

APLICACIÓN DE LA GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES AASHTO 2002 A  
LAS CONDICIONES COLOMBIANAS

MANUEL JOSÉ MEZA SOTO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
INSTITUTO DE POSGRADOS EN INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA, ÁREA VÍAS TERRESTRES  
POPAYÁN  
2008

APLICACIÓN DE LA GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES AASHTO 2002 A  
LAS CONDICIONES COLOMBIANAS

MANUEL JOSÉ MEZA SOTO

Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería, Área Vías Terrestres.

Director: Ing. Msc Carlos Alberto Benavides Bastidas

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
INSTITUTO DE POSGRADOS EN INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ÁREA VÍAS TERRESTRES  
POPAYÁN  
2008

## PÁGINA DE ACEPTACIÓN

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

Carlos Alberto Benavides Bastidas  
Director de tesis

---

Julian Vidal Valencia  
Jurado

---

Hugo Cosme Vargas  
Jurado

Popayán, Febrero de 2008

## DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido trabajar continuamente y brindarme la oportunidad de disfrutar el desarrollo de este trabajo.

A mis madres Gloria y Rosa Isabel quienes con su apoyo y confianza me motivaron a alcanzar un peldaño más en mi formación profesional.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Cauca por apoyarme con las instalaciones y equipamientos necesarios en esta investigación.

Al Ingeniero Carlos Alberto Benavides Bastidas, Director de tesis de grado, quien me brindó todo su apoyo y asesoría de manera incondicional.

Al Ingeniero Luís Jorge Gonzáles, profesor de hidrológia de la Universidad del Cauca, por su colaboración en la adquisición de los datos climáticos en la estación meteorológica del aeropuerto Guillermo León Valencia de la Ciudad de Popayán.

Al Ingeniero Luís Gabriel Ortega, por su apoyo, confianza y amistad sincera en el desarrollo de mi trabajo.

A todos mis compañeros de estudios, quienes me brindaron apoyo y confianza a lo largo del proceso de formación y con los que compartí momentos en mi vida que serán inolvidables.

## CONTENIDO

	Pág
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	23
1.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	23
1.1.1 Objetivo general.....	23
1.1.2 Objetivos específicos .....	23
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	23
1.3 ALCANCE DEL TRABAJO .....	24
2. MARCO TEÓRICO DEL MÉTODO AASHTO 2002 .....	25
2.1 INTRODUCCIÓN .....	25
2.1.1 Objetivo de la guía.....	25
2.1.2 Filosofía de la guía de diseño .....	25
2.1.3 Beneficios del diseño mecánico - empírico .....	25
2.1.4 Procedimiento general de la guía AASHTO 2002 .....	26
2.1.5 Niveles de jerarquía de los datos de entrada.....	27
2.2 SUBRASANTE .....	28
2.2.1 Caracterización de la subrasante.....	28
2.2.2 Exploración subterránea .....	29
2.2.2.1 Localización y profundidad del sondeo .....	32
2.2.2.2 Espaciamientos de los sondeos.....	32
2.2.2.3 Profundidad de los sondeos.....	32
2.2.2.4 Tipo de muestras .....	32
2.2.3 Ensayos de laboratorio .....	32
2.2.3.1 Número de muestras a ensayar .....	33
2.2.3.2 Tipos de ensayos.....	33
2.2.4 Mejoramiento de la subrasante .....	36
2.3 MATERIALES.....	38
2.3.1 Introducción.....	38
2.3.1.1 Factores considerados .....	38
2.3.1.2 Materiales considerados.....	39
2.3.1.3 Jerarquía del diseño .....	39
2.3.2 Materiales asfálticos .....	40
2.3.2.1 Módulo dinámico.....	40

2.3.2.2	Relación de Poisson .....	46
2.3.2.3	Resistencia a tracción .....	48
2.3.2.4	Creep .....	49
2.3.2.5	Coefficiente de expansión térmico .....	50
2.3.2.6	Absorción de onda corta .....	51
2.3.2.7	Conductividad térmica .....	51
2.3.2.8	Capacidad de calor .....	52
2.3.3	Materiales estabilizados químicamente.....	52
2.3.3.1	Módulo resiliente .....	53
2.3.3.2	Mínimo módulo en materiales estabilizados para mezclas en caliente. ....	55
2.3.3.3	Resistencia a tracción (para mezcla en caliente) .....	55
2.3.3.4	Relación de Poisson .....	56
2.3.3.5	Conductividad térmica .....	56
2.3.3.6	Capacidad de calor .....	57
2.3.4	Materiales no conglomerados.....	57
2.3.4.1	Módulo resiliente .....	58
2.3.4.2	Relación de Poisson .....	60
2.3.4.3	Índice de plasticidad.....	61
2.3.4.4	Gravedad específica .....	61
2.3.4.5	Conductividad eléctrica saturada.....	61
2.3.4.6	Grado de saturación .....	61
2.3.4.7	Coefficiente de presión lateral.....	61
2.3.5	Lecho rocoso .....	62
2.3.5.1	Módulo de elasticidad .....	62
2.3.5.2	Relación de poisson .....	63
2.4	CLIMA .....	64
2.4.1	Introducción.....	64
2.4.1.1	Importancia de la variable clima en el diseño. ....	64
2.4.1.2	Efectos climáticos en el diseño. ....	64
2.4.1.3	Resultados del EICM.....	66
2.4.2	Parámetros de entrada para el modelo clima. ....	66
2.4.2.1	Información general.....	66
2.4.2.2	Información climática .....	67
2.4.2.3	Nivel freático .....	68
2.4.2.4	Drenaje .....	68
2.4.2.5	Propiedades de la estructura del pavimento .....	69
2.4.3	Cálculo EICM - factor clima para ajustar al módulo resiliente- .....	75
2.4.3.1	Factor de ajuste climático $F_{env}$ .....	75
2.4.3.2	Efectos climáticos en el $M_R$ .....	76
2.4.3.3	Calculo del factor de ajuste climático $F_{env}$ .....	78
2.4.4	Cálculo EICM - temperaturas en la estructura del pavimento-.....	85
2.4.4.1	Introducción.....	85

2.4.4.2 Modelo CMS.....	87
2.4.4.3 Perfil de distribución de temperatura .....	91
2.5 TRÁNSITO .....	95
2.5.1 Introducción.....	95
2.5.2 Jerarquías usadas en la caracterización del tránsito.....	95
2.5.3 Descripción de la base de datos y elementos usados en la caracterización del tránsito .....	97
2.5.3.1 Peso en movimiento (WIM).....	97
2.5.3.2 Clasificación de vehículos (AVC) .....	97
2.5.3.3 Conteo de vehículos.....	97
2.5.3.4 Modelos de tránsito pronóstico y atraído.....	98
2.5.4 Suposiciones.....	98
2.5.5 Entradas requeridas para la caracterización del tránsito.....	98
2.5.5.1 Volumen de tránsito - año base: .....	99
2.5.5.2 Ajustes del volumen de tránsito: .....	101
2.5.5.3 Factor de distribución de carga: .....	107
2.5.5.4 Información general:.....	110
2.5.6 Proceso de introducción de datos .....	113
2.5.6.1 Determinar el incremento de tiempo: .....	114
2.5.6.2 Determinación del tráfico promedio anual de camiones, en los dos sentidos (AADT), para el año base: .....	114
2.5.6.3 Determinar la distribución de camiones para el año base: .....	114
2.5.6.4 Determinar el número de ejes, de cada tipo de eje y clase de camión: .	114
2.5.6.5 Determinar el espectro de carga de cada eje, de cada tipo de eje y clase de camión: .....	114
2.5.6.6 Definir la función de crecimiento del tránsito y revise el incremento anual durante el periodo de diseño: .....	114
2.5.6.7 Predecir el tránsito total futuro: .....	115
2.5.6.8 Determinar detalles de ejes y llantas: .....	115
2.5.7 Plan de muestreo de peso y clasificación .....	115
2.6 DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES .....	118
2.6.1 Introducción.....	118
2.6.2 Esquema del procedimiento de diseño de pavimentos flexibles.....	119
2.6.2.1 Entradas de diseño .....	120
2.6.2.2 Modelos de respuesta del pavimento.....	123
2.6.2.3 Acumulación de daños y esfuerzos .....	124
2.6.2.4 Predicción de la rugosidad (IRI) .....	127
2.6.2.5 Evaluación del comportamiento y modificaciones del diseño.....	127
2.6.2.6 Confiabilidad del diseño.....	128
2.6.2.7 Estimación de costo del ciclo de vida.....	128
2.6.3 Entradas de diseño para pavimentos flexibles nuevos .....	128
2.6.3.1 Información general.....	129



