1
64	5.33	March	4.8	600	706	0	0.1	127.4	8501560	164.1
65	5.42	April	4.8	600	706	0	0.1	127.4	8651560	164.1
66	5.5	May	4.8	600	706	0	0.1	127.4	8801550	164.1
67	5.58	June	4.8	600	706	0	0.1	127.4	8951540	164.1
68	5.67	July	4.8	600	706	0	0.1	127.4	9101530	164.1
69	5.75	August	4.8	600	706	0	0.1	127.4	9251530	164.1
70	5.83	September	4.81	600	704	0	0.1	127.4	9401520	164.1
71	5.92	October	4.81	600	706	0	0.1	127.5	9551510	164.2
72	6	November	4.81	600	706	0	0.1	127.5	9701510	164.2
73	6.08	December	4.81	600	706	0	0.1	127.5	9858250	164.2
74	6.17	January	4.81	600	706	0	0.1	127.5	10015000	164.2
75	6.25	February	4.81	600	706	0	0.1	127.5	10171700	164.2
76	6.33	March	4.82	600	706	0	0.1	127.5	10328500	164.2
77	6.42	April	4.82	600	706	0	0.1	127.5	10485200	164.2
78	6.5	May	4.82	600	706	0	0.1	127.5	10642000	164.2
79	6.58	June	4.82	600	706	0	0.1	127.5	10798700	164.2
80	6.67	July	4.82	600	706	0	0.1	127.5	10955400	164.2
81	6.75	August	4.82	600	706	0	0.1	127.5	11112200	164.2
82	6.83	September	4.82	600	704	0	0.1	127.5	11268900	164.2
83	6.92	October	4.83	600	706	0	0.1	127.5	11425700	164.2
84	7	November	4.83	600	706	0	0.1	127.5	11582400	164.2
85	7.08	December	4.83	600	706	0	0.1	127.5	11746200	164.2
86	7.17	January	4.83	600	706	0	0.1	127.5	11910000	164.2
87	7.25	February	4.83	600	706	0	0.1	127.5	12073800	164.2
88	7.33	March	4.83	600	706	0	0.1	127.5	12237600	164.2
89	7.42	April	4.83	600	706	0	0.1	127.5	12401400	164.2
90	7.5	May	4.83	600	706	0	0.1	127.5	12565200	164.2
91	7.58	June	4.83	600	706	0	0.1	127.5	12729000	164.2
92	7.67	July	4.84	600	706	0	0.1	127.5	12892800	164.2
93	7.75	August	4.84	600	706	0	0.1	127.5	13056600	164.2
94	7.83	September	4.84	600	704	0	0.2	127.7	13220400	164.4
95	7.92	October	4.84	600	706	0	0.2	127.7	13384200	164.4
96	8	November	4.84	600	706	0	0.2	127.7	13548000	164.4
97	8.08	December	4.84	600	706	0	0.2	127.7	13719100	164.4
98	8.17	January	4.84	600	706	0	0.2	127.7	13890300	164.4
99	8.25	February	4.84	600	706	0	0.2	127.7	14061500	164.4
100	8.33	March	4.84	600	706	0	0.2	127.7	14232600	164.4
101	8.42	April	4.85	600	706	0	0.2	127.7	14403800	164.4
102	8.5	May	4.85	600	706	0	0.2	127.7	14575000	164.4
103	8.58	June	4.85	600	706	0	0.2	127.7	14746100	164.5
104	8.67	July	4.85	600	706	0	0.2	127.7	14917300	164.5
105	8.75	August	4.85	600	706	0	0.2	127.7	15088500	164.5
106	8.83	September	4.85	600	704	0	0.2	127.7	15259600	164.5
107	8.92	October	4.85	600	706	0	0.2	127.7	15430800	164.5
108	9	November	4.85	600	706	0	0.2	127.7	15602000	164.5
109	9.08	December	4.85	600	706	0	0.2	127.7	15780800	164.5
110	9.17	January	4.85	600	706	0	0.2	127.7	15959700	164.5
111	9.25	February	4.85	600	706	0	0.2	127.7	16138600	164.5

112	9.33	March	4.86	600	706	0	0.2	127.7	16317500	164.5
113	9.42	April	4.86	600	706	0.001	0.2	127.7	16496300	164.5
114	9.5	May	4.86	600	706	0.001	0.2	127.8	16675200	164.6
115	9.58	June	4.86	600	706	0.001	0.2	127.8	16854100	164.6
116	9.67	July	4.86	600	706	0.001	0.2	127.8	17032900	164.6
117	9.75	August	4.86	600	706	0.001	0.2	127.8	17211800	164.6
118	9.83	September	4.86	600	704	0.001	0.2	127.8	17390700	164.6
119	9.92	October	4.86	600	706	0.001	0.2	127.8	17569500	164.6
120	10	November	4.86	600	706	0.001	0.2	127.8	17748400	164.6
121	10.1	December	4.86	600	706	0.001	0.2	127.8	17935300	164.6
122	10.2	January	4.86	600	706	0.001	0.2	127.8	18122200	164.6
123	10.3	February	4.86	600	706	0.001	0.2	127.8	18309200	164.6
124	10.3	March	4.86	600	706	0.001	0.2	127.8	18496100	164.6
125	10.4	April	4.87	600	706	0.001	0.2	127.8	18683000	164.6
126	10.5	May	4.87	600	706	0.001	0.3	127.9	18869900	164.7
127	10.6	June	4.87	600	706	0.001	0.3	127.9	19056800	164.7
128	10.7	July	4.87	600	706	0.001	0.3	127.9	19243800	164.7
129	10.8	August	4.87	600	706	0.001	0.3	127.9	19430700	164.7
130	10.8	September	4.87	600	704	0.001	0.3	127.9	19617600	164.7
131	10.9	October	4.87	600	706	0.001	0.3	127.9	19804500	164.7
132	11	November	4.87	600	706	0.001	0.3	127.9	19991400	164.7
133	11.1	December	4.87	600	706	0.001	0.3	128	20186800	164.8
134	11.2	January	4.87	600	706	0.001	0.3	128	20382100	164.8
135	11.3	February	4.87	600	706	0.001	0.3	128	20577400	164.8
136	11.3	March	4.87	600	706	0.001	0.3	128	20772800	164.8
137	11.4	April	4.87	600	706	0.001	0.3	128	20968100	164.8
138	11.5	May	4.87	600	706	0.001	0.3	128	21163400	164.8
139	11.6	June	4.88	600	706	0.001	0.3	128	21358700	164.8
140	11.7	July	4.88	600	706	0.001	0.3	128	21554100	164.8
141	11.8	August	4.88	600	706	0.001	0.3	128	21749400	164.8
142	11.8	September	4.88	600	704	0.001	0.3	128	21944700	164.8
143	11.9	October	4.88	600	706	0.001	0.3	128	22140100	164.9
144	12	November	4.88	600	706	0.001	0.3	128	22335400	164.9
145	12.1	December	4.88	600	706	0.001	0.3	128	22539500	164.9
146	12.2	January	4.88	600	706	0.001	0.3	128	22743600	164.9
147	12.3	February	4.88	600	706	0.001	0.3	128	22947800	164.9
148	12.3	March	4.88	600	706	0.001	0.3	128	23151900	164.9
149	12.4	April	4.88	600	706	0.001	0.3	128	23356000	164.9
150	12.5	May	4.88	600	706	0.001	0.3	128.1	23560100	165
151	12.6	June	4.88	600	706	0.001	0.4	128.2	23764200	165.1
152	12.7	July	4.88	600	706	0.001	0.4	128.2	23968300	165.1
153	12.8	August	4.88	600	706	0.001	0.4	128.2	24172500	165.1
154	12.8	September	4.89	600	704	0.001	0.4	128.2	24376600	165.1
155	12.9	October	4.89	600	706	0.001	0.4	128.2	24580700	165.1
156	13	November	4.89	600	706	0.001	0.4	128.2	24784800	165.1
157	13.1	December	4.89	600	706	0.001	0.4	128.2	24998100	165.1
158	13.2	January	4.89	600	706	0.001	0.4	128.2	25211400	165.1
159	13.3	February	4.89	600	706	0.001	0.4	128.2	25424700	165.1
160	13.3	March	4.89	600	706	0.001	0.4	128.2	25638000	165.1
161	13.4	April	4.89	600	706	0.001	0.4	128.2	25851400	165.1
162	13.5	May	4.89	600	706	0.001	0.4	128.2	26064700	165.1
163	13.6	June	4.89	600	706	0.001	0.4	128.2	26278000	165.1
164	13.7	July	4.89	600	706	0.001	0.4	128.2	26491300	165.1
165	13.8	August	4.89	600	706	0.001	0.4	128.2	26704600	165.1
166	13.8	September	4.89	600	704	0.001	0.4	128.3	26917900	165.2
167	13.9	October	4.89	600	706	0.001	0.4	128.3	27131200	165.2
168	14	November	4.89	600	706	0.001	0.4	128.3	27344500	165.2
169	14.1	December	4.89	600	706	0.001	0.4	128.3	27567400	165.2

170	14.2	January	4.89	600	706	0.001	0.4	128.3	27790300	165.2
171	14.3	February	4.9	600	706	0.001	0.4	128.3	28013200	165.2
172	14.3	March	4.9	600	706	0.001	0.4	128.3	28236100	165.2
173	14.4	April	4.9	600	706	0.001	0.5	128.4	28459000	165.3
174	14.5	May	4.9	600	706	0.001	0.5	128.4	28681900	165.3
175	14.6	June	4.9	600	706	0.001	0.5	128.4	28904800	165.3
176	14.7	July	4.9	600	706	0.001	0.5	128.4	29127700	165.3
177	14.8	August	4.9	600	706	0.001	0.5	128.4	29350600	165.3
178	14.8	September	4.9	600	704	0.001	0.5	128.4	29573500	165.3
179	14.9	October	4.9	600	706	0.001	0.5	128.4	29796400	165.4
180	15	November	4.9	600	706	0.001	0.5	128.4	30019300	165.4
181	15.1	December	4.9	600	706	0.001	0.5	128.4	30252300	165.4
182	15.2	January	4.9	600	706	0.001	0.5	128.5	30485200	165.5
183	15.3	February	4.9	600	706	0.001	0.5	128.5	30718100	165.5
184	15.3	March	4.9	600	706	0.001	0.5	128.5	30951100	165.5
185	15.4	April	4.9	600	706	0.001	0.5	128.5	31184000	165.5
186	15.5	May	4.9	600	706	0.001	0.5	128.5	31416900	165.5
187	15.6	June	4.9	600	706	0.001	0.5	128.5	31649900	165.5
188	15.7	July	4.9	600	706	0.001	0.5	128.5	31882800	165.5
189	15.8	August	4.9	600	706	0.001	0.5	128.5	32115700	165.5
190	15.8	September	4.91	600	704	0.001	0.6	128.6	32348700	165.6
191	15.9	October	4.91	600	706	0.001	0.6	128.6	32581600	165.6
192	16	November	4.91	600	706	0.001	0.6	128.6	32814600	165.6
193	16.1	December	4.91	600	706	0.001	0.6	128.6	33058000	165.6
194	16.2	January	4.91	600	706	0.001	0.6	128.7	33301400	165.6
195	16.3	February	4.91	600	706	0.001	0.6	128.7	33544800	165.6
196	16.3	March	4.91	600	706	0.001	0.6	128.7	33788200	165.7
197	16.4	April	4.91	600	706	0.001	0.6	128.7	34031600	165.7
198	16.5	May	4.91	600	706	0.001	0.6	128.7	34275100	165.7
199	16.6	June	4.91	600	706	0.001	0.6	128.7	34518500	165.7
200	16.7	July	4.91	600	706	0.001	0.6	128.7	34761900	165.7
201	16.8	August	4.91	600	706	0.001	0.6	128.7	35005300	165.7
202	16.8	September	4.91	600	704	0.001	0.6	128.8	35248700	165.7
203	16.9	October	4.91	600	706	0.001	0.6	128.8	35492100	165.7
204	17	November	4.91	600	706	0.001	0.6	128.8	35735600	165.7
205	17.1	December	4.91	600	706	0.001	0.6	128.8	35989900	165.7
206	17.2	January	4.91	600	706	0.001	0.6	128.8	36244300	165.7
207	17.3	February	4.91	600	706	0.001	0.7	128.9	36498700	165.8
208	17.3	March	4.91	600	706	0.001	0.7	128.9	36753000	165.8
209	17.4	April	4.91	600	706	0.001	0.7	128.9	37007400	165.8
210	17.5	May	4.91	600	706	0.001	0.7	128.9	37261800	165.9
211	17.6	June	4.91	600	706	0.001	0.7	128.9	37516100	166
212	17.7	July	4.92	600	706	0.001	0.7	128.9	37770500	166
213	17.8	August	4.92	600	706	0.001	0.7	128.9	38024900	166
214	17.8	September	4.92	600	704	0.001	0.7	129	38279300	166
215	17.9	October	4.92	600	706	0.001	0.7	129	38533600	166
216	18	November	4.92	600	706	0.001	0.7	129	38788000	166
217	18.1	December	4.92	600	706	0.001	0.7	129	39053800	166
218	18.2	January	4.92	600	706	0.001	0.7	129	39319600	166
219	18.3	February	4.92	600	706	0.001	0.7	129	39585400	166
220	18.3	March	4.92	600	706	0.001	0.7	129	39851300	166
221	18.4	April	4.92	600	706	0.001	0.8	129.1	40117100	166.1
222	18.5	May	4.92	600	706	0.001	0.8	129.1	40382900	166.1
223	18.6	June	4.92	600	706	0.001	0.8	129.1	40648700	166.2
224	18.7	July	4.92	600	706	0.001	0.8	129.1	40914500	166.2
225	18.8	August	4.92	600	706	0.001	0.8	129.2	41180300	166.2
226	18.8	September	4.92	600	704	0.001	0.8	129.2	41446200	166.2
227	18.9	October	4.92	600	706	0.001	0.8	129.2	41712000	166.2