2.6.3.2	Identificación del sitio/proyecto .....	130
2.6.3.3	Parámetros de análisis.....	130
2.6.3.4	Tránsito .....	132
2.6.3.5	Clima .....	136
2.6.3.6	Estructura del pavimento .....	138
2.6.4	Procedimiento de diseño de pavimentos flexibles nuevos.....	145
2.6.4.1	Parámetros de la estructura de prueba.....	146
2.6.4.2	Modelos de respuesta del pavimento.....	147
2.6.4.3	Predicción del comportamiento.....	150
2.6.5	Consideraciones especiales de carga.....	182
2.6.6	Calibración a condiciones locales.....	183
3.	SOFTWARE AASHTO 2002 PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO .....	189
3.1	INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE AASHTO 2002 .....	189
3.2	INSTALACIÓN DEL SOFTWARE .....	190
3.3	DESINTALACIÓN DEL SOFTWARE .....	191
3.4	INICIO DEL SOFTWARE.....	191
4.	GUÍA DE ALIMENTACIÓN DEL SOFTWARE AASHTO 2002 .....	195
4.1	CREAR UN PROYECTO .....	195
4.2	INFORMACIÓN GENERAL.....	196
4.3	TRÁNSITO .....	201
4.4	CLIMA .....	210
4.5	ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO .....	213
5.	COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS TRADICIONALES Y AASHTO 2002 .....	232
5.1	DISEÑO DE PAVIMENTO MÉTODO AASHTO 1993. ....	232
5.1.1	Generalidades de la vía .....	232
5.1.2	Análisis del tránsito .....	232
5.1.3	Características geotécnicas.....	234
5.1.4	Diseño de la estructura de pavimento .....	234
5.2	DISEÑO DE PAVIMENTO MÉTODO INVIAS. ....	240
5.2.1	Region climática.....	240
5.2.2	Categorías del tránsito .....	240
5.2.3	Categorías de la subrasante .....	241
5.2.4	Diseño de la estructura de pavimento .....	241

5.3 DISEÑO DE PAVIMENTO METODO RACIONAL.....	242
5.3.1 Información inicial .....	242
5.3.2 Caracterización dinámica de los materiales .....	242
5.3.3 Relaciones de Poisson .....	246
5.3.4 Modelos elásticos.....	247
5.3.5 Definición de los modelos de falla de los materiales.....	247
5.3.6 Cálculo de esfuerzos y deformaciones .....	250
5.3.7 Comparaciones de solicitaciones calculadas con las admisibles.....	251
5.4 DISEÑO DE PAVIMENTO MÉTODO AASHTO 2002. ....	252
5.4.1 Ejemplo de diseño AASHTO 2002, alternativa 1 AASHTO 1993.....	252
5.4.1.1 Información general.....	252
5.4.1.2 parámetros de análisis.....	252
5.4.1.3 criterios de desempeño.....	252
5.4.1.4 Tránsito .....	253
5.4.1.5 Clima .....	254
5.4.1.6 Materiales.....	254
5.4.1.7 Reportes .....	258
5.4.1.8 Resumen alternativa 1, método AASHTO 1993 .....	261
5.4.2 Resumen alternativa 2, método AASHTO 1993 .....	262
5.4.3 Resumen alternativa 3, método AASHTO 1993 .....	262
5.4.4 Resumen alternativa 4, método INVIAS.....	262
5.4.5 Resumen alternativa 5, método INVIAS.....	263
5.4.6 Resumen alternativa 6, método INVIAS.....	263
5.4.7 Comparación de los métodos.....	263
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	266
BIBLIOGRAFÍA.....	270

## LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 2.2.1 Resumen y Características de Materiales para Pavimento .....	31
Tabla 2.2.2 Ensayos mínimos de laboratorio requeridos para el diseño del pavimento.....	33
Tabla 2.3.1 Propiedades de los Materiales Asfálticos.....	40
Tabla 2.3.2 Estimación del Módulo Dinámico .....	40
Tabla 2.3.3 Temperaturas y Frecuencias Recomendadas para la Determinación de E de la Mezcla .....	41
Tabla 2.3.4 Temperatura Recomendada para Determinar el Módulo Complejo y el Ángulo de Fase del Ligante .....	41
Tabla 2.3.5 Características de la Ecuación de Dr. M. W. Witczak, el Dr. W. Mirza y el Dr. Fonseca .....	43
Tabla 2.3.6 Valores Recomendados de A y VTS de acuerdo al Grado PG del Asfalto .....	45
Tabla 2.3.7 Valores recomendados para A y VTS de acuerdo a la viscosidad del asfalto (100*poises).....	46
Tabla 2.3.8 Valores recomendados para A y VTS de acuerdo a la penetración del Asfalto (10/mm) .....	46
Tabla 2.3.9 Estimación de la Relación de Poisson de Materiales Asfálticos ....	46
Tabla 2.3.10. Rango Típico de la Relación de Poisson de Mezclas Densas.....	47
Tabla 2.3.11. Valor Típico De La Relación De Poisson De Mezclas Densas .....	47

Tabla 2.3.12. Rango Típico de la Relación de Poisson de Materiales Tratados con Asfalto .....	47
Tabla 2.3.13. Valor Típico de la Relación de Poisson dDe Materiales Tratados con Asfalto .....	48
Tabla 2.3.14. Rango Típico de la Relación de Poisson de Mezclas en Frío .....	48
Tabla 2.3.15. Valor Típico de la Relación de Poisson de Mezclas en Frío.....	48
Tabla 2.3.16. Estimación de la Resistencia a Tracción de Materiales Asfálticos	48
Tabla 2.3.17. Estimación del Creep de Materiales Asfálticos.....	49
Tabla 2.3.18. Requerimientos para el Ensayo de Creep en Mezclas Calientes.	49
Tabla 2.3.19. Estimación del Coeficiente de Expansión Térmico de Materiales Asfálticos .....	50
Tabla 2.3.20. Estimación de la Absorción de Onda Corta de Materiales Asfálticos	51
Tabla 2.3.21. Rango de Absorción de Onda Corta de Materiales Asfálticos .....	51
Tabla 2.3.22. Estimación de la Conductividad Térmica de Materiales Asfálticos	51
Tabla 2.3.23. Estimación de la Capacidad de Calor de Materiales Asfálticos...	52
Tabla 2.3.24. Propiedades de Materiales Estabilizados Químicamente.....	52
Tabla 2.3.25 Resistencia Mínima para Materiales Estabilizados Dependiendo del Tipo De Pavimento .....	53
Tabla 2.3.26. Estimación del Módulo Resiliente o Elástico de Materiales Estabilizados Químicamente .....	53
Tabla 2.3.27. Módulo Elástico o Resiliente de Materiales Estabilizados Químicamente con Pruebas de Laboratorio .....	54

Tabla 2.3.28 Módulo Resiliente de Materiales Estabilizados Químicamente por Correlaciones .....	54
Tabla 2.3.29 Módulo Elástico o Resiliente por Defecto de Materiales Estabilizados Químicamente .....	54
Tabla 2.3.30 Módulo Mínimo para Materiales Estabilizados Químicamente en Pavimentos con Mezcla en Caliente .....	55
Tabla 2.3.31 Estimación de la Resistencia a Tracción de Materiales Estabilizados Químicamente .....	55
Tabla 2.3.32. Ensayos de Laboratorio de la Resistencia a Tracción de Materiales Estabilizados Químicamente .....	55
Tabla 2.3.33 Valores por Correlaciones de la Resistencia a Tracción de Materiales Estabilizados Químicamente.....	56
Tabla 2.3.34 Valores por Defecto de la Resistencia a Tracción de Materiales Estabilizados Químicamente .....	56
Tabla 2.3.35 Relación de Poisson de Materiales Estabilizados Químicamente..	56
Tabla 2.3.36 Estimación de la Conductividad Térmica de Materiales Estabilizados Químicamente .....	57
Tabla 2.3.37 Estimación de la Capacidad de Calor de Materiales Estabilizados Químicamente.....	57
Tabla 2.3.38 Propiedades de Materiales no Conglomerado .....	58
Tabla 2.3.39 Estimación del Módulo Resiliente de Materiales no Conglomerados	58
Tabla 2.3.40 Módulo Resiliente de Materiales no Conglomerados por Correlaciones .....	59
Tabla 2.3.41 Valores de Módulo Resiliente para Materiales no Conglomerados	59

Tabla 2.3.42 Estimación de la Relación de Poisson de Materiales no Conglomerados .....	60
Tabla 2.3.43 Valores de Relación de Poisson de Materiales no Conglomerados	60
Tabla 2.3.44 Valores de Coeficiente de Presión Lateral de Materiales no Conglomerados .....	62
Tabla 2.3.45. Propiedades del lecho rocoso .....	62
Tabla 2.3.46 Modulo de Elasticidad de Lecho Rcoso .....	62
Tabla 2.3.47 Relación de Poisson de Lecho Rcoso .....	63
Tabla 2.4.1 Parámetros de entrada del concreto asfáltico para EICM .....	69
Tabla 2.4.2 Parámetros de entrada del concreto asfáltico para EICM .....	70
Tabla 2.4.2 Parámetros de entrada del concreto asfáltico para EICM .....	71
Tabla 2.4.3 Parámetros de Entrada para Materiales Compactados para EICM..	72
- Conductividad Hidráulica Saturada $K_{sat}$ - .....	72
Tabla 2.4.4 Parámetros de entrada para materiales compactados para EICM..	72
- conductividad térmica seca K y capacidad de calor Q - .....	72
Tabla 2.4.5 Opciones para estimar los parámetros de SWCC.....	73
Tabla 2.4.6 Entradas para materiales de subrasante para EICM .....	75
Tabla 2.4.7 valores de a, b y Km para materiales gruesos y finos. ....	76
Tabla 2.4.8 Resumen de cálculos realizados por el EICM para determinar el factor de ajuste para materiales en congelamiento, FF. ....	79
Tabla 2.4.9 Resumen de Cálculos Realizados por el EICM para Determinar el Factor de Ajuste para Materiales en Recuperación, FR. ....	80

Tabla 2.4.10 Resumen de cálculos realizados por el EICM para determinar el factor de ajuste para materiales en descongelamiento o total recuperación, FU.  
81

Tabla 2.4.11 Distribución de temperatura..... 92

Tabla 2.5.1 Datos de tránsito requeridos para cada nivel de entrada de datos 96

Tabla 2.5.2 Estimación de la información de peso de ejes ..... 97

Tabla 2.5.3 Estimación de la información de clasificación de vehículos ..... 97

Tabla 2.5.4 Estimación de la Información de Conteo de Vehículos..... 98

Tabla 2.5.5 Determinación del tránsito promedio anual de camiones..... 99

Tabla 2.5.6 Estimación del porcentaje de camiones en la dirección de diseño  
100

Tabla 2.5.7 Estimación del porcentaje de camiones en el carril de diseño ... 101

Tabla 2.5.8 Estimación del factor de ajuste mensual ..... 102

Tabla 2.5.9 Estimación de la distribución de clase de vehículo ..... 102

Tabla 2.5.10 Valores por defecto para la clasificación de tránsito de camiones  
103

Tabla 2.5.11 Definición de los grupos de clasificación de tránsito de camiones  
104

Tabla 2.5.12 Guía sugerida para la selección de los grupos de TTC, para diferentes clases de vías ..... 105

Tabla 2.5.13 Determinación del factor de distribución horario ..... 105

Tabla 2.5.14 Valores por defecto del factor de distribución horario (HDF) .... 106

Tabla 2.5.15 Funciones de crecimiento manejadas por el software de diseño 106

Tabla 2.5.16 Estimación del factor de distribución de carga.....	107
Tabla 2.5.17 Valores por defecto de los factores de distribución de carga en ejes simples.....	108
Tabla 2.5.18 Valores por defecto de los factores de distribución de carga en ejes tandem .....	109
Tabla 2.5.19 Estimación de la localización promedio de la llanta.....	110
Tabla 2.5.20 Estimación de la desviación de las llantas que se salen del promedio .....	110
Tabla 2.5.21 Estimación del número de ejes por camión .....	111
Tabla 2.5.22 valores de espaciamiento entre el primer eje y los demás ejes.	112
Tabla 2.5.23 Anchos de llantas y espaciamiento mínimo en sistemas duales..	112
Tabla 2.5.24 Presión de inflado y carga máxima en sistemas duales .....	113
Tabla 2.5.25 tamaño mínimo de la muestra (días por año) para determinar la distribución de carga por eje - datos de peso .....	116
Tabla 2.5.26 tamaño mínimo de la muestra (días por año) para determinar la distribución de carga por eje - datos de clasificación .....	116
Tabla 2.5.27 tamaño mínimo de la muestra (días por año) para determinar la distribución de carga por eje - datos de conteos.....	116
Tabla 2.6.1 Recomendación para la selección de la velocidad de operación	133
Tabla No 4.1 Recomendaciones de confiabilidad del diseño .....	201
Tabla No 4.2. Resumen de ensayos para construir la curva maestra en el nivel 1.	216
Tabla 4.3 Valores típicos de modulo resiliente para materiales granulares y finos.....	224



Tabla 4.4 Valores típicos de resistencia a la tensión y creep (nivel 3). .....	228
Tabla 5.1 Factores Daño Universidad del Cauca.....	233
Tabla 5.2 Ejes equivalentes anuales.....	233
Tabla 5.3 Niveles sugeridos de confiabilidad.....	235
Tabla 5.4 Desviación normal estándar .....	236
Tabla 5.5 Nivel final de servicio.....	237
Tabla 5.6 Coeficiente ai para diferentes tipos de materiales.....	237
Tabla 5.7 Coeficiente mi para los materiales granulares .....	238
Tabla 5.8 Cuadro resumen metodo AASHTO 1993 .....	239
Tabla 5.9 Alternativas de diseno metodo AASHTO 1993.....	239
Tabla 5.10 Regiones climaticas según la temperatura y precipitacion .....	240
Tabla 5.11 Categorías del tránsito .....	240
Tabla 5.12 Categorías del transito .....	241
Tabla 5.13 Alternativas de diseño metodo INVIAS.....	241
Tabla 5.14 Módulo Dinámico de la Carpeta Asfáltica .....	243
Tabla 5.15 Modulo dinamico de la base asfaltica.....	244
Tabla 5.16 Modulo de elasticidad de las capas granulares.....	246
Tabla 5.17 Coeficientes de Poisson .....	246
Tabla 5.18 Modelos Elásticos .....	247
Tabla 5.19 Cuadro resumen diseño racional .....	251

Tabla 5.20 Revisión de las estructuras de diseño metodología tradicional con la AASHTO 2002 ..... 263