228	19	November	4.92	600	706	0.001	0.8	129.2	41977800	166.2
229	19.1	December	4.92	600	706	0.001	0.8	129.2	42255600	166.2
230	19.2	January	4.92	600	706	0.001	0.8	129.2	42533400	166.2
231	19.3	February	4.92	600	706	0.001	0.8	129.2	42811100	166.2
232	19.3	March	4.92	600	706	0.001	0.8	129.2	43088900	166.2
233	19.4	April	4.92	600	706	0.001	0.8	129.2	43366700	166.2
234	19.5	May	4.92	600	706	0.001	0.9	129.3	43644500	166.3
235	19.6	June	4.92	600	706	0.001	0.9	129.3	43922300	166.3
236	19.7	July	4.92	600	706	0.001	0.9	129.4	44200000	166.4
237	19.8	August	4.92	600	706	0.001	0.9	129.4	44477800	166.4
238	19.8	September	4.93	600	704	0.001	0.9	129.4	44755600	166.5
239	19.9	October	4.93	600	706	0.001	0.9	129.4	45033400	166.5
240	20	November	4.93	600	706	0.001	0.9	129.4	45311100	166.5
241	20.1	December	4.93	600	706	0.001	0.9	129.4	45601400	166.5
242	20.2	January	4.93	600	706	0.001	0.9	129.4	45891700	166.5
243	20.3	February	4.93	600	706	0.001	0.9	129.4	46182000	166.5
244	20.3	March	4.93	600	706	0.001	0.9	129.4	46472300	166.5
245	20.4	April	4.93	600	706	0.001	0.9	129.4	46762500	166.5
246	20.5	May	4.93	600	706	0.001	1	129.5	47052800	166.6
247	20.6	June	4.93	600	706	0.001	1	129.5	47343100	166.6
248	20.7	July	4.93	600	706	0.001	1	129.6	47633400	166.7
249	20.8	August	4.93	600	706	0.001	1	129.6	47923700	166.7
250	20.8	September	4.93	600	704	0.001	1	129.6	48213900	166.7
251	20.9	October	4.93	600	706	0.001	1	129.6	48504200	166.7
252	21	November	4.93	600	706	0.001	1	129.6	48794500	166.7
253	21.1	December	4.93	600	706	0.001	1	129.6	49097800	166.7
254	21.2	January	4.93	600	706	0.001	1	129.6	49401200	166.7
255	21.3	February	4.93	600	706	0.001	1	129.6	49704500	166.7
256	21.3	March	4.93	600	706	0.001	1	129.6	50007900	166.7
257	21.4	April	4.93	600	706	0.001	1.1	129.7	50311200	166.8
258	21.5	May	4.93	600	706	0.002	1.1	129.7	50614500	166.8
259	21.6	June	4.93	600	706	0.002	1.1	129.8	50917900	166.9
260	21.7	July	4.93	600	706	0.002	1.1	129.8	51221200	166.9
261	21.8	August	4.93	600	706	0.002	1.1	129.8	51524600	166.9
262	21.8	September	4.93	600	704	0.002	1.1	129.8	51827900	167
263	21.9	October	4.93	600	706	0.002	1.1	129.8	52131200	167
264	22	November	4.93	600	706	0.002	1.1	129.8	52434600	167
265	22.1	December	4.93	600	706	0.002	1.1	129.8	52751600	167
266	22.2	January	4.93	600	706	0.002	1.1	129.8	53068600	167
267	22.3	February	4.93	600	706	0.002	1.2	129.9	53385600	167.1
268	22.3	March	4.93	600	706	0.002	1.2	129.9	53702600	167.1
269	22.4	April	4.93	600	706	0.002	1.2	129.9	54019500	167.1
270	22.5	May	4.93	600	706	0.002	1.2	130	54336500	167.2
271	22.6	June	4.93	600	706	0.002	1.2	130	54653500	167.2
272	22.7	July	4.93	600	706	0.002	1.2	130	54970500	167.2
273	22.8	August	4.93	600	706	0.002	1.2	130	55287500	167.2
274	22.8	September	4.93	600	704	0.002	1.3	130.1	55604500	167.3
275	22.9	October	4.93	600	706	0.002	1.3	130.1	55921500	167.3
276	23	November	4.93	600	706	0.002	1.3	130.1	56238500	167.3
277	23.1	December	4.93	600	706	0.002	1.3	130.1	56569700	167.3
278	23.2	January	4.93	600	706	0.002	1.3	130.1	56901000	167.3
279	23.3	February	4.93	600	706	0.002	1.3	130.1	57232300	167.3
280	23.3	March	4.93	600	706	0.002	1.3	130.2	57563500	167.4
281	23.4	April	4.93	600	706	0.002	1.3	130.2	57894800	167.4
282	23.5	May	4.93	600	706	0.002	1.3	130.2	58226000	167.4
283	23.6	June	4.93	600	706	0.002	1.3	130.2	58557300	167.5
284	23.7	July	4.93	600	706	0.002	1.3	130.2	58888500	167.5
285	23.8	August	4.93	600	706	0.002	1.4	130.3	59219800	167.6

286	23.8	September	4.93	600	704	0.002	1.4	130.3	59551100	167.6
287	23.9	October	4.93	600	706	0.002	1.4	130.3	59882300	167.6
288	24	November	4.93	600	706	0.002	1.4	130.3	60213600	167.6
289	24.1	December	4.93	600	706	0.002	1.4	130.3	60559700	167.6
290	24.2	January	4.93	600	706	0.002	1.4	130.3	60905900	167.6
291	24.3	February	4.93	600	706	0.002	1.4	130.4	61252100	167.7
292	24.3	March	4.93	600	706	0.002	1.4	130.4	61598200	167.7
293	24.4	April	4.93	600	706	0.002	1.4	130.4	61944400	167.7
294	24.5	May	4.93	600	706	0.002	1.5	130.5	62290500	167.8
295	24.6	June	4.93	600	706	0.002	1.5	130.5	62636700	167.8
296	24.7	July	4.93	600	706	0.002	1.5	130.5	62982900	167.8
297	24.8	August	4.93	600	706	0.002	1.5	130.5	63329000	167.8
298	24.8	September	4.93	600	704	0.002	1.5	130.5	63675200	167.8
299	24.9	October	4.93	600	706	0.002	1.5	130.6	64021400	167.8
300	25	November	4.93	600	706	0.002	1.5	130.6	64367500	167.8

## Predicted faulting: Project PCC2005

Pavement age	mo	yr	Month	Eppcc Mpsi	Ephase ksi	Dym. k psi/in	Ave. R.I.L. %	Ave. AT °F	Joint open. in	J.T.E. %	18-lip single deflection (in)		36-lip tandem deflection (in)		D.E. in-lb	Faulting in	Faulting at specified reliability
											Loaded	Unloaded	Loaded	Unloaded			
1	0.08	December	4.35	600	706	75.2	14	0.0	4	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
2	0.17	January	4.39	600	706	73.7	14	0.0	6	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
3	0.25	February	4.43	600	706	74	13.9	0.015		95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
4	0.33	March	4.46	600	706	71.4	14	0.015		95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
5	0.42	April	4.48	600	706	68.1	13.7	0.0	4	95	0.016	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
6	0.5	May	4.5	600	706	71.2	13.6	0.0	2	95	0.016	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
7	0.58	June	4.52	600	706	76.3	13.8	0.01		95	0.016	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
8	0.67	July	4.54	600	706	74.3	13.6	0.01		95	0.016	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
9	0.75	August	4.55	600	706	75.2	14	0.01		95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
10	0.83	September	4.57	600	704	78	14.5	0.0	1	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
11	0.92	October	4.58	600	706	74.4	14	0.013		95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
12	1	November	4.59	600	706	74.5	14.1	0.0	6	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
13	1.08	December	4.6	600	706	75.2	14.1	0.018		95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
14	1.17	January	4.61	600	706	73.7	14.1	0.0	9	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
15	1.25	February	4.62	600	706	74	13.9	0.0	7	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
16	1.33	March	4.63	600	706	71.4	14	0.0	7	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
17	1.42	April	4.64	600	706	68.1	13.7	0.015		95	0.016	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
18	1.5	May	4.64	600	706	71.2	13.6	0.013		95	0.016	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
19	1.58	June	4.65	600	706	76.3	13.8	0.0	1	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
20	1.67	July	4.66	600	706	74.3	13.7	0.0	1	95	0.016	0.0	0.0	0.018	0.3	0	0.013
21	1.75	August	4.66	600	706	75.2	14	0.0	1	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
22	1.83	September	4.67	600	704	78	14.6	0.0	1	95	0.018	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
23	1.92	October	4.67	600	706	74.4	14.1	0.0	4	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
24	2	November	4.68	600	706	74.5	14.1	0.0	6	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
25	2.08	December	4.68	600	706	75.2	14.2	0.018		95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
26	2.17	January	4.69	600	706	73.7	14.1	0.0	9	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
27	2.25	February	4.69	600	706	74	13.9	0.018		95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
28	2.33	March	4.7	600	706	71.4	14	0.0	7	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
29	2.42	April	4.7	600	706	68.1	13.7	0.0	6	95	0.016	0.0	0.0	0.018	0.1	0	0.013
30	2.5	May	4.7	600	706	71.2	13.6	0.0	4	95	0.016	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
31	2.58	June	4.71	600	706	76.3	13.8	0.0	2	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
32	2.67	July	4.71	600	706	74.3	13.7	0.0	1	95	0.016	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
33	2.75	August	4.72	600	706	75.2	14	0.0	1	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
34	2.83	September	4.72	600	704	78	14.6	0.0	2	95	0.018	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
35	2.92	October	4.72	600	706	74.4	14.1	0.0	4	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
36	3	November	4.73	600	706	74.5	14.1	0.0	6	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
37	3.08	December	4.73	600	706	75.2	14.2	0.018		95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013
38	3.17	January	4.73	600	706	73.7	14.1	0.0	9	95	0.017	0.0	0.0	0.018	0.4	0	0.013