Tabla 5.21 Alternativas definitivas de diseño AASHTO 2002..... 264

Tabla 5.22 Cuadro resumen alternativas de diseño definitivas AASHTO 2002 . 264

## LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 2.4.1 Variación del grado de saturación con el tiempo. ....	78
Figura 2.4.2 Variación de del grado de saturación con el tiempo .....	78
Figura 2.4.3 Diagrama profundidad/tiempo y matriz de coeficientes ajustados 82	
Figura 2.4.4. Matriz de coeficientes ajustados .....	82
Figura 2.4.5 Cálculo de ejemplo de Fenv .....	83
Figura 2.4.6 Transferencia de calor entre la superficie del pavimento y el aire en un día soleado. ....	88
Figura 2.4.7. Distribución de temperatura para un periodo de análisis dado. .	91
Figura 2.6.1. Esquema del proceso de diseño mecánico - empírico de pavimentos flexibles .....	120
Figura 2.6.2 Tipos de pavimentos flexibles .....	121
Figura 2.6.3 Fisuras abajo - arriba .....	125
Figura 2.6.4. Fisuras arriba - abajo .....	125
Figura 2.6.5. Ahuellamiento por densificación .....	126
Figura 2.6.6. Ahuellamiento por flujo lateral de materiales .....	126
Figura 2.6.7. Distribución de esfuerzos bajo la llanta .....	133
Figura 2.6.8. Puntos de análisis (plano X - Y) .....	150
Figura 2.6.9. Etapas de la deformación permanente .....	152

Figura 2.6.10 Variación del daño piel de cocodrilo y el módulo de la subrasante en el espesor de la carpeta asfáltica. ....	166
Figura 2.6.11 Variación del daño fisura longitudinal y el módulo de la subrasante en el espesor de la carpeta asfáltica. ....	167
Figura 3.1 procedimiento del software de diseño aashto 2002. ....	189
Figura 3.2 software guia de diseño aashto 2002. ....	191
Figura 3.3 Entradas generales del software ....	192
Figura 3.4 Colores de ayuda ....	193
Figura 4.1 Crear un nuevo archivo desde el programa principal.....	195
Figura 4.2 Presentación del programa principal.....	196
Figura 4.3 Información general.....	197
Figura 4.4 Información del sitio del proyecto.....	198
Figura 4.5 Parámetros de análisis.....	199
Figura 4.6 Entradas del tránsito.....	201
Figura 4.7 Factores de ajustes mensual.....	203
Figura 4.8 Clasificación de los vehículos según el FHWA.....	204
Figura 4.9 Distribución de vehículos pesados ....	204
Figura 4.10 Distribución horaria de los vehículos pesados.....	205
Figura 4.11 Factores de ajuste de volumen del tránsito.....	206
Figura 4.12 Factores de distribución de carga por eje.....	207

Figura 4.13 Localización en sentido transversal del vehiculo en el sentido de avance .....	207
Figura 4.14a Entradas generales del tránsito .....	208
Figura 4.14b Entradas generales del tránsito .....	209
Figura 4.14c Entradas generales del tránsito .....	210
Figura 4.15 Entradas climáticas .....	213
Figura 4.16a Entradas de la estructura del pavimento .....	214
Figura 4.16b Entradas de la estructura del pavimento .....	214
Figura 4.17 Drenaje y propiedades de superficie.....	215
Figura 4.18a Propiedades de la mezcla asfáltica.....	217
Figura 4.18b Propiedades de la mezcla asfáltica.....	217
Figura 4.19a Propiedades de la mezcla asfáltica.....	219
Figura 4.19b Propiedades de la mezcla asfáltica.....	221
Figura 4.20a Propiedades de la capas granulares .....	222
Figura 4.20b Propiedades de la capas granulares .....	223
Figura 4.21 Propiedades de la capas granulares.....	225
Figura 4.22 Propiedades de la capas granulares.....	225
Figura 4.23 Propiedades de la capas de subrasante .....	226
Figura 4.24 Agrietamiento térmico .....	229
Figura 4.24 Potencial de daños.....	230

# **CAPITULO 1**

## **GENERALIDADES DEL PROYECTO**

## 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

### 1.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO

#### 1.1.1 Objetivo general

- Aplicar la metodología de diseño de pavimentos flexibles AASHTO 2002 a las condiciones Colombianas.

#### 1.1.2 Objetivos específicos

- Describir los aspectos más importantes de la nueva guía de diseño de pavimentos flexibles AASHTO 2002.
- Determinar para las condiciones de nuestro país, los parámetros de cada variable del método AASHTO 2002 y su aplicación en el diseño de los pavimentos flexibles.
- Elaborar una guía de alimentación del software de diseño ME-PDG, mediante ejemplos de aplicación para pavimentos flexibles.
- Elaborar un diseño de pavimento flexible bajo la metodología AASHTO 2002, aplicando los métodos de evaluación y determinación de las variables de entrada según las condiciones colombianas.
- Comparar los diseños de pavimentos bajo la metodología tradicional utilizada en nuestro país y los nuevos criterios planteados en la nueva guía de diseño AASHTO 2002.

### 1.2 JUSTIFICACIÓN

- La American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), se motivó actualizar la guía de diseño para pavimentos, debido a que se necesita tener un enfoque racional o mecanicista de las características y desempeño de los pavimentos para con ello obtener diseños estructurales más efectivos y mejorar la confianza del diseño, a la par de reducir los costos a lo largo de la vida del pavimento.

- La AASHTO decidió abandonar los procesos empíricos usados por la AASHTO (1972, 1986, 1993) basados en los resultados del AASHTO Road Test de 1958, para empezar a usar modelos que estén basados en modelos racionales y propiedades fundamentales de los materiales. Estos esfuerzos han sido canalizados bajo el proyecto 1-37 A de la NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) de los Estados Unidos para la realización de la guía de diseño AASHTO 2002.
- Los modelos racionales facilitan la evaluación de las diferentes variables y analizar el impacto de ellos en la vida del pavimento. Así distintas cantidades de tránsito o distintos tipos de materiales en pavimentos pueden ser evaluados; como también el efecto del tiempo (envejecimiento) y la temperatura (variaciones durante el día y la noche y durante el verano y el invierno) pueden ser analizados y evaluados.
- El motivo principal por un cambio en la manera de ver el diseño de pavimentos nuevos y rehabilitados es la magnitud de los costos de construcción y rehabilitación que se utilizan en nuestro país, por tal razón la búsqueda del mejor método de diseño podrá ayudar a optimizar el uso de los recursos destinados a las carreteras y que estos sean más acorde a nuestras necesidades y condiciones actuales.

### 1.3 ALCANCE DEL TRABAJO

Con este trabajo se busca conocer y aplicar la metodología de diseño de pavimentos flexibles AASHTO 2002 y proporcionar a la ingeniería nacional un documento de ayuda que permita en el futuro incorporar esta nueva metodología enmarcada bajo el enfoque mecanicista o racional.



# **CAPITULO 2**

**MARCO TEÓRICO DEL MÉTODO AASHTO 2002**

## 2. MARCO TEÓRICO DEL MÉTODO AASHTO 2002<sup>1</sup>

### 2.1 INTRODUCCIÓN<sup>2</sup>

#### 2.1.1 Objetivo de la guía

El objetivo de la guía AASHTO 2002 es presentar un instrumento para el diseño de pavimentos nuevos y rehabilitados, basado en principios mecánico - empíricos.

La guía de diseño utiliza las variables: tránsito, clima, subrasante y materiales, para evaluar el comportamiento del pavimento con el tiempo o vida de diseño, a través de predicciones de deterioros considerados en el análisis, teniendo en cuenta leyes de comportamiento presentadas y soportadas en la guía. Así el diseñador tiene la posibilidad de mejorar las alternativas de diseño hasta que cumpla con los criterios de diseño seleccionados.

#### 2.1.2 Filosofía de la guía de diseño

La filosofía del diseño de la guía AASHTO 2002 está basada en lo siguiente:

- La guía puede ser calibrada para condiciones particulares.
- La guía presenta a los diseñadores la posibilidad de considerar diferentes alternativas de diseños y tipos de materiales.
- La guía proporciona una base de diseño para diferentes tipos de pavimentos.
- La guía de diseño considera tanto a los pavimentos nuevos como los rehabilitados.
- La guía de diseño presenta tres niveles de jerarquía en las entradas de las variables de diseño, que permiten al diseñador manejarlos teniendo en cuenta el grado de importancia de la carretera.

#### 2.1.3 Beneficios del diseño mecánico - empírico

La guía AASHTO 2002 introduce muchas mejoras a los procedimientos tradicionales de diseño. Permitirá a los diseñadores lo siguiente:

---

<sup>1</sup> Guide for Mechanistic - Empirical Design. NCHRP 1-37A

<sup>2</sup> Guide for Mechanistic - Empirical Design. NCHRP 1-37A. Part 1 Introduction, March 2004.

- Crear diseños más eficientes y económicos.
- Mejorar la confiabilidad del diseño.
- Incrementar el soporte para los costos de construcción.
- Predecir modelos específicos de falla de manera que se puedan controlar en el periodo de diseño.
- Extrapolar datos de campo y de laboratorio.
- Mejorar la utilización de los materiales disponibles.
- Minimizar las fallas prematuras.

#### 2.1.4 Procedimiento general de la guía AASHTO 2002

Etapa 1: Esta etapa consiste en la entrada de valores necesarios de las variables para el análisis de la alternativa de diseño seleccionada. En pavimentos nuevos el análisis de la subrasante consiste en determinar la rigidez y donde sea necesario analizar el cambio volumétrico, condiciones de drenaje y posibles mejoramientos a esta capa; también se analizan las características mecánicas de los materiales y los aspectos particulares de la variable tránsito.

De la variable clima se considera el modelo climático integrado reforzado (EICM) que es una herramienta importante usada para determinar perfiles de temperatura y humedad en cada capa del pavimento y la subrasante. Este modelo considera datos para predecir los cambios climáticos del pavimento durante su vida de diseño.

Etapa 2: Esta etapa consiste en el análisis interactivo tanto estructural como del comportamiento del pavimento desde su condición inicial (año base) hasta el final de su vida de diseño.

El proceso de diseño requiere ser alimentado con valores tentativos de espesores de capa, índice de rugosidad internacional (IRI) inicial y final, características de los materiales del pavimento, y muchas otras entradas. El proceso de diseño es analizado incrementalmente usando modelos de deterioro que acumulan daños con el tiempo. Si los resultados del diseño no resultan satisfactorios con los criterios de deterioros propuestos, se debe analizar de nuevo hasta que cumplan los criterios de diseño.

Etapa 3: Esta etapa incluye aquellas actividades requeridas para evaluar la viabilidad económica de las alternativas, considerando los siguientes aspectos:

- Subrasante.
- Materiales del pavimento.
- Aspectos constructivos.
- Factores climáticos (temperatura y humedad).
- Tránsito.

- Subdrenaje.
- Diseño de bermas.
- Opciones de rehabilitación.
- Interpretación de los daños con el tiempo.
- Confiabilidad del diseño.

Cada uno de estos aspectos son descritos brevemente en los próximos capítulos del marco teórico.

#### 2.1.5 Niveles de jerarquía de los datos de entrada

La jerarquización de los datos de entrada para el diseño de pavimentos nunca se tuvo en cuenta en las versiones anteriores de la AASHTO. Esta aproximación da al diseñador una flexibilidad, basada en la importancia del proyecto y en la disponibilidad de los recursos. Se jerarquizan los datos teniendo en cuenta el tránsito, los materiales y el clima. En general, son tres niveles de los datos de entrada.

Nivel 1: Es el nivel de máxima precisión. Con este procedimiento se trabaja con la mínima incertidumbre. Estos datos se utilizan en el diseño de pavimentos cuando existan niveles de tránsito pesado, cuando se requiera máxima seguridad o cuando las consecuencias económicas de un daño prematuro sean relevantes. Requiere ensayos de laboratorio o de campo como el módulo dinámico para mezclas de concreto asfáltico en caliente. Se necesitan suficientes recursos para este nivel de entrada.

Nivel 2: Es un nivel intermedio de diseño y se asemeja a los procedimientos típicos utilizados durante muchos años en las guías anteriores de la AASHTO. Este nivel se puede utilizar cuando no hay recursos disponibles para practicar los ensayos requeridos en el nivel 1. Los datos de entrada de este nivel los selecciona el diseñador, de ensayos de laboratorios o por medio de correlaciones internas sugeridas en la guía.

Nivel 3: Es el nivel de más baja precisión. Se utiliza cuando las consecuencias económicas de un falla prematura son mínimas (vías de bajo volumen de tránsito). El diseñador los estima o los obtiene de promedios de la región. La guía sugiere valores por defecto para muchas entradas.

## 2.2 SUBRASANTE<sup>3</sup>

Este capítulo proporciona los procedimientos y recomendaciones para determinar los parámetros de diseño de pavimentos nuevos en suelos de subrasante. Este capítulo se divide en cuatro secciones: caracterización de subrasantes, exploraciones subterráneas, ensayos de laboratorio, y mejoramiento de la subrasante.

### 2.2.1 Caracterización de la subrasante

La subrasante debe caracterizarse teniendo en cuenta los datos básicos de entrada para pavimentos flexibles, que para esta guía son los mismos para pavimentos rígidos. Si los datos para caracterizar la subrasante no están disponibles, el diseñador puede usar los valores por defecto de la guía. Esta guía permite el uso de niveles de jerarquía discutidos anteriormente, minimizando los costos de diseño pero incrementando el riesgo de sobrediseñar la estructura del pavimento.

Los diferentes procedimientos para caracterizar la subrasantes existentes son los siguientes:

- Ensayos de laboratorio.
- Ensayos no destructivos de pavimentos existentes con materiales de subrasante similares.
- Ensayos de comprobación como el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP).
- Experiencia o confianza que se tenga con el tipo de subrasante.

Todas estas alternativas son cubiertas en esta guía; sin embargo ensayos de laboratorio y ensayos no destructivos se recomiendan como métodos de caracterización primaria. La norma NCHRP 278, "Mediciones de las propiedades de la subrasante in situ", y NCHRP 247, "Estabilización de subrasantes existentes", pueden usarse para complementar la información. También pueden usarse experiencias de técnicas en mejoramiento de subrasante utilizadas en la región, tales como suelos expansivos o suelos saturados.

La caracterización de la cimentación, se refiere al proceso de determinar las propiedades de los estratos del suelo existentes que constituyen el apoyo del pavimento.

---

<sup>3</sup> Guide for Mechanistic - Empirical Design. NCHRP 1-37A. Part 2 Design Inputs, Chapter 1 Subgrade/Foundation, March 2004.

## 2.2 SUBRASANTE<sup>3</sup>

Este capítulo proporciona los procedimientos y recomendaciones para determinar los parámetros de diseño de pavimentos nuevos en suelos de subrasante. Este capítulo se divide en cuatro secciones: caracterización de subrasantes, exploraciones subterráneas, ensayos de laboratorio, y mejoramiento de la subrasante.

### 2.2.1 Caracterización de la subrasante

La subrasante debe caracterizarse teniendo en cuenta los datos básicos de entrada para pavimentos flexibles, que para esta guía son los mismos para pavimentos rígidos. Si los datos para caracterizar la subrasante no están disponibles, el diseñador puede usar los valores por defecto de la guía. Esta guía permite el uso de niveles de jerarquía discutidos anteriormente, minimizando los costos de diseño pero incrementando el riesgo de sobrediseñar la estructura del pavimento.

Los diferentes procedimientos para caracterizar la subrasantes existentes son los siguientes:

- Ensayos de laboratorio.
- Ensayos no destructivos de pavimentos existentes con materiales de subrasante similares.
- Ensayos de comprobación como el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP).
- Experiencia o confianza que se tenga con el tipo de subrasante.

Todas estas alternativas son cubiertas en esta guía; sin embargo ensayos de laboratorio y ensayos no destructivos se recomiendan como métodos de caracterización primaria. La norma NCHRP 278, “Mediciones de las propiedades de la subrasante in situ”, y NCHRP 247, “Estabilización de subrasantes existentes”, pueden usarse para complementar la información. También pueden usarse experiencias de técnicas en mejoramiento de subrasante utilizadas en la región, tales como suelos expansivos o suelos saturados.

La caracterización de la cimentación, se refiere al proceso de determinar las propiedades de los estratos del suelo existentes que constituyen el apoyo del pavimento.