39	3.25	February	4.74	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.4	0	0.013
40	3.33	March	4.74	600	706	71.1	14	0.07	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.1	0	0.013
41	3.42	April	4.74	600	706	68.1	13.7	0.06	95	0.016	0.06	0.07	0.07	0.4	0	0.013
42	3.5	May	4.75	600	706	71.2	13.6	0.04	95	0.016	0.06	0.07	0.07	0.4	0	0.013
43	3.58	June	4.75	600	706	76.3	13.8	0.02	95	0.017	0.07	0.07	0.07	0.4	0	0.013
44	3.67	July	4.75	600	706	74.3	13.7	0.01	95	0.016	0.06	0.07	0.07	0.4	0	0.013
45	3.75	August	4.75	600	706	75.2	14.1	0.01	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.4	0	0.013
46	3.83	September	4.76	600	704	78	14.6	0.02	95	0.018	0.08	0.08	0.018	0.5	0	0.013
47	3.92	October	4.76	600	706	74.4	14.1	0.04	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.4	0	0.013
48	4	November	4.76	600	706	74.5	14.2	0.07	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.4	0	0.013
49	4.08	December	4.76	600	706	75.2	14.2	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.4	0	0.013
50	4.17	January	4.77	600	706	73.7	14.1	0.09	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.4	0	0.013
51	4.25	February	4.77	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.4	0	0.013
52	4.33	March	4.77	600	706	71.4	14	0.07	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.4	0	0.013
53	4.42	April	4.77	600	706	68.1	13.7	0.06	95	0.016	0.06	0.07	0.07	0.4	0	0.013
54	4.5	May	4.78	600	706	71.2	13.6	0.04	95	0.016	0.06	0.07	0.07	0.4	0	0.013
55	4.58	June	4.78	600	706	76.3	13.9	0.02	95	0.017	0.07	0.08	0.07	0.4	0	0.013
56	4.67	July	4.78	600	706	74.3	13.7	0.01	95	0.016	0.06	0.07	0.07	0.4	0	0.013
57	4.75	August	4.78	600	706	75.2	14.1	0.01	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.4	0	0.013
58	4.83	September	4.78	600	704	78	14.6	0.02	95	0.018	0.08	0.08	0.018	0.5	0	0.013
59	4.92	October	4.79	600	706	74.4	14.1	0.04	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.4	0	0.013
60	5	November	4.79	600	706	74.5	14.2	0.07	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.4	0	0.013
61	5.08	December	4.79	600	706	75.2	14.2	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.5	0	0.013
62	5.17	January	4.79	600	706	73.7	14.2	0.02	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.5	0	0.013
63	5.25	February	4.79	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.4	0	0.013
64	5.33	March	4.8	600	706	71.4	14	0.07	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.5	0	0.013
65	5.42	April	4.8	600	706	68.1	13.7	0.06	95	0.016	0.06	0.07	0.07	0.4	0	0.013
66	5.5	May	4.8	600	706	71.2	13.6	0.04	95	0.016	0.06	0.07	0.07	0.4	0	0.013
67	5.58	June	4.8	600	706	76.3	13.9	0.02	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.4	0	0.013
68	5.67	July	4.8	600	706	74.3	13.7	0.01	95	0.017	0.07	0.07	0.07	0.4	0	0.013
69	5.75	August	4.8	600	706	75.2	14.1	0.01	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.5	0	0.013
70	5.83	September	4.81	600	704	78	14.6	0.02	95	0.018	0.08	0.08	0.018	0.5	0	0.013
71	5.92	October	4.81	600	706	74.4	14.1	0.04	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.5	0	0.013
72	6	November	4.81	600	706	74.5	14.2	0.07	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.5	0	0.013
73	6.08	December	4.81	600	706	75.2	14.2	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.5	0	0.013
74	6.17	January	4.81	600	706	73.7	14.2	0.02	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.5	0	0.013
75	6.25	February	4.81	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.5	0	0.013
76	6.33	March	4.82	600	706	71.4	14	0.07	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.5	0	0.013
77	6.42	April	4.82	600	706	68.1	13.7	0.06	95	0.016	0.06	0.07	0.07	0.5	0	0.013
78	6.5	May	4.82	600	706	71.2	13.6	0.04	95	0.016	0.06	0.07	0.07	0.4	0	0.013
79	6.58	June	4.82	600	706	76.3	13.9	0.02	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.5	0	0.013
80	6.67	July	4.82	600	706	74.3	13.7	0.01	95	0.017	0.07	0.07	0.07	0.5	0	0.013

81	6.75	August	4.82	600	706	75.2	14.1	0.0	1	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
82	6.83	September	4.82	600	704	78	14.6	0.0	2	95	0.018	0.0	8	0.0	9	0.018	0.5	0	0.0	4	
83	6.92	October	4.83	600	706	74.4	14.1	0.0	4	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
84	7	November	4.83	600	706	74.5	14.2	0.0	7	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
85	7.08	December	4.83	600	706	75.2	14.2	0.0	9	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
86	7.17	January	4.83	600	706	73.7	14.2	0.02		95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
87	7.25	February	4.83	600	706	74	14	0.018		95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
88	7.33	March	4.83	600	706	71.4	14.1	0.018		95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
89	7.42	April	4.83	600	706	68.1	13.7	0.0	6	95	0.017	0.0	6	0.0	7	0.0	7	0.5	0	0.0	4
90	7.5	May	4.83	600	706	71.2	13.6	0.0	4	95	0.016	0.0	6	0.0	7	0.0	7	0.5	0	0.0	4
91	7.58	June	4.83	600	706	76.3	13.9	0.0	2	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
92	7.67	July	4.84	600	706	74.3	13.7	0.0	2	95	0.017	0.0	7	0.0	7	0.0	7	0.5	0	0.0	4
93	7.75	August	4.84	600	706	75.2	14.1	0.0	1	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
94	7.83	September	4.84	600	704	78	14.6	0.0	2	95	0.018	0.0	8	0.0	9	0.018	0.6	0	0.0	4	
95	7.92	October	4.84	600	706	74.4	14.1	0.0	1	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
96	8	November	4.84	600	706	74.5	14.2	0.0	7	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
97	8.08	December	4.84	600	706	75.2	14.2	0.0	9	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
98	8.17	January	4.84	600	706	73.7	14.2	0.02		95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
99	8.25	February	4.84	600	706	74	14	0.018		95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
100	8.33	March	4.84	600	706	71.4	14.1	0.018		95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
101	8.42	April	4.85	600	706	68.1	13.7	0.0	6	95	0.017	0.0	6	0.0	7	0.0	7	0.5	0	0.0	4
102	8.5	May	4.85	600	706	71.2	13.6	0.0	4	95	0.016	0.0	6	0.0	7	0.0	7	0.5	0	0.0	4
103	8.58	June	4.85	600	706	76.3	13.9	0.0	2	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
104	8.67	July	4.85	600	706	74.3	13.7	0.0	2	95	0.017	0.0	7	0.0	7	0.0	7	0.5	0	0.0	4
105	8.75	August	4.85	600	706	75.2	14.1	0.0	1	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
106	8.83	September	4.85	600	704	78	14.7	0.0	2	95	0.018	0.0	8	0.0	9	0.0	9	0.6	0	0.0	4
107	8.92	October	4.85	600	706	74.4	14.1	0.015		95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
108	9	November	4.85	600	706	74.5	14.2	0.0	7	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0	0.0	4	
109	9.08	December	4.85	600	706	75.2	14.2	0.0	9	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.6	0	0.0	4	
110	9.17	January	4.85	600	706	73.7	14.2	0.02		95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.6	0	0.0	4	
111	9.25	February	4.85	600	706	74	14	0.018		95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.6	0	0.0	4	
112	9.33	March	4.86	600	706	71.4	14.1	0.018		95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.6	0	0.0	4	
113	9.42	April	4.86	600	706	68.1	13.7	0.0	6	95	0.017	0.0	6	0.0	7	0.0	7	0.5	0.001	0.0	4
114	9.5	May	4.86	600	706	71.2	13.7	0.0	4	95	0.016	0.0	6	0.0	7	0.0	7	0.5	0.001	0.0	4
115	9.58	June	4.86	600	706	76.3	13.9	0.0	2	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.5	0.001	0.001	0.0	4
116	9.67	July	4.86	600	706	74.3	13.7	0.0	2	95	0.017	0.0	7	0.0	7	0.0	7	0.5	0.001	0.0	4
117	9.75	August	4.86	600	706	75.2	14.1	0.0	1	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.6	0.001	0.001	0.0	4
118	9.83	September	4.86	600	704	78	14.7	0.0	2	95	0.018	0.0	8	0.0	9	0.0	9	0.6	0.001	0.0	4
119	9.92	October	4.86	600	706	74.4	14.1	0.015		95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.6	0.001	0.001	0.0	4
120	10	November	4.86	600	706	74.5	14.2	0.0	7	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.6	0.001	0.001	0.0	4
121	10.1	December	4.86	600	706	75.2	14.2	0.0	9	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.6	0.001	0.001	0.0	4
122	10.2	January	4.86	600	706	73.7	14.2	0.02		95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	0.6	0.001	0.001	0.0	4

123	10.3	February	4.86	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
124	10.3	March	-1.86	600	706	71.1	14.1	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
125	10.4	April	-1.87	600	706	68.1	13.7	0.016	95	0.017	0.07	0.07	0.018	0.6	0.001	0.04
126	10.5	May	-1.87	600	706	71.2	13.7	0.014	95	0.016	0.06	0.07	0.017	0.5	0.001	0.04
127	10.6	June	-1.87	600	706	76.3	13.9	0.012	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
128	10.7	July	-1.87	600	706	74.3	13.7	0.012	95	0.017	0.07	0.07	0.017	0.6	0.001	0.04
129	10.8	August	-1.87	600	706	75.2	14.1	0.011	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
130	10.8	September	4.87	600	704	78	14.7	0.012	95	0.018	0.08	0.09	0.019	0.7	0.001	0.04
131	10.9	October	4.87	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
132	11	November	4.87	600	706	74.5	14.2	0.017	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
133	11.1	December	4.87	600	706	75.2	14.2	0.019	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
134	11.2	January	4.87	600	706	73.7	14.2	0.02	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
135	11.3	February	4.87	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
136	11.3	March	4.87	600	706	71.4	14.1	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
137	11.4	April	-1.87	600	706	68.1	13.7	0.016	95	0.017	0.07	0.07	0.017	0.6	0.001	0.04
138	11.5	May	-1.87	600	706	71.2	13.7	0.014	95	0.016	0.06	0.07	0.017	0.6	0.001	0.04
139	11.6	June	-1.88	600	706	76.3	13.9	0.012	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
140	11.7	July	-1.88	600	706	74.3	13.7	0.012	95	0.017	0.07	0.07	0.017	0.6	0.001	0.04
141	11.8	August	-1.88	600	706	75.2	14.1	0.011	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
142	11.8	September	-1.88	600	704	78	14.7	0.012	95	0.018	0.08	0.09	0.019	0.7	0.001	0.04
143	11.9	October	4.88	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
144	12	November	4.88	600	706	74.5	14.2	0.017	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
145	12.1	December	4.88	600	706	75.2	14.2	0.019	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.7	0.001	0.04
146	12.2	January	4.88	600	706	73.7	14.2	0.02	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.7	0.001	0.04
147	12.3	February	4.88	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.04
148	12.3	March	4.88	600	706	71.4	14.1	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.7	0.001	0.04
149	12.4	April	4.88	600	706	68.1	13.7	0.016	95	0.017	0.07	0.07	0.017	0.6	0.001	0.015
150	12.5	May	-1.88	600	706	71.2	13.7	0.014	95	0.016	0.06	0.07	0.017	0.6	0.001	0.015
151	12.6	June	-1.88	600	706	76.3	13.9	0.012	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.6	0.001	0.015
152	12.7	July	-1.88	600	706	74.3	13.7	0.012	95	0.017	0.07	0.07	0.017	0.6	0.001	0.015
153	12.8	August	-1.88	600	706	75.2	14.1	0.011	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.7	0.001	0.015
154	12.8	September	-1.89	600	704	78	14.7	0.012	95	0.018	0.08	0.09	0.019	0.7	0.001	0.015
155	12.9	October	-1.89	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.7	0.001	0.015
156	13	November	4.89	600	706	74.5	14.2	0.017	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.7	0.001	0.015
157	13.1	December	4.89	600	706	75.2	14.2	0.019	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.7	0.001	0.015
158	13.2	January	4.89	600	706	73.7	14.2	0.02	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.7	0.001	0.015
159	13.3	February	4.89	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.7	0.001	0.015
160	13.3	March	4.89	600	706	71.4	14.1	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.7	0.001	0.015
161	13.4	April	4.89	600	706	68.1	13.7	0.016	95	0.017	0.07	0.07	0.017	0.6	0.001	0.015
162	13.5	May	4.89	600	706	71.2	13.7	0.014	95	0.016	0.06	0.07	0.017	0.6	0.001	0.015
163	13.6	June	-1.89	600	706	76.3	13.9	0.012	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.7	0.001	0.015
164	13.7	July	-1.89	600	706	74.3	13.7	0.012	95	0.017	0.07	0.07	0.017	0.6	0.001	0.015

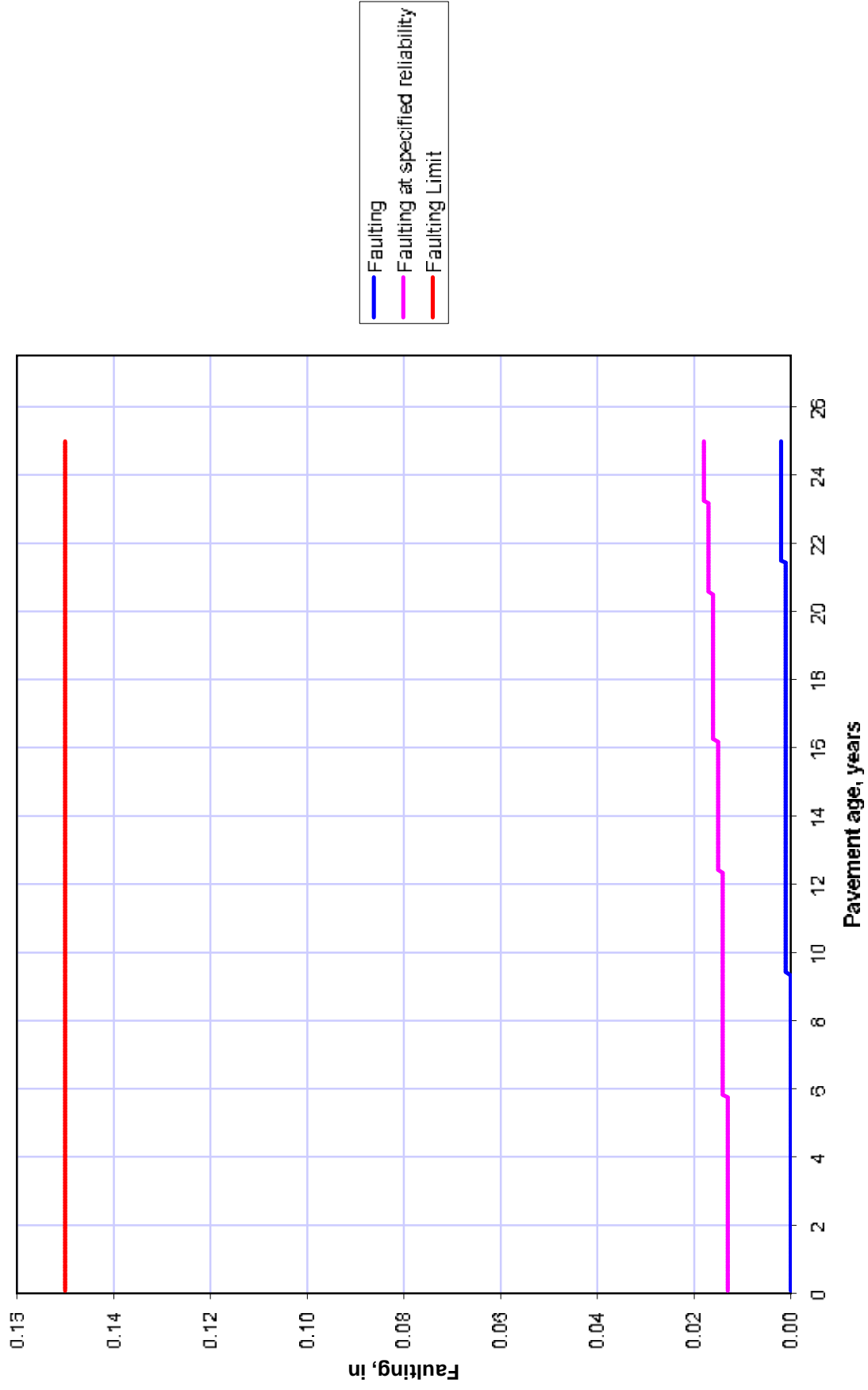
165	13.8	August	4.89	600	706	75.2	14.1	0.0 1	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.7	0.001	0.015
166	13.8	September	-1.89	600	704	78	14.7	0.0 2	95	0.018	0.0 8	0.0 9	0.0 9	0.8	0.001	0.015
167	13.9	October	-1.89	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.7	0.001	0.015
168	14	November	-1.89	600	706	74.5	14.2	0.0 7	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.7	0.001	0.015
169	14.1	December	-1.89	600	706	75.2	14.2	0.0 9	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.7	0.001	0.015
170	14.2	January	-1.89	600	706	73.7	14.2	0.02	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.7	0.001	0.015
171	14.3	February	-1.9	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.7	0.001	0.015
172	14.3	March	4.9	600	706	71.4	14.1	0.018	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.7	0.001	0.015
173	14.4	April	4.9	600	706	68.1	13.7	0.0 6	95	0.017	0.0 7	0.0 7	0.0 7	0.7	0.001	0.015
174	14.5	May	4.9	600	706	71.2	13.7	0.0 4	95	0.016	0.0 6	0.0 7	0.0 7	0.7	0.001	0.015
175	14.6	June	4.9	600	706	76.3	13.9	0.0 2	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.7	0.001	0.015
176	14.7	July	4.9	600	706	74.3	13.7	0.0 2	95	0.017	0.0 7	0.0 7	0.0 7	0.7	0.001	0.015
177	14.8	August	4.9	600	706	75.2	14.1	0.0 1	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.7	0.001	0.015
178	14.8	September	4.9	600	704	78	14.7	0.0 2	95	0.018	0.0 8	0.0 9	0.0 9	0.8	0.001	0.015
179	14.9	October	-1.9	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.7	0.001	0.015
180	15	November	-1.9	600	706	74.5	14.2	0.0 7	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.7	0.001	0.015
181	15.1	December	-1.9	600	706	75.2	14.2	0.0 9	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.015
182	15.2	January	-1.9	600	706	73.7	14.2	0.02	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.015
183	15.3	February	-1.9	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.7	0.001	0.015
184	15.3	March	-1.9	600	706	71.4	14.1	0.018	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.7	0.001	0.015
185	15.4	April	4.9	600	706	68.1	13.7	0.0 6	95	0.017	0.0 7	0.0 7	0.0 7	0.7	0.001	0.015
186	15.5	May	4.9	600	706	71.2	13.7	0.0 4	95	0.016	0.0 6	0.0 7	0.0 7	0.7	0.001	0.015
187	15.6	June	4.9	600	706	76.3	13.9	0.0 2	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.7	0.001	0.015
188	15.7	July	4.9	600	706	74.3	13.7	0.0 2	95	0.017	0.0 7	0.0 7	0.0 7	0.7	0.001	0.015
189	15.8	August	4.9	600	706	75.2	14.1	0.0 1	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.015
190	15.8	September	4.91	600	704	78	14.7	0.0 2	95	0.018	0.0 8	0.0 9	0.0 9	0.8	0.001	0.015
191	15.9	October	4.91	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.015
192	16	November	-1.91	600	706	74.5	14.2	0.0 7	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.015
193	16.1	December	-1.91	600	706	75.2	14.2	0.0 9	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.015
194	16.2	January	-1.91	600	706	73.7	14.2	0.02	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.015
195	16.3	February	-1.91	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.0 6
196	16.3	March	-1.91	600	706	71.4	14.1	0.018	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.0 6
197	16.4	April	-1.91	600	706	68.1	13.7	0.0 6	95	0.017	0.0 7	0.0 7	0.0 7	0.7	0.001	0.0 6
198	16.5	May	4.91	600	706	71.2	13.7	0.0 4	95	0.016	0.0 6	0.0 7	0.0 7	0.7	0.001	0.0 6
199	16.6	June	4.91	600	706	76.3	13.9	0.0 2	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.0 6
200	16.7	July	4.91	600	706	74.3	13.7	0.0 2	95	0.017	0.0 7	0.0 7	0.0 7	0.7	0.001	0.0 6
201	16.8	August	4.91	600	706	75.2	14.1	0.0 1	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.0 6
202	16.8	September	4.91	600	704	78	14.7	0.0 2	95	0.018	0.0 8	0.0 9	0.0 9	0.9	0.001	0.0 6
203	16.9	October	4.91	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.0 6
204	17	November	4.91	600	706	74.5	14.2	0.0 7	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.0 6
205	17.1	December	-1.91	600	706	75.2	14.2	0.0 9	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.0 6
206	17.2	January	-1.91	600	706	73.7	14.2	0.02	95	0.017	0.0 7	0.0 8	0.018	0.8	0.001	0.0 6

207	17.3	February	4.91	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.8	0.001	0.06
208	17.3	March	-1.91	600	706	71.1	14.1	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.8	0.001	0.06
209	17.4	April	-1.91	600	706	68.1	13.7	0.016	95	0.017	0.07	0.07	0.07	0.8	0.001	0.06
210	17.5	May	-1.91	600	706	71.2	13.7	0.014	95	0.016	0.06	0.07	0.07	0.8	0.001	0.06
211	17.6	June	-1.91	600	706	76.3	13.9	0.012	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.8	0.001	0.06
212	17.7	July	-1.92	600	706	74.3	13.7	0.012	95	0.017	0.07	0.07	0.07	0.8	0.001	0.06
213	17.8	August	-1.92	600	706	75.2	14.1	0.011	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.8	0.001	0.06
214	17.8	September	4.92	600	704	78	14.7	0.012	95	0.018	0.08	0.09	0.09	0.9	0.001	0.06
215	17.9	October	4.92	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.8	0.001	0.06
216	18	November	4.92	600	706	74.5	14.2	0.017	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.8	0.001	0.06
217	18.1	December	4.92	600	706	75.2	14.2	0.019	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
218	18.2	January	4.92	600	706	73.7	14.2	0.02	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
219	18.3	February	4.92	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
220	18.3	March	4.92	600	706	71.4	14.1	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
221	18.4	April	-1.92	600	706	68.1	13.7	0.016	95	0.017	0.07	0.07	0.07	0.8	0.001	0.06
222	18.5	May	-1.92	600	706	71.2	13.7	0.014	95	0.016	0.06	0.07	0.07	0.8	0.001	0.06
223	18.6	June	-1.92	600	706	76.3	13.9	0.012	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.8	0.001	0.06
224	18.7	July	-1.92	600	706	74.3	13.8	0.012	95	0.017	0.07	0.07	0.07	0.8	0.001	0.06
225	18.8	August	-1.92	600	706	75.2	14.1	0.011	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
226	18.8	September	-1.92	600	704	78	14.7	0.012	95	0.018	0.08	0.09	0.09	1	0.001	0.06
227	18.9	October	4.92	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
228	19	November	4.92	600	706	74.5	14.2	0.017	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
229	19.1	December	4.92	600	706	75.2	14.2	0.019	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
230	19.2	January	4.92	600	706	73.7	14.2	0.02	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
231	19.3	February	4.92	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
232	19.3	March	4.92	600	706	71.4	14.1	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
233	19.4	April	4.92	600	706	68.1	13.7	0.016	95	0.017	0.07	0.07	0.07	0.8	0.001	0.06
234	19.5	May	-1.92	600	706	71.2	13.7	0.014	95	0.016	0.06	0.07	0.07	0.8	0.001	0.06
235	19.6	June	-1.92	600	706	76.3	13.9	0.012	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
236	19.7	July	-1.92	600	706	74.3	13.8	0.012	95	0.017	0.07	0.07	0.07	0.9	0.001	0.06
237	19.8	August	-1.92	600	706	75.2	14.1	0.011	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
238	19.8	September	-1.93	600	704	78	14.7	0.012	95	0.018	0.08	0.09	0.09	1	0.001	0.06
239	19.9	October	-1.93	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
240	20	November	4.93	600	706	74.5	14.2	0.017	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
241	20.1	December	4.93	600	706	75.2	14.2	0.019	95	0.017	0.07	0.08	0.018	1	0.001	0.06
242	20.2	January	4.93	600	706	73.7	14.2	0.02	95	0.017	0.07	0.08	0.018	1	0.001	0.06
243	20.3	February	4.93	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
244	20.3	March	4.93	600	706	71.4	14.1	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.06
245	20.4	April	4.93	600	706	68.1	13.7	0.016	95	0.017	0.07	0.07	0.07	0.9	0.001	0.06
246	20.5	May	4.93	600	706	71.2	13.7	0.014	95	0.016	0.06	0.07	0.07	0.9	0.001	0.06
247	20.6	June	-1.93	600	706	76.3	13.9	0.012	95	0.017	0.07	0.08	0.018	0.9	0.001	0.07
248	20.7	July	-1.93	600	706	74.3	13.8	0.012	95	0.017	0.07	0.07	0.07	0.9	0.001	0.07