---

<sup>3</sup> Guide for Mechanistic - Empirical Design. NCHRP 1-37A. Part 2 Design Inputs, Chapter 1 Subgrade/Foundation, March 2004.

El módulo resiliente de las capas es la propiedad necesaria para el análisis y diseño del pavimento. Existen tres métodos básicos para obtener el módulo dinámico o resiliente de cada capa estructural del pavimento:

- Ensayo de módulo resiliente en laboratorio bajo carga repetida.
- Análisis por retrocálculo.
- Correlaciones con propiedades físicas de los materiales

Para los diseños nuevos y en particular los proyectos importantes, los ensayos de módulo resiliente bajo cargas repetidas son necesarios para evaluar los efectos de cambios de humedad en el módulo resiliente de un suelo. La última versión de AASHTO T307, “Modulo resiliente para bases y subbases, materiales y suelos de subrasantes”, debe usarse para medir el módulo de resiliencia en el laboratorio.

Las variaciones horizontales y verticales en los tipos de suelos de subrasante, contenido de humedad, peso unitario, y profundidad del nivel freático, se consideran durante el proceso de diseño. Estos elementos pueden cuantificarse a través de la aplicación apropiada de campo (investigación subterránea) y pruebas de laboratorio, además las condiciones especiales subterráneas tales como suelos expansivos deben identificarse y considerarse en el diseño del pavimento. En esta guía se proporcionan las pautas como identificar y tratar a las subrasantes de condiciones especiales.

### 2.2.2 Exploración subterránea

El objetivo de las exploraciones subterráneas de campo es obtener la información suficiente que permita la selección del tipo, localización y dimensiones de cimentación del pavimento.

La investigación de la subrasante debe detallarse para definir la profundidad suficiente, el espesor y estratos de suelo que se afectarán por la cimentación del pavimento. Se deben tomar muestras de laboratorio o de campo inalteradas y alteradas de la subrasante, y la magnitud del número de muestras depende de la importancia de la carretera y las condiciones del suelo.

El Ingeniero a cargo de la exploración debe organizar el procedimiento de trabajo a seguir en la exploración. A continuación se muestran los pasos sugeridos por la guía AASHTO 2002:

1. Realizar una investigación topográfica completa y definir las condiciones de la subrasante.

2. Definir el número y profundidad de espaciamiento de la investigación subterránea. El espaciamiento y la profundidad depende de la variabilidad del suelo. Tomar suficientes muestras inalteradas de todas las capas representativas del subsuelo y obtener los perfiles de suelo con estos datos.
3. Clasificar los suelos por los sistemas AASHTO o SUCS, la siguiente tabla 2.1.1 relaciona la clasificación de los suelos del material con las características como material para pavimento.
4. Realizar ensayos de humedad / densidad para determinar las características de compactación de la subrasante. Las normas AASHTO T99 y AASHTO T180. deben usarse para suelos gruesos y finos de baja plasticidad.
5. Examinar el registro del sondeo, perfil de suelo, y clasificación de suelos y selección representativa de las capas por ensayos de suelos en laboratorios.
6. Obtener el módulo resiliente mediante el ensayo de cargas según la norma AASHTO T 307.
7. Usar el perfil de suelo a lo largo de la carretera para relacionar el módulo resiliente con cada tipo de suelo. Seleccione el módulo resiliente representativo para el diseño para cada tipo de suelo y profundidad. El módulo resiliente de diseño y otras entradas al diseño dependen del modelo de respuesta y ecuación constitutiva del suelo de subrasante, esta parte será discutida más adelante. La penetración estándar y la prueba del penetrómetro dinámico de cono permiten obtener información adicional para determinar características de esfuerzo en el sitio del suelo de subrasante.



Tabla 2.2.1 Resumen y Características de Materiales para Pavimento<sup>4</sup>

GRUPO	NOMBRE	ESFUERZOS CUANDO NO EXISTE ACCION DE CONGELAMIENTO	POTENCIAL DE CONGELAMIENTO	COMPRESIBILIDAD Y EXPANSION	CARACTERISTICAS DEL DRENAJE
GW	Arenas gruesas bien gradadas, con poco finos	Excelente	Ninguno a poco	Casi ninguno	Excelente
GP	Arenas gruesas mal gradadas	Bueno a excelente	Ninguno a poco	Casi ninguno	Excelente
GP	Gravas limosas, mezcla de grava con arena arcillosa	Bueno a excelente	Poco a medio	Casi nulo	Casi pobre
GW - GC	Gravas limosas, mezcla de grava con arena arcillosa	Bueno	Poco a medio	Leve	Pobre
SW	Arenas bien gradadas	Bueno	Ninguno a poco	Casi ninguno	Excelente
SP	Arenas mal gradadas	Regular a bueno	Ninguno a poco	Casi ninguno	Excelente
SM	Arenas limosas	Regular a bueno	Medio a alto	Muy poco	Casi pobre
SC	Arenas arcillosas	Regular a pobre	Medio a alto	Poco a medio	Pobre
Limos y arcillas con límite líquido menor que 50%	Limos inorgánicos y arenas, roca pobre, limos o arenas arcillosas con baja plasticidad	Regular a pobre	Medio a muy alto	Poco a medio	Regular a pobre
	Arcillas inorgánicas con baja plasticidad, gravas, arenas y limos arcillosos	Regular a pobre	Medio a alto	Poco a medio	Prácticamente impermeable
	Limos orgánicos y arcillas limosas de baja plasticidad	Pobre	Medio a alto	Medio a alto	Pobre
Limos y arcillas con límite líquido menor que 50%	Limos inorgánicos, arenas finas micáceas o limos elásticos	Pobre	Medio a alto	Alto	Regular a pobre
	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad	Regular a pobre	Medio a alto	Alto	Prácticamente impermeable
	Arcillas orgánicas de media a alta plasticidad	Regular a pobre	Medio	Alto	Prácticamente impermeable
Suelos orgánicos	Turba u otro suelo orgánico	No conveniente	Poco	Muy alto	Regular a pobre

<sup>4</sup> US Army Corps of Engineers, Federal Aviation Administration, and the Federal Highway Administration.

### 2.2.2.1 Localización y profundidad del sondeo

Los sondeos deben espaciarse y localizarse para establecer la estratigrafía de los materiales de la subrasante y obtener el conocimiento de sus propiedades físicas y mecánicas de las formaciones de suelo existentes en la subrasante.

### 2.2.2.2 Espaciamientos de los sondeos

El número y espaciamento de los sondeos deben ser consistentes con el tipo y magnitud del proyecto y con las condiciones del subsuelo. No existe ninguna regla para establecer el número y espaciamento de ensayos, por que esta depende de la variabilidad del subsuelo y varía típicamente de 150 a 450 m.

### 2.2.2.3 Profundidad de los sondeos

Así como no se pueden establecerse reglas para el espaciamento de los sondeos, tampoco se pueden establecer reglas para determinar la profundidad de los sondeos. Sin embargo, generalmente existen dos factores recomendados para planear las exploraciones tales como: la magnitud y distribución de las cargas del tránsito en la estructura del pavimento, y la condición natural de la subrasante.

La planeación de las profundidades de exploración dependen del conocimiento de la subrasante teniendo en cuenta los estudios geológicos y exploraciones anteriores. Para esta guía de diseño se recomienda en condiciones normales una profundidad de 1.50 m desde la elevación de la subrasante. En algunas ocasiones se deben tener profundidades hasta de 6 m ya sea por que se tengan cortes profundos para construir terraplenes, o subrasantes de capas débiles.

### 2.2.2.4 Tipo de muestras

La guía AASHTO 2002 recomienda tomar muestras inalteradas con tubo shelby o de pared delgada según la norma AASHTO T207, ya que permite identificar los suelos encontrados, contenidos de agua y límites de Atterberg. Debe tener en cuenta el Ingeniero a cargo de la exploración tomar el número suficiente de muestras y garantizar técnicamente los procedimientos adecuados para este tipo de trabajos.