249	20.8	August	4.93	600	706	75.2	14.1	0.0	1	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.001	0.0	7	
250	20.8	September	-1.93	600	704	78	14.7	0.0	2	95	0.018	0.0	8	0.0	9	0.018	1.1	0.001	0.0	7	
251	20.9	October	-1.93	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.001	0.0	7		
252	21	November	-1.93	600	706	74.5	14.2	0.0	7	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.001	0.0	7	
253	21.1	December	-1.93	600	706	75.2	14.2	0.0	9	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.001	0.0	7	
254	21.2	January	-1.93	600	706	73.7	14.2	0.02	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.001	0.0	7		
255	21.3	February	-1.93	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.001	0.0	7		
256	21.3	March	4.93	600	706	71.4	14.1	0.018	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.001	0.0	7		
257	21.4	April	4.93	600	706	68.1	13.7	0.0	6	95	0.017	0.0	7	0.0	7	0.018	0.9	0.001	0.0	7	
258	21.5	May	4.93	600	706	71.2	13.7	0.0	4	95	0.016	0.0	6	0.0	7	0.018	0.9	0.002	0.0	7	
259	21.6	June	4.93	600	706	76.3	13.9	0.0	2	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.002	0.0	7	
260	21.7	July	4.93	600	706	74.3	13.8	0.0	2	95	0.017	0.0	7	0.0	7	0.018	0.9	0.002	0.0	7	
261	21.8	August	4.93	600	706	75.2	14.1	0.0	1	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.002	0.0	7	
262	21.8	September	4.93	600	704	78	14.7	0.0	2	95	0.018	0.0	8	0.0	9	0.018	1.1	0.002	0.0	7	
263	21.9	October	-1.93	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.002	0.0	7		
264	22	November	-1.93	600	706	74.5	14.2	0.0	7	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.002	0.0	7	
265	22.1	December	-1.93	600	706	75.2	14.2	0.0	9	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1.1	0.002	0.0	7	
266	22.2	January	-1.93	600	706	73.7	14.2	0.02	94.9	0.017	0.0	7	0.0	7	0.018	1.1	0.002	0.0	7		
267	22.3	February	-1.93	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.002	0.0	7		
268	22.3	March	-1.93	600	706	71.4	14.1	0.018	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.002	0.0	7		
269	22.4	April	4.93	600	706	68.1	13.7	0.0	6	95	0.017	0.0	7	0.0	7	0.018	1	0.002	0.0	7	
270	22.5	May	4.93	600	706	71.2	13.7	0.0	4	95	0.016	0.0	6	0.0	7	0.018	1	0.002	0.0	7	
271	22.6	June	4.93	600	706	76.3	13.9	0.0	2	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.002	0.0	7	
272	22.7	July	4.93	600	706	74.3	13.8	0.0	2	95	0.017	0.0	7	0.0	7	0.018	1	0.002	0.0	7	
273	22.8	August	4.93	600	706	75.2	14.1	0.0	1	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.002	0.0	7	
274	22.8	September	4.93	600	704	78	14.7	0.0	2	95	0.018	0.0	8	0.0	9	0.018	1.2	0.002	0.0	7	
275	22.9	October	4.93	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.002	0.0	7		
276	23	November	-1.93	600	706	74.5	14.2	0.0	7	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1.1	0.002	0.0	7	
277	23.1	December	-1.93	600	706	75.2	14.2	0.0	9	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1.1	0.002	0.0	7	
278	23.2	January	-1.93	600	706	73.7	14.2	0.02	94.8	0.017	0.0	7	0.0	7	0.018	1.2	0.002	0.0	7		
279	23.3	February	-1.93	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1.1	0.002	0.018			
280	23.3	March	-1.93	600	706	71.4	14.1	0.018	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1.1	0.002	0.018			
281	23.4	April	-1.93	600	706	68.1	13.7	0.0	6	95	0.017	0.0	7	0.0	7	0.018	1	0.002	0.018		
282	23.5	May	4.93	600	706	71.2	13.7	0.0	4	95	0.016	0.0	6	0.0	7	0.018	1	0.002	0.018		
283	23.6	June	4.93	600	706	76.3	13.9	0.0	2	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1	0.002	0.018		
284	23.7	July	4.93	600	706	74.3	13.8	0.0	2	95	0.017	0.0	7	0.0	7	0.018	1	0.002	0.018		
285	23.8	August	4.93	600	706	75.2	14.1	0.0	1	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1.1	0.002	0.018		
286	23.8	September	4.93	600	704	78	14.7	0.0	2	95	0.018	0.0	8	0.0	9	0.018	1.2	0.002	0.018		
287	23.9	October	4.93	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1.1	0.002	0.018			
288	24	November	4.93	600	706	74.5	14.2	0.0	7	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1.1	0.002	0.018		
289	21.1	December	-1.93	600	706	75.2	14.2	0.0	9	95	0.017	0.0	7	0.0	8	0.018	1.2	0.002	0.018		
290	21.2	January	-1.93	600	706	73.7	14.2	0.02	94.7	0.017	0.0	7	0.0	7	0.018	1.3	0.002	0.018			

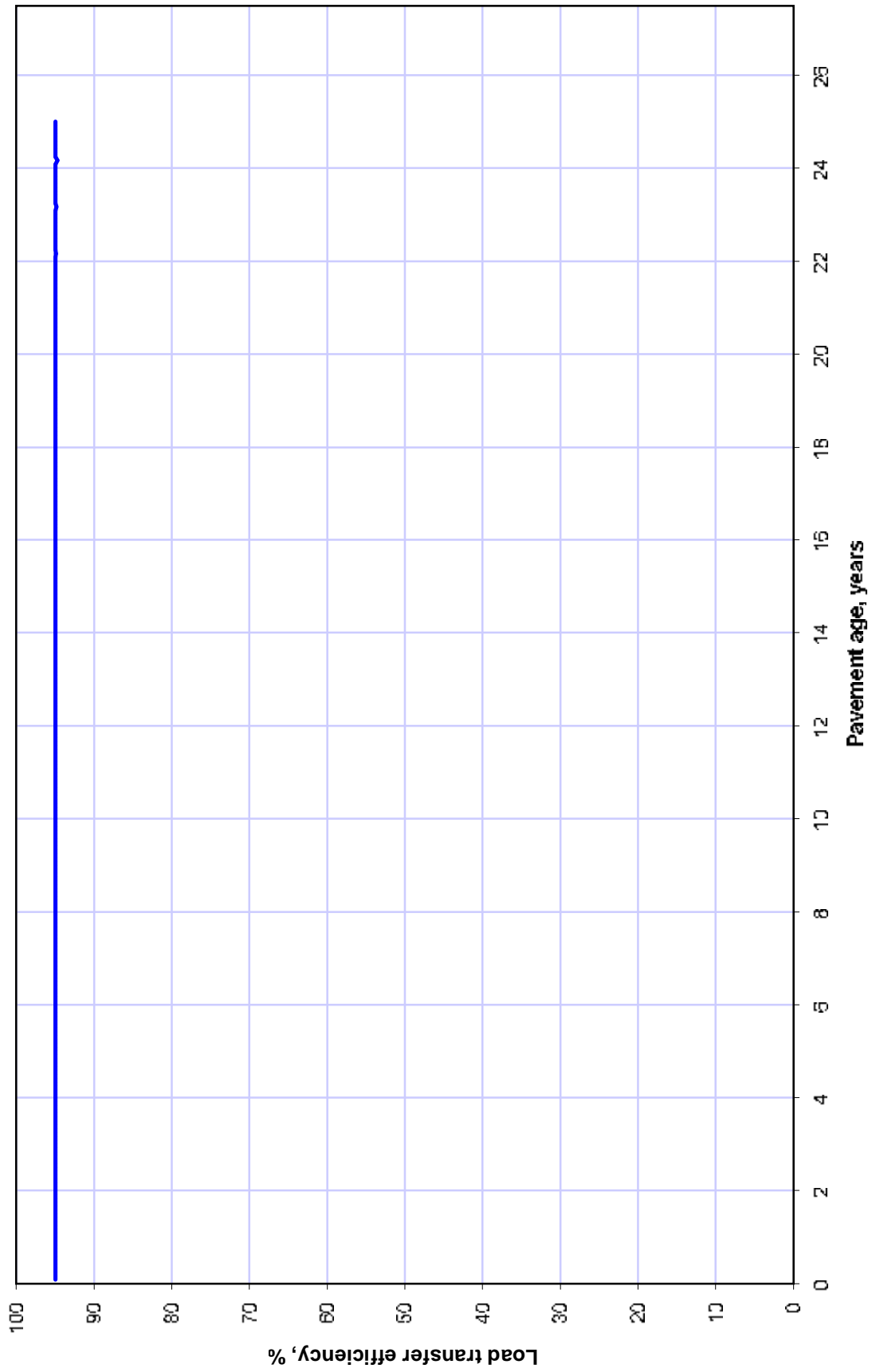
291	24.3	February	4.93	600	706	74	14	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	1.1	0.002	0.018
292	24.3	March	4.93	600	706	71.1	14.1	0.018	95	0.017	0.07	0.08	0.018	1.1	0.002	0.018
293	24.4	April	4.93	600	706	68.1	13.7	0.016	95	0.017	0.07	0.07	0.018	1.1	0.002	0.018
294	24.5	May	4.93	600	706	71.2	13.7	0.014	95	0.016	0.06	0.07	0.018	1	0.002	0.018
295	24.6	June	4.93	600	706	76.3	13.9	0.012	95	0.017	0.07	0.08	0.018	1.1	0.002	0.018
296	24.7	July	4.93	600	706	74.3	13.8	0.012	95	0.017	0.07	0.07	0.018	1.1	0.002	0.018
297	24.8	August	4.93	600	706	75.2	14.1	0.011	95	0.017	0.07	0.08	0.018	1.1	0.002	0.018
298	24.8	September	4.93	600	704	78	14.7	0.012	95	0.018	0.08	0.09	0.018	1.3	0.002	0.018
299	24.9	October	4.93	600	706	74.4	14.1	0.015	95	0.017	0.07	0.08	0.018	1.1	0.002	0.018
300	25	November	4.93	600	706	74.5	14.2	0.017	95	0.017	0.07	0.08	0.018	1.2	0.002	0.018
<b>0.0019</b>																

# Predicted Fau ting





Load transfer efficiency, %



## Predicted cracking: Project PCC2005

Pavement age		PCC		Base F, ksi	Dyn. k psi/in	Cumulative Fatigue Damage					Percent slabs cracked	Cracked at specified reliability	
mo	yr	MR psi	E Mpsi			Single	Tandem	Tridem	Quad	Total			
1	0.08	December	682	4.35	600	766	0	0	0.0001	0	0	0	6
2	0.17	January	690	4.39	600	766	0	0	0.0002	0	0	0	6
3	0.25	February	695	4.43	600	766	0	0	0.0005	0	0	0	6
4	0.33	March	700	4.46	600	766	0	0	0.0008	0	0	0	6
5	0.42	April	704	4.48	600	766	0	0	0.0011	0	0	0	6
6	0.5	May	707	4.5	600	766	0	0	0.0016	0.0001	0	0	6
7	0.58	June	710	4.52	600	766	0	0	0.0018	0.0001	0	0	6
8	0.67	July	713	4.54	600	766	0	0	0.002	0.0001	0	0	6
9	0.75	August	715	4.55	600	766	0.0021	0.0001	0	0	0.0022	0	6
10	0.83	September	717	4.57	600	766	0.0028	0.0002	0	0	0.003	0	6
11	0.92	October	719	4.58	600	766	0.0029	0.0002	0	0	0.0031	0	6
12	1	November	721	4.59	600	766	0.0029	0.0002	0	0	0.0031	0	6
13	1.08	December	722	4.6	600	766	0.003	0.0002	0	0	0.0032	0	6
14	1.17	January	723	4.61	600	766	0.0031	0.0002	0	0	0.0033	0	6
15	1.25	February	724	4.61	600	766	0.0033	0.0002	0	0	0.0035	0	6
16	1.33	March	725	4.62	600	766	0.0035	0.0002	0	0	0.0038	0	6
17	1.42	April	727	4.63	600	766	0.0038	0.0002	0	0	0.0041	0	6
18	1.5	May	728	4.63	600	766	0.0042	0.0002	0	0	0.0045	0	6
19	1.58	June	729	4.64	600	766	0.0044	0.0003	0	0	0.0047	0	6
20	1.67	July	730	4.65	600	766	0.0046	0.0003	0	0	0.0048	0	6
21	1.75	August	731	4.66	600	766	0.0047	0.0003	0	0	0.005	0	6
22	1.83	September	732	4.66	600	766	0.0053	0.0003	0	0	0.0057	0	6
23	1.92	October	733	4.67	600	766	0.0054	0.0003	0	0	0.0058	0	6
24	2	November	734	4.68	600	766	0.0055	0.0004	0	0	0.0058	0	6
25	2.08	December	735	4.68	600	766	0.0055	0.0004	0	0	0.0059	0	6
26	2.17	January	736	4.69	600	766	0.0056	0.0004	0	0	0.006	0	6
27	2.25	February	737	4.69	600	766	0.0058	0.0004	0	0	0.0062	0	6
28	2.33	March	737	4.69	600	766	0.006	0.0004	0	0	0.0064	0	6
29	2.42	April	738	4.7	600	766	0.0063	0.0004	0	0	0.0067	0	6
30	2.5	May	738	4.7	600	766	0.0067	0.0004	0	0	0.0071	0	6
31	2.58	June	739	4.71	600	766	0.0069	0.0004	0	0	0.0073	0	6
32	2.67	July	740	4.71	600	766	0.007	0.0004	0	0	0.0074	0	6
33	2.75	August	740	4.71	600	766	0.0071	0.0004	0	0	0.0076	0	6
34	2.83	September	741	4.72	600	766	0.0077	0.0005	0	0	0.0083	0	6
35	2.92	October	742	4.72	600	766	0.0078	0.0005	0	0	0.0083	0	6
36	3	November	742	4.73	600	766	0.0079	0.0005	0	0	0.0084	0	6
37	3.08	December	743	4.73	600	766	0.0079	0.0005	0	0	0.0084	0	6
38	3.17	January	743	4.73	600	766	0.008	0.0005	0	0	0.0085	0	6

39	3.25	February	744	4.74	600	706	0.0082	0.0005	0	0	0	0.0087	0	0	0	0.0001	0	6
40	3.33	March	744	-1.74	600	706	0.0081	0.0005	0	0	0	0.0089	0	0	0	0.0001	0	6
41	3.12	April	745	-1.74	600	706	0.0086	0.0006	0	0	0	0.0092	0	0	0	0.0001	0	6
42	3.5	May	745	-1.75	600	706	0.009	0.0006	0	0	0	0.0096	0	0	0	0.0001	0	6
43	3.58	June	746	-1.75	600	706	0.0092	0.0006	0	0	0	0.0098	0	0	0	0.0001	0	6
44	3.67	July	746	-1.75	600	706	0.0093	0.0006	0	0	0	0.0099	0	0	0	0.0001	0	6
45	3.75	August	746	-1.75	600	706	0.0095	0.0006	0	0	0	0.0101	0	0	0	0.0001	0	6
46	3.83	September	747	-1.76	600	704	0.0101	0.0007	0	0	0	0.0108	0.0001	0	0	0.0001	0	6
47	3.92	October	747	-1.76	600	706	0.0102	0.0007	0	0	0	0.0109	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
48	4	November	747	-1.76	600	706	0.0103	0.0007	0	0	0	0.0109	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
49	4.08	December	748	-1.76	600	706	0.0103	0.0007	0	0	0	0.011	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
50	4.17	January	748	-1.76	600	706	0.0104	0.0007	0	0	0	0.0111	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
51	4.25	February	748	-1.76	600	706	0.0106	0.0007	0	0	0	0.0112	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
52	4.33	March	748	-1.77	600	706	0.0108	0.0007	0	0	0	0.0115	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
53	4.12	April	749	-1.77	600	706	0.011	0.0007	0	0	0	0.0117	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
54	4.5	May	749	-1.77	600	706	0.0114	0.0007	0	0	0	0.0122	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
55	4.58	June	749	-1.77	600	706	0.0116	0.0007	0	0	0	0.0123	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
56	4.67	July	750	-1.77	600	706	0.0117	0.0008	0	0	0	0.0125	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
57	4.75	August	750	-1.78	600	706	0.0118	0.0008	0	0	0	0.0126	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
58	4.83	September	750	-1.78	600	704	0.0125	0.0008	0	0	0	0.0133	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
59	4.92	October	750	-1.78	600	706	0.0126	0.0008	0	0	0	0.0134	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
60	5	November	751	-1.78	600	706	0.0126	0.0008	0	0	0	0.0135	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
61	5.08	December	751	-1.78	600	706	0.0127	0.0008	0	0	0	0.0135	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
62	5.17	January	751	-1.78	600	706	0.0128	0.0008	0	0	0	0.0136	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
63	5.25	February	751	-1.79	600	706	0.013	0.0008	0	0	0	0.0138	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
64	5.33	March	752	-1.79	600	706	0.0132	0.0009	0	0	0	0.014	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
65	5.42	April	752	-1.79	600	706	0.0134	0.0009	0	0	0	0.0143	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
66	5.5	May	752	-1.79	600	706	0.0138	0.0009	0	0	0	0.0147	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
67	5.58	June	753	-1.79	600	706	0.014	0.0009	0	0	0	0.0149	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
68	5.67	July	753	-1.79	600	706	0.0141	0.0009	0	0	0	0.015	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
69	5.75	August	753	-1.8	600	706	0.0143	0.0009	0	0	0	0.0152	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
70	5.83	September	753	-1.8	600	704	0.0149	0.001	0	0	0	0.0159	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
71	5.92	October	753	-1.8	600	706	0.015	0.001	0	0	0	0.016	0.0001	0	0	0.0001	0.1	6.1
72	6	November	754	-1.8	600	706	0.0151	0.001	0	0	0	0.016	0.0001	0.0001	0	0.0001	0.1	6.1
73	6.08	December	754	-1.8	600	706	0.0151	0.001	0	0	0	0.0161	0.0001	0.0001	0	0.0001	0.1	6.1
74	6.17	January	754	-1.8	600	706	0.0152	0.001	0	0	0	0.0162	0.0001	0.0001	0	0.0001	0.1	6.1
75	6.25	February	754	-1.81	600	706	0.0154	0.001	0	0	0	0.0164	0.0001	0.0001	0	0.0001	0.1	6.1
76	6.33	March	755	-1.81	600	706	0.0156	0.001	0	0	0	0.0166	0.0001	0.0001	0	0.0001	0.1	6.1
77	6.42	April	755	-1.81	600	706	0.0159	0.001	0	0	0	0.0169	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
78	6.5	May	755	-1.81	600	706	0.0163	0.0011	0	0	0	0.0173	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
79	6.58	June	755	-1.81	600	706	0.0164	0.0011	0	0	0	0.0175	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
80	6.67	July	756	-1.81	600	706	0.0166	0.0011	0	0	0	0.0177	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1

81	6.75	August	756	4.81	600	706	0.0167	0.0011	0	0	0	0.0178	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
82	6.83	September	756	-1.82	600	704	0.0174	0.0011	0	0	0	0.0185	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
83	6.92	October	756	-1.82	600	706	0.0175	0.0011	0	0	0	0.0186	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
84	7	November	756	-1.82	600	706	0.0175	0.0011	0	0	0	0.0187	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
85	7.08	December	757	-1.82	600	706	0.0176	0.0011	0	0	0	0.0187	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
86	7.17	January	757	-1.82	600	706	0.0177	0.0011	0	0	0	0.0188	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
87	7.25	February	757	-1.82	600	706	0.0179	0.0012	0	0	0	0.019	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
88	7.33	March	757	-4.82	600	706	0.0181	0.0012	0	0	0	0.0193	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
89	7.42	April	757	-4.82	600	706	0.0184	0.0012	0	0	0	0.0195	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
90	7.5	May	758	-4.83	600	706	0.0188	0.0012	0	0	0	0.02	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
91	7.58	June	758	-4.83	600	706	0.0189	0.0012	0	0	0	0.0202	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
92	7.67	July	758	-4.83	600	706	0.0191	0.0012	0	0	0	0.0203	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
93	7.75	August	758	-4.83	600	706	0.0192	0.0013	0	0	0	0.0205	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.1	6.1
94	7.83	September	758	-4.83	600	704	0.0195	0.0013	0	0	0	0.0212	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
95	7.92	October	759	-1.83	600	706	0.02	0.0013	0	0	0	0.0213	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
96	8	November	759	-1.83	600	706	0.0201	0.0013	0	0	0	0.0214	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
97	8.08	December	759	-1.83	600	706	0.0201	0.0013	0	0	0	0.0214	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
98	8.17	January	759	-1.83	600	706	0.0202	0.0013	0	0	0	0.0215	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
99	8.25	February	759	-1.84	600	706	0.0204	0.0013	0	0	0	0.0217	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
100	8.33	March	759	-1.84	600	706	0.0206	0.0013	0	0	0	0.022	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
101	8.42	April	760	-4.84	600	706	0.0209	0.0014	0	0	0	0.0223	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
102	8.5	May	760	-4.84	600	706	0.0213	0.0014	0	0	0	0.0227	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
103	8.58	June	760	-4.84	600	706	0.0215	0.0014	0	0	0	0.0229	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
104	8.67	July	760	-4.84	600	706	0.0217	0.0014	0	0	0	0.0231	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
105	8.75	August	760	-4.84	600	706	0.0218	0.0014	0	0	0	0.0232	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
106	8.83	September	760	-4.84	600	704	0.0225	0.0015	0	0	0	0.024	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
107	8.92	October	761	-4.84	600	706	0.0226	0.0015	0	0	0	0.0241	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
108	9	November	761	-1.85	600	706	0.0227	0.0015	0	0	0	0.0241	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
109	9.08	December	761	-1.85	600	706	0.0227	0.0015	0	0	0	0.0242	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
110	9.17	January	761	-1.85	600	706	0.0228	0.0015	0	0	0	0.0243	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
111	9.25	February	761	-1.85	600	706	0.023	0.0015	0	0	0	0.0245	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
112	9.33	March	761	-1.85	600	706	0.0233	0.0015	0	0	0	0.0248	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
113	9.42	April	762	-1.85	600	706	0.0235	0.0015	0	0	0	0.025	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
114	9.5	May	762	-4.85	600	706	0.024	0.0016	0	0	0	0.0255	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
115	9.58	June	762	-4.85	600	706	0.0241	0.0016	0	0	0	0.0257	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
116	9.67	July	762	-4.85	600	706	0.0243	0.0016	0	0	0	0.0259	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
117	9.75	August	762	-4.85	600	706	0.0244	0.0016	0	0	0	0.026	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
118	9.83	September	762	-4.85	600	704	0.0252	0.0016	0	0	0	0.0268	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
119	9.92	October	762	-4.86	600	706	0.0253	0.0016	0	0	0	0.0269	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
120	10	November	762	-4.86	600	706	0.0253	0.0016	0	0	0	0.027	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
121	10.08	December	763	-1.86	600	706	0.0254	0.0017	0	0	0	0.027	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
122	10.17	January	763	-1.86	600	706	0.0255	0.0017	0	0	0	0.0271	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3

123	10.25	February	763	4.86	600	766	0.0257	0.0017	0	0	0	0.0274	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
124	10.34	March	763	-1.86	600	706	0.0259	0.0017	0	0	0	0.0276	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.4
125	10.12	April	763	-1.86	600	706	0.0262	0.0017	0	0	0	0.0279	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.2	6.3
126	10.5	May	763	-1.86	600	706	0.0267	0.0017	0	0	0	0.0284	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.3	6.4
127	10.58	June	763	-1.86	600	706	0.0269	0.0017	0	0	0	0.0286	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.3	6.4
128	10.67	July	763	-1.86	600	706	0.027	0.0018	0	0	0	0.0288	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.3	6.4
129	10.75	August	764	-1.86	600	706	0.0272	0.0018	0	0	0	0.0289	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.3	6.4
130	10.83	September	764	4.86	600	704	0.0279	0.0018	0	0	0	0.0298	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.3	6.4
131	10.92	October	764	4.86	600	706	0.028	0.0018	0	0	0	0.0298	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.3	6.4
132	11	November	764	4.87	600	766	0.0281	0.0018	0	0	0	0.0299	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.3	6.4
133	11.08	December	764	4.87	600	766	0.0281	0.0018	0	0	0	0.03	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.3	6.4
134	11.17	January	764	4.87	600	766	0.0282	0.0018	0	0	0	0.0301	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.3	6.4
135	11.25	February	764	4.87	600	766	0.0285	0.0019	0	0	0	0.0303	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.3	6.4
136	11.33	March	764	4.87	600	766	0.0287	0.0019	0	0	0	0.0306	0.0001	0.0001	0	0.0002	0.3	6.4
137	11.12	April	765	-1.87	600	706	0.029	0.0019	0	0	0	0.0309	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.3	6.4
138	11.5	May	765	-1.87	600	706	0.0295	0.0019	0	0	0	0.0314	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.3	6.4
139	11.58	June	765	-1.87	600	706	0.0297	0.0019	0	0	0	0.0316	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.3	6.4
140	11.67	July	765	-1.87	600	706	0.0298	0.0019	0	0	0	0.0318	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.3	6.4
141	11.75	August	765	-1.87	600	706	0.03	0.002	0	0	0	0.0319	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.3	6.4
142	11.83	September	765	-1.87	600	704	0.0308	0.002	0	0	0	0.0328	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.3	6.4
143	11.92	October	765	4.87	600	706	0.0309	0.002	0	0	0	0.0329	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.3	6.4
144	12	November	765	4.87	600	706	0.0309	0.002	0	0	0	0.0329	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.3	6.4
145	12.08	December	765	4.87	600	766	0.031	0.002	0	0	0	0.033	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.3	6.4
146	12.17	January	765	4.87	600	766	0.0311	0.002	0	0	0	0.0331	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.3	6.4
147	12.25	February	766	4.88	600	766	0.0313	0.002	0	0	0	0.0333	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.3	6.4
148	12.33	March	766	4.88	600	766	0.0316	0.0021	0	0	0	0.0336	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.3	6.4
149	12.42	April	766	4.88	600	766	0.0319	0.0021	0	0	0	0.0339	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.3	6.4
150	12.5	May	766	-1.88	600	706	0.0323	0.0021	0	0	0	0.0345	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.3	6.4
151	12.58	June	766	-1.88	600	706	0.0325	0.0021	0	0	0	0.0347	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
152	12.67	July	766	-1.88	600	706	0.0327	0.0021	0	0	0	0.0348	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
153	12.75	August	766	-1.88	600	706	0.0329	0.0021	0	0	0	0.035	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
154	12.83	September	766	-1.88	600	704	0.0337	0.0022	0	0	0	0.0359	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
155	12.92	October	766	-1.88	600	706	0.0338	0.0022	0	0	0	0.036	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
156	13	November	766	4.88	600	706	0.0338	0.0022	0	0	0	0.036	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
157	13.08	December	766	4.88	600	706	0.0339	0.0022	0	0	0	0.0361	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
158	13.17	January	767	4.88	600	766	0.034	0.0022	0	0	0	0.0362	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
159	13.25	February	767	4.88	600	766	0.0342	0.0022	0	0	0	0.0365	0.0001	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
160	13.33	March	767	4.88	600	766	0.0345	0.0022	0	0	0	0.0368	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
161	13.42	April	767	4.88	600	766	0.0348	0.0023	0	0	0	0.0371	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
162	13.5	May	767	4.88	600	766	0.0353	0.0023	0	0	0	0.0376	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
163	13.58	June	767	-1.88	600	706	0.0355	0.0023	0	0	0	0.0378	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
164	13.67	July	767	-1.89	600	706	0.0357	0.0023	0	0	0	0.038	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6