### 2.2.3 Ensayos de laboratorio

Debe llevarse un programa de ensayos de laboratorio de las muestras de suelos de subrasantes; la magnitud del programa de laboratorio depende de los criterios de diseño y la complejidad de las condiciones del suelo. La guía AASHTO 2002 recomienda los siguientes ensayos utilizados normalmente en los análisis de subrasante para pavimentos, (ver tabla 2.2.2).

Tabla 2.2.2 Ensayos mínimos de laboratorio requeridos para el diseño del pavimento

TIPO DE ENSAYO DE LABORATORIO	CORTES PROFUNDOS	TERRAPLENES ALTOS	RASANTE
Contenido de humedad y peso unitario seco	X		X
Límites de Atterberg	X	X	X
Gradación		X	X
Contracción o expansión	X		X
Permeabilidad	X		
Consolidación		X	
Corte y resistencia de apoyo	X	X	X
Módulo resiliente	X	X	X

### 2.2.3.1 Número de muestras a ensayar

El número de ensayos depende del número de suelos encontrados en el apique, así como las condiciones del suelo. La mayoría de las muestras a ensayar deben tomarse lo más cerca a la subrasante, cuando sea posible a una profundidad de 60 cm debajo de la subrasante. Sin embargo, algunos ensayos deben realizarse a mayores profundidades, sobre todo si los suelos son más débiles.

El número de muestras para el ensayo del módulo resiliente a través de cargas repetidas puede ser altamente variable; la guía AASHTO recomienda tener un coeficiente de variación que no exceda el 25% para el módulo resiliente al mismo estado de tensión, como mínimo deben realizarse tres ensayos de módulo resiliente para cada tipo de subrasante.

### 2.2.3.2 Tipos de ensayos

Ensayos de clasificación: La guía recomienda las siguientes normas.

*AASHTO T87:* Preparación del agregado para el ensayo de tamizado.

*AASHTO T88:* Análisis de tamizado de suelos.

*AASHTO T89:* Determinación del límite líquido de los suelos.

Estas pruebas de identificación también permiten usar correlaciones de los resultados en ensayos tales como corte y consolidación.

- Ensayo de expansión o contracción: El ensayo para determinar el cambio de volumen debido a la expansión o contracción, se realiza bajo las normas AASHTO T92, y la AASHTO T258, las cuales pueden usarse para identificar y determinar la cantidad de contracción bajo diferentes condiciones.
- Ensayo de permeabilidad: Estos ensayos son muy pocos justificados en problemas de cimentación de pavimentos; se pueden recomendar cuando

se requiera utilizar drenes horizontales en la subrasante, para lo cual hay que tener en cuenta las capacidades de drenaje libre del suelo. Se recomienda utilizar la norma AASHTO T215.

- Ensayo de consolidación: Estos ensayos se realizan a las muestras de suelos compresibles siempre y cuando se considere económicamente dentro del estudio; la guía recomienda utilizar la norma AASHTO T216.
- Ensayo de resistencia al corte: Estos ensayos se deben realizar cuando sea posible cerca de las zonas donde se pueda esperar que ocurra la falla. En pavimentos se recomienda el ensayo triaxial consolidado no drenado en suelos cohesivos y en arenas limpias el ensayo de penetración estándar asumiendo la cohesión igual a cero (0). La guía recomienda las siguientes normas:

<i>AASHTO T223:</i>	Ensayo de corte de la veleta en campo para suelos cohesivos.
<i>AASHTO T296:</i>	Método estándar de ensayos para suelos cohesivos no consolidados, no drenados y resistencia a la compresión en compresión triaxial.
<i>AASHTO T297:</i>	Método estándar de ensayo ensayo triaxial consolidado no drenado para suelos cohesivos.

También se utiliza el ensayo del Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC) para estimar la resistencia en suelos gruesos y finos, la norma ASTM D6951-03.

Ensayo de módulo resiliente bajo carga repetida: El ensayo de módulo resiliente bajo carga repetida se realiza a cada estrato para caracterizar la subrasante para el diseño de la estructura del pavimento. Este ensayo se encuentra en la norma AASHTO T307 o NCHRP 1-28A.

Ensayos especiales: Algunas veces es necesario determinar propiedades especiales del suelo, como contenido orgánico y de carbonato. El alcance de estos ensayos depende de la cantidad de información requerida, y no existe ninguna regla para establecer estos tipos de ensayos. Normalmente se encuentran los sulfatos en suelos arcillosos y aguas ácidas en las turbas, y se hace necesario realizar un análisis químico para tener precauciones especiales. Algunos suelos tienen una acción corrosiva en metales debido a químicos y agentes bacterianos y para estos se cuenta con ensayos de laboratorios disponibles para determinar estas propiedades especiales.

Módulo resiliente in situ para estratos de suelos: Para determinar en el sitio el módulo del laboratorio a través del ensayo triaxial de cargas repetidas, las tensiones laterales y verticales deben conocerse y deben ser incluidas en la presión del suelo. A continuación se muestra el siguiente procedimiento sugerido por la guía AASHTO 2002 :

1. Estime el coeficiente de presión de suelo  $K_o$ , para cada estrato de suelo y el módulo resiliente que se necesite. Para suelos cohesivos tales como arcillas, el coeficiente de presión de suelo es normalmente considerado en función de la relación de Poisson  $\mu$ , y es:

$$K_o = \frac{\mu}{1 - \mu}$$

Para suelos no cohesivos (como gravas y arenas), el coeficiente de presión está en función del ángulo de fricción  $\Phi$ , y es:

$$K_o = 1 - \text{sen } \Phi$$

Para altas compactaciones y suelos sobre consolidados, el coeficiente de presión de suelo generalmente se calcula con las ecuaciones anteriores:

2. Asuma el módulo resiliente y espesor para cada capa en la estructura del pavimento, incluyendo el ensayo de laboratorio para cada estrato de suelo.

3. Calcule el esfuerzo vertical total,  $\sigma_z$  sobre cada punto donde se determine el módulo resiliente.

$$\sigma_z = \sigma_l + p_o$$

$\sigma_l$  = Esfuerzo vertical de la carga calculada por la teoría elástica.

$p_o$  = Presión vertical de sobrecarga de todas las capas.

$$P_o = (D\gamma)_n + \sum_{i=1}^{n-1} (D\gamma)_i$$

$D$  = Espesor de la capa,

$\gamma$  = Peso unitario de cada capa.

$i$  = Capas sobre los estratos de suelos,  $n$  para cada módulo resiliente.

4. Calcule el esfuerzo lateral  $\sigma_3$  a una profundidad a la que determine el módulo resiliente del estrato de suelo:

$$\sigma_3 = \sigma_{x,y} + k_0 (P_0)$$

$\sigma_{xy}$  = Esfuerzo horizontal de las cargas de la rueda aplicadas a la superficie del pavimento, calculadas por la teoría elástica.

5. Calcule el módulo resiliente para esfuerzos verticales y horizontales, usando la ecuación constitutiva.

6. Compare el módulo resiliente asumido con el valor calculado. Si los esfuerzos calculados se encuentran dentro del 5% de diferencia, entonces se puede tomar el módulo resiliente para construcción.

## 2.2.4 Mejoramiento de la subrasante

La guía AASHTO 2002, considera los siguientes tipos de mejoramientos:

- Estabilización de suelos débiles.
- Espesores grandes en capas granulares.
- Drenajes en la subrasante.
- Geosintéticos.
- Suelos encapsulados.

La subrasante se puede tratar con varios materiales para mejorar sus características; la estabilización de suelos se realiza por dos razones:

1. Para comodidad en la compactación de subrasantes muy húmedas que se someten a un proceso de secado.
2. Para fortalecer un suelo débil y restringir el cambio de volumen en suelos compresibles, mejorando el aporte estructural en el diseño del pavimento.

Estabilización de suelos débiles: La guía AASHTO 2002, considera los siguientes tipos de estabilización de suelos: estabilización con cal, estabilización con cemento, estabilización con asfalto.