165	13.75	August	767	4.89	600	706	0.0359	0.0023	0	0	0	0.0382	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
166	13.83	September	767	-1.89	600	704	0.0367	0.0021	0	0	0	0.0391	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
167	13.92	October	767	-1.89	600	706	0.0368	0.0024	0	0	0	0.0392	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
168	14	November	767	-1.89	600	706	0.0369	0.0024	0	0	0	0.0393	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
169	14.08	December	767	-1.89	600	706	0.037	0.0024	0	0	0	0.0394	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
170	14.17	January	768	-1.89	600	706	0.0371	0.0024	0	0	0	0.0395	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
171	14.25	February	768	-1.89	600	706	0.0373	0.0024	0	0	0	0.0397	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
172	14.33	March	768	-4.89	600	706	0.0376	0.0024	0	0	0	0.04	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.4	6.6
173	14.42	April	768	-4.89	600	706	0.0379	0.0025	0	0	0	0.0404	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.5	6.7
174	14.5	May	768	-4.89	600	706	0.0384	0.0025	0	0	0	0.0409	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.5	6.7
175	14.58	June	768	-4.89	600	706	0.0386	0.0025	0	0	0	0.0411	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.5	6.7
176	14.67	July	768	-4.89	600	706	0.0388	0.0025	0	0	0	0.0413	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.5	6.7
177	14.75	August	768	-4.89	600	706	0.039	0.0025	0	0	0	0.0415	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.5	6.7
178	14.83	September	768	-4.89	600	704	0.0395	0.0026	0	0	0	0.0425	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.5	6.7
179	14.92	October	768	-1.89	600	706	0.04	0.0026	0	0	0	0.0426	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.5	6.7
180	15	November	768	-1.89	600	706	0.04	0.0026	0	0	0	0.0426	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.5	6.7
181	15.08	December	768	-1.89	600	706	0.0401	0.0026	0	0	0	0.0427	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.5	6.7
182	15.17	January	769	-1.89	600	706	0.0402	0.0026	0	0	0	0.0428	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.5	6.7
183	15.25	February	769	-1.9	600	706	0.0405	0.0026	0	0	0	0.0441	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.5	6.7
184	15.33	March	769	-1.9	600	706	0.0407	0.0027	0	0	0	0.0444	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.5	6.7
185	15.42	April	769	-4.9	600	706	0.0411	0.0027	0	0	0	0.0437	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.5	6.7
186	15.5	May	769	-4.9	600	706	0.0416	0.0027	0	0	0	0.0443	0.0002	0.0001	0	0.0003	0.5	6.7
187	15.58	June	769	-4.9	600	706	0.0418	0.0027	0	0	0	0.0446	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.5	6.7
188	15.67	July	769	-4.9	600	706	0.042	0.0027	0	0	0	0.0448	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.5	6.7
189	15.75	August	769	-4.9	600	706	0.0422	0.0028	0	0	0	0.045	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.5	6.7
190	15.83	September	769	-4.9	600	704	0.0431	0.0028	0	0	0	0.0459	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9
191	15.92	October	769	-4.9	600	706	0.0432	0.0028	0	0	0	0.046	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9
192	16	November	769	-1.9	600	706	0.0433	0.0028	0	0	0	0.0461	0.0002	0.0001	0	0.0001	0.6	6.9
193	16.08	December	769	-1.9	600	706	0.0434	0.0028	0	0	0	0.0462	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9
194	16.17	January	769	-1.9	600	706	0.0435	0.0028	0	0	0	0.0463	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9
195	16.25	February	770	-1.9	600	706	0.0437	0.0029	0	0	0	0.0466	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9
196	16.33	March	770	-1.9	600	706	0.044	0.0029	0	0	0	0.0469	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9
197	16.42	April	770	-1.9	600	706	0.0444	0.0029	0	0	0	0.0473	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9
198	16.5	May	770	-4.9	600	706	0.0449	0.0029	0	0	0	0.0479	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9
199	16.58	June	770	-4.9	600	706	0.0452	0.0029	0	0	0	0.0481	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9
200	16.67	July	770	-4.9	600	706	0.0454	0.003	0	0	0	0.0483	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9
201	16.75	August	770	-4.9	600	706	0.0455	0.003	0	0	0	0.0485	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9
202	16.83	September	770	-4.9	600	704	0.0465	0.003	0	0	0	0.0493	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9
203	16.92	October	770	-4.9	600	706	0.0466	0.003	0	0	0	0.0496	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9
204	17	November	770	-4.91	600	706	0.0467	0.003	0	0	0	0.0497	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9
205	17.08	December	770	-1.91	600	706	0.0468	0.003	0	0	0	0.0498	0.0002	0.0001	0	0.0001	0.6	6.9
206	17.17	January	770	-1.91	600	706	0.0469	0.0031	0	0	0	0.0499	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.6	6.9

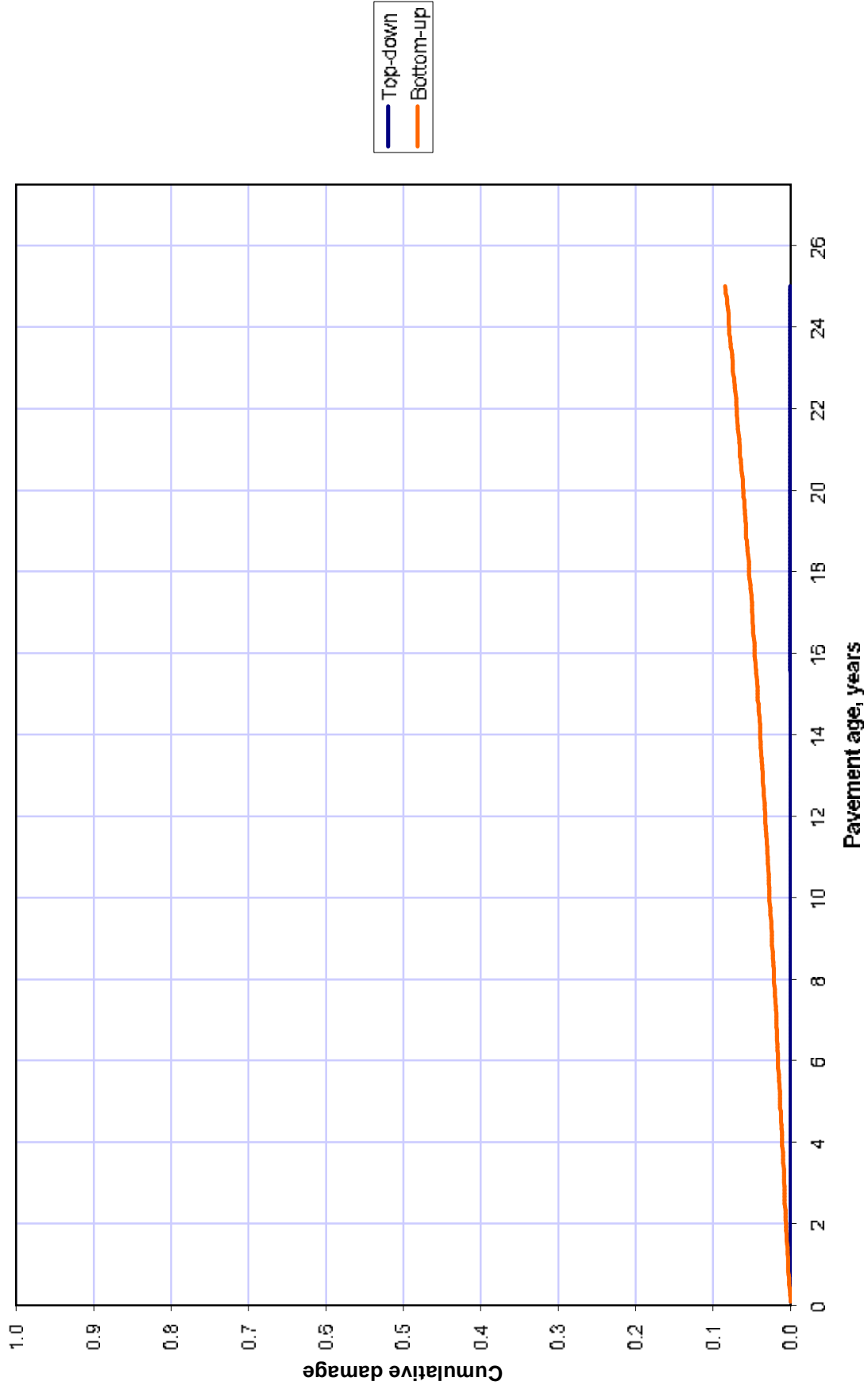
207	17.25	February	770	4.91	600	706	0.0471	0.0031	0	0	0.0502	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.7	7
208	17.34	March	770	-1.91	600	706	0.0474	0.0041	0	0	0.0505	0.0002	0.0001	0	0.0001	0.7	7
209	17.12	April	771	-1.91	600	706	0.0478	0.0041	0	0	0.0509	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.7	7
210	17.5	May	771	-1.91	600	706	0.0484	0.0042	0	0	0.0515	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.7	7
211	17.58	June	771	-1.91	600	706	0.0486	0.0042	0	0	0.0518	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.7	7
212	17.67	July	771	-1.91	600	706	0.0488	0.0042	0	0	0.052	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.7	7
213	17.75	August	771	-1.91	600	706	0.049	0.0042	0	0	0.0522	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.7	7
214	17.83	September	771	4.91	600	704	0.05	0.0033	0	0	0.0535	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.7	7
215	17.92	October	771	4.91	600	706	0.0501	0.0033	0	0	0.0534	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.7	7
216	18	November	771	4.91	600	706	0.0502	0.0033	0	0	0.0535	0.0002	0.0001	0	0.0004	0.7	7
217	18.08	December	771	4.91	600	706	0.0503	0.0033	0	0	0.0536	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.7	7
218	18.17	January	771	4.91	600	706	0.0504	0.0033	0	0	0.0537	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.7	7
219	18.25	February	771	4.91	600	706	0.0507	0.0033	0	0	0.054	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.7	7
220	18.33	March	771	4.91	600	706	0.051	0.0033	0	0	0.0543	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.7	7
221	18.12	April	771	-1.91	600	706	0.0511	0.0041	0	0	0.0547	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.8	7.1
222	18.5	May	771	-1.91	600	706	0.052	0.0044	0	0	0.0544	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.8	7.1
223	18.58	June	772	-1.91	600	706	0.0522	0.0044	0	0	0.0536	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.8	7.1
224	18.67	July	772	-1.91	600	706	0.0524	0.0044	0	0	0.0539	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.8	7.1
225	18.75	August	772	-1.91	600	706	0.0526	0.0044	0	0	0.0531	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.8	7.1
226	18.83	September	772	-1.91	600	704	0.0537	0.0035	0	0	0.0572	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.8	7.1
227	18.92	October	772	4.92	600	706	0.0538	0.0035	0	0	0.0573	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.8	7.1
228	19	November	772	4.92	600	706	0.0538	0.0035	0	0	0.0574	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.8	7.1
229	19.08	December	772	4.92	600	706	0.0539	0.0035	0	0	0.0575	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.8	7.1
230	19.17	January	772	4.92	600	706	0.0541	0.0035	0	0	0.0576	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.8	7.1
231	19.25	February	772	4.92	600	706	0.0543	0.0035	0	0	0.0579	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.8	7.1
232	19.33	March	772	4.92	600	706	0.0547	0.0036	0	0	0.0582	0.0002	0.0001	0.0001	0.0004	0.8	7.1
233	19.42	April	772	4.92	600	706	0.0551	0.0036	0	0	0.0587	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	0.8	7.1
234	19.5	May	772	-1.92	600	706	0.0557	0.0046	0	0	0.0593	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	0.9	7.3
235	19.58	June	772	-1.92	600	706	0.0556	0.0047	0	0	0.0596	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	0.9	7.3
236	19.67	July	772	-1.92	600	706	0.0562	0.0047	0	0	0.0598	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	0.9	7.3
237	19.75	August	772	-1.92	600	706	0.0564	0.0048	0	0	0.0601	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	0.9	7.3
238	19.83	September	772	-1.92	600	704	0.0574	0.0048	0	0	0.0612	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	0.9	7.3
239	19.92	October	773	-1.92	600	706	0.0576	0.0048	0	0	0.0613	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	0.9	7.3
240	20	November	773	4.92	600	706	0.0576	0.0048	0	0	0.0614	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	0.9	7.3
241	20.08	December	773	4.92	600	706	0.0577	0.0048	0	0	0.0615	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	0.9	7.3
242	20.17	January	773	4.92	600	706	0.0579	0.0038	0	0	0.0616	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	0.9	7.3
243	20.25	February	773	4.92	600	706	0.0582	0.0038	0	0	0.062	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	0.9	7.3
244	20.33	March	773	4.92	600	706	0.0585	0.0038	0	0	0.0623	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	0.9	7.3
245	20.42	April	773	4.92	600	706	0.0589	0.0038	0	0	0.0628	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	0.9	7.3
246	20.5	May	773	4.92	600	706	0.0596	0.0039	0	0	0.0635	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	1	7.4
247	20.58	June	773	-1.92	600	706	0.0598	0.0049	0	0	0.0637	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	1	7.4
248	20.67	July	773	-1.92	600	706	0.0601	0.0049	0	0	0.064	0.0002	0.0001	0.0001	0.0005	1	7.4

249	20.75	August	773	4.92	600	706	0.0603	0.0029	0	0	0.0642	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1	7.4
250	20.83	September	773	-1.92	600	704	0.0611	0.0001	0	0	0.0653	0.0002	0.0002	0.0001	0.0005	1	7.1
251	20.92	October	773	-1.93	600	706	0.0615	0.004	0	0	0.0656	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1	7.4
252	21	November	773	-1.93	600	706	0.0616	0.004	0	0	0.0657	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1	7.4
253	21.08	December	773	-1.93	600	706	0.0617	0.004	0	0	0.0659	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1	7.4
254	21.17	January	773	-1.93	600	706	0.0618	0.004	0	0	0.0662	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1	7.4
255	21.25	February	774	-1.93	600	706	0.0621	0.0041	0	0	0.0666	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1	7.4
256	21.33	March	774	4.93	600	706	0.0625	0.0041	0	0	0.0667	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.1	7.6
257	21.42	April	774	4.93	600	706	0.0629	0.0041	0	0	0.0678	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.1	7.6
258	21.5	May	774	4.93	600	706	0.0636	0.0042	0	0	0.0681	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.1	7.6
259	21.58	June	774	4.93	600	706	0.0639	0.0042	0	0	0.0683	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.1	7.6
260	21.67	July	774	4.93	600	706	0.0641	0.0042	0	0	0.0685	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.1	7.6
261	21.75	August	774	4.93	600	706	0.0643	0.0042	0	0	0.0698	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.1	7.6
262	21.83	September	774	4.93	600	704	0.0655	0.0043	0	0	0.0699	0.0002	0.0002	0.0001	0.0005	1.1	7.6
263	21.92	October	774	-1.93	600	706	0.0656	0.0043	0	0	0.0707	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.1	7.6
264	22	November	774	-1.93	600	706	0.0657	0.0043	0	0	0.0703	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.1	7.6
265	22.08	December	774	-1.93	600	706	0.0658	0.0043	0	0	0.0706	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.2	7.7
266	22.17	January	774	-1.93	600	706	0.066	0.0043	0	0	0.0715	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.2	7.7
267	22.25	February	774	-1.93	600	706	0.0663	0.0043	0	0	0.0722	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.2	7.7
268	22.33	March	774	-1.93	600	706	0.0667	0.0044	0	0	0.0725	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.2	7.7
269	22.42	April	774	4.93	600	706	0.0671	0.0044	0	0	0.0728	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.2	7.7
270	22.5	May	774	4.93	600	706	0.0678	0.0044	0	0	0.0731	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.2	7.7
271	22.58	June	775	4.93	600	706	0.0681	0.0045	0	0	0.0743	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.3	7.9
272	22.67	July	775	4.93	600	706	0.0683	0.0045	0	0	0.0745	0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	1.3	7.9
273	22.75	August	775	4.93	600	706	0.0686	0.0045	0	0	0.0746	0.0002	0.0002	0.0001	0.0006	1.3	7.9
274	22.83	September	775	4.93	600	704	0.0698	0.0046	0	0	0.0747	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.3	7.9
275	22.92	October	775	4.93	600	706	0.0699	0.0046	0	0	0.0748	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.3	7.9
276	23	November	775	-1.93	600	706	0.07	0.0046	0	0	0.0752	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.3	7.9
277	23.08	December	775	-1.93	600	706	0.0701	0.0046	0	0	0.0756	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.3	7.9
278	23.17	January	775	-1.94	600	706	0.0702	0.0046	0	0	0.0761	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.3	7.9
279	23.25	February	775	-1.94	600	706	0.0706	0.0046	0	0	0.0769	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.3	7.9
280	23.33	March	775	-1.94	600	706	0.071	0.0046	0	0	0.0772	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.3	7.9
281	23.42	April	775	-1.94	600	706	0.0714	0.0047	0	0	0.0775	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.3	7.9
282	23.5	May	775	4.94	600	706	0.0722	0.0047	0	0	0.0777	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.4	8
283	23.58	June	775	4.94	600	706	0.0725	0.0047	0	0	0.0791	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.4	8
284	23.67	July	775	4.94	600	706	0.0727	0.0048	0	0	0.0792	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.4	8
285	23.75	August	775	4.94	600	706	0.073	0.0048	0	0	0.0793	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.4	8
286	23.83	September	775	4.94	600	704	0.0742	0.0049	0	0	0.0794	0.0002	0.0002	0.0001	0.0006	1.4	8
287	23.92	October	775	4.94	600	706	0.0743	0.0049	0	0	0.0796	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.4	8
288	24	November	776	4.94	600	706	0.0744	0.0049	0	0	0.0796	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.4	8
289	21.08	December	776	-1.94	600	706	0.0746	0.0049	0	0	0.0796	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.4	8
290	21.17	January	776	-1.94	600	706	0.0747	0.0049	0	0	0.0796	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.4	8

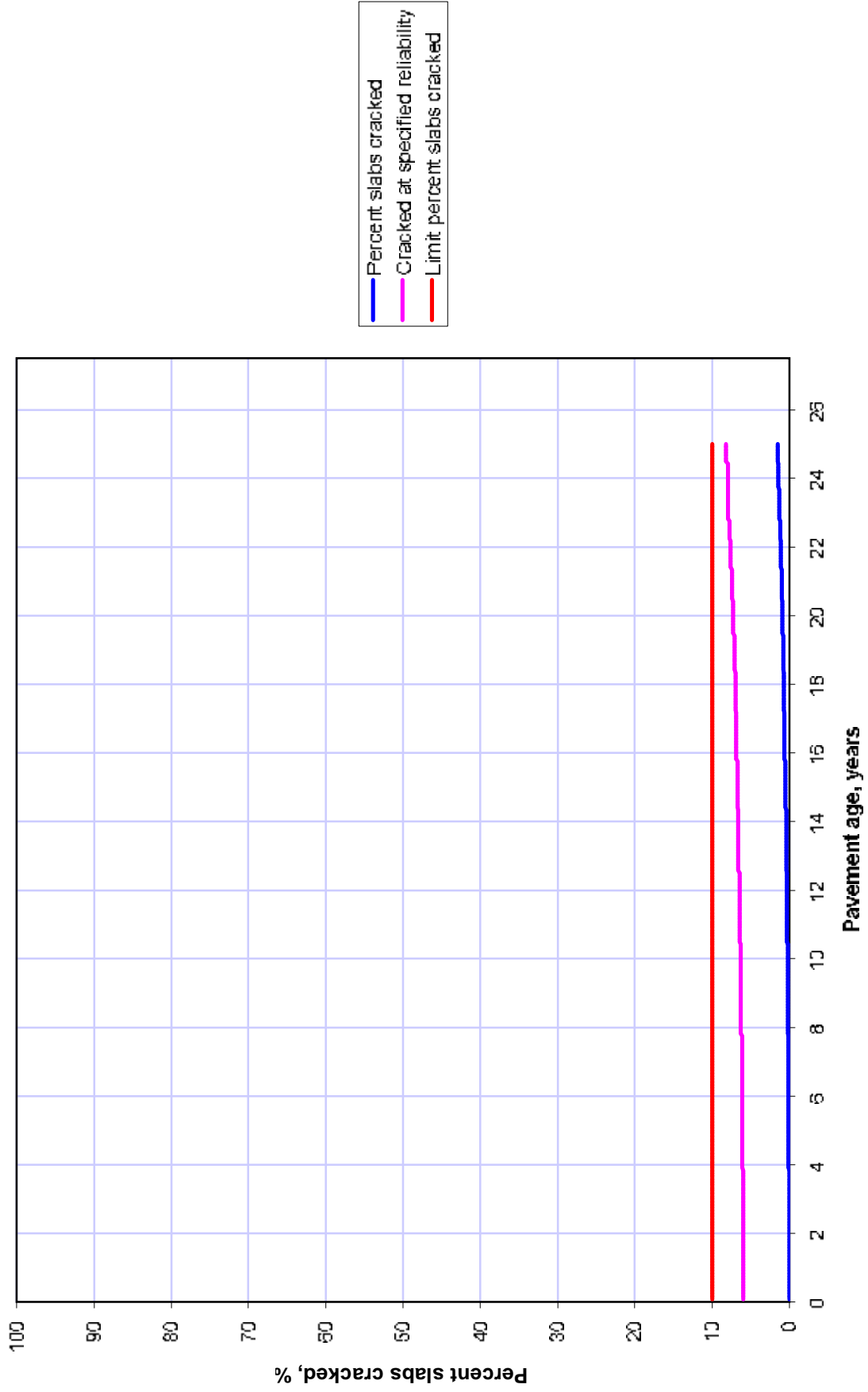


291	24.25	February	776	4.94	600	706	0.0751	0.0049	0	0	0.08	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.4	8
292	24.34	March	776	-1.94	600	706	0.0755	0.0049	0	0	0.0801	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.4	8
293	24.12	April	776	-1.94	600	706	0.0759	0.005	0	0	0.0809	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.4	8
294	24.5	May	776	-1.94	600	706	0.0767	0.005	0	0	0.0817	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.5	8.2
295	24.58	June	776	-1.94	600	706	0.077	0.005	0	0	0.0821	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.5	8.2
296	24.67	July	776	-1.94	600	706	0.0773	0.0051	0	0	0.0823	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.5	8.2
297	24.75	August	776	-1.94	600	706	0.0775	0.0051	0	0	0.0826	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.5	8.2
298	24.83	September	776	-1.94	600	704	0.0788	0.0052	0	0	0.084	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.5	8.2
299	24.92	October	776	-1.94	600	706	0.079	0.0052	0	0	0.0842	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.5	8.2
300	25	November	776	-1.94	600	706	0.0791	0.0052	0	0	0.0843	0.0003	0.0002	0.0001	0.0006	1.5	8.2
											<b>0.0843</b>						
											<b>0.0006</b>						

### Cumulative damage



# Predicted Cracking



# Predicted RI