Espesor de las capas granulares: La guía AASHTO 2002 presenta los beneficios de utilizar espesores grandes en una estructura de pavimento flexible; se considera un espesor grande aquellos que sean mayores que 45 cm. A continuación se muestra una lista de beneficios de tener capas granulares grandes:

- Aumenta la capacidad de soporte en subrasantes débiles o de suelo fino.
- Mantiene una capacidad mínima para el diseño y construcción de pavimentos.
- Proporciona una subrasante de apoyo uniforme sobre secciones de condiciones de suelos muy variables.
- Reduce los efectos climáticos de cambios de humedad y temperatura en la subrasante.
- Facilita el drenaje de la superficie a través del diseño geométrico.
- Mejora el drenaje de la subrasante.
- Aumenta las cotas de elevación de los pavimentos en las áreas de niveles freáticos altos.
- Reduce el potencial de ahuellamiento en la subrasante de pavimentos flexibles.

Drenajes de la subrasante: Se usan los sistemas de drenaje en la subrasante por tres razones básicas:

1. Para bajar el nivel freático de agua.
2. Para interceptar el flujo lateral del agua de la subrasante bajo la estructura del pavimento.
3. Para eliminar el agua infiltrada en la superficie del pavimento.

Geosintéticos: La guía AASHTO 2002 considera como técnicas de mejoramiento en los pavimentos el uso de geosintéticos tales como: geotextiles, geomembranas, geosintéticos, geomallas, etc. Los geotextiles se utilizan para mejorar las condiciones de las subrasantes; se encuentran definidos en la norma ASTM D4439.

Suelos encapsulados: La encapsulación, es una técnica para proteger los suelos sensibles a grandes variaciones de humedad. Sin embargo, esta técnica raramente se usa para mejorar las cimentaciones de carreteras con grandes volúmenes. Se usa normalmente como una cimentación o subbase para las carreteras de bajo volumen.

El concepto de encapsulación del suelo, es mantener la humedad de los suelos finos ligeramente debajo de la humedad óptima, a través de membranas impermeables que previenen la infiltración de agua a los materiales sensibles de humedad, con lo que se puede lograr mejorar la resistencia del material ante las sollicitaciones de cargas del tránsito.

Esta técnica es usada para mantener el módulo resiliente y la resistencia de la subrasante de la cimentación en períodos largos de tiempo, y se recomienda a menos que no exista otra opción disponible.

## 2.3 MATERIALES<sup>5</sup>

### 2.3.1 Introducción

El presente capítulo muestra las características, de los diferentes materiales utilizados en la construcción de pavimentos, necesarias para el diseño; además, describe la(s) forma(s) para la obtención de estos datos.

Los modelos mecánicos - empíricos categorizan estas características en 3 grupos:

1. Características necesarias para la determinación de los estados de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos.
2. Características necesarias para los modelos de fatiga y rugosidad.
3. Características necesarias para la determinación de los perfiles de humedad y temperatura a través de la sección transversal de la estructura del pavimento.

#### 2.3.1.1 Factores considerados

Dependencia del tiempo: El cambio de propiedades, de algunos materiales, en el tiempo debido a fuerzas físicas, químicas, influencia del clima y el inicio de grietas y fracturas; lo cual, conlleva a un deterioro o a un mejoramiento del material.

Dependencia de la temperatura: Todos los materiales asfálticos son altamente sensibles a la temperatura y a frecuencias de carga, debido a que son materiales viscoelástico - plástico. La frecuencia de carga tiene el mismo efecto que la temperatura en la respuesta estructural del material; pero no es el único factor que influencia el comportamiento del material; también, lo hace la posición de éste en la estructura del pavimento. Mientras más profundo esté el material la magnitud de los esfuerzos va a ser menor y su comportamiento va a ser mejor.

Comportamiento no lineal: Un material tiene un comportamiento no lineal mientras que el valor de su módulo dependa del estado de esfuerzos en el que se encuentre. Cuando hay presencia de estos materiales en la estructura de pavimento, el uso de programas de elementos finitos debe ser usado en el cálculo de la respuesta del pavimento.

---

<sup>5</sup> Guide for Mechanistic - Empirical Design. NCHRP 1-37A. Part 2 Design Inputs, Chapter 2 Material Characterization, March 2004.



### 2.3.1.2 Materiales considerados

Existen muchas combinaciones de materiales y calidades que son usados en la construcción de pavimentos flexibles. Diferentes países tienen definidas sus propias categorías, pero la vía de Diseño AASHTO 2002 considera las siguientes:

Materiales asfálticos: Es el grupo más complejo debido a que su comportamiento está muy influenciado por la temperatura, la frecuencia de carga, el método de mezcla, los procesos de mezclado y el grado de daño del material (nuevo o rehabilitado). Este grupo contiene a otros grupos como el de los reciclados.

Materiales estabilizados químicamente: Contiene una gran cantidad de materiales cementantes y puzolánicos, desde materiales que sólo afectan propiedades de plasticidad hasta aquellos que aumentan el módulo, resistencia y otras características fundamentales para mejorar el comportamiento del sistema del pavimento.

Materiales no conglomerados: Son aquellos materiales en los cuales se presenta una dependencia directa entre el módulo y el estado de esfuerzos al que está sometido.

Lecho rocoso: También se trata este tipo de material debido a que su presencia cerca de la estructura de pavimento puede tener gran influencia en el comportamiento de esta.

### 2.3.1.3 Jerarquía del diseño

El esfuerzo que se debe realizar en el diseño de un determinado pavimento debe ser acorde a la importancia, tamaño y costo del proyecto. La Guía de Diseño proporciona tres (3) niveles:

Nivel 1: Este es el nivel de mayor exactitud y el de mejor aceptación, por lo general se trata de obtener datos por medio de ensayos de laboratorio.

Nivel 2: Este es el nivel más usado, por lo general se trata de obtener datos por medio de correlaciones con propiedades que son medidas en laboratorio o in situ.

Nivel 3: Este es el nivel de menor exactitud, por lo general los datos son suministrado por defecto, de experiencias o datos históricos.

La selección del nivel se basa sobretodo en el sistema de diseño: nuevo o rehabilitación; por ejemplo para las estructuras existentes se realiza ensayos de laboratorio in situ, lo cual proporciona buena información sobre el estado y el comportamiento de los materiales.

### 2.3.2 Materiales asfálticos

Como se mencionó al comienzo de este capítulo, los modelos mecánico - empíricos necesitan diferentes datos de los materiales para la determinación de estados de esfuerzos, para los modelos de fatiga y para determinar perfiles de humedad y temperatura. Los datos necesarios para los materiales asfálticos, se muestran a continuación en la tabla 2.3.1

Tabla 2.3.1 Propiedades de los Materiales Asfálticos

MATERIAL	ENTRADAS NECESARIAS		
	RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA	DATOS ADICIONALES	DATOS NECESARIOS PARA EL MODELO CLIMATICO
Materiales asfálticos (incluye capas de rodadura, bases, subbases y ligantes)	Módulo dinámico (E)	Resistencia a tracción, creep y coeficiente de expansión térmico	Absorción de onda corta, conductividad térmica y capacidad de calor
	Relación de Poisson ( $\mu$ )		Viscosidad del ligante

#### 2.3.2.1 Módulo dinámico

La principal propiedad de rigidez que interesa de los materiales asfálticos en el Módulo Dinámico (E), es la dependencia tiempo - temperatura. A continuación en la tabla 2.3.2, se muestran las diferentes formas de obtener esta dependencia, según el nivel deseado para el diseño.

Tabla 2.3.2 Estimación del Módulo Dinámico

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1	1 Comportamiento del módulo dinámico (E) con el ensayo NCHRP 128-A.
	2 Comportamiento del módulo complejo (G) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) con el ensayo AASHTO T315. Alternativamente, se puede obtener con el reómetro o con el uso de correlaciones.
	3 Estimar los parámetros A y VTS para la temperatura de mezclado y compactación.
	4 Realizar la curva maestra después de establecer la relación de viscosidad - temperatura.
2	1 Calcular el módulo dinámico (E) por medio de ecuaciones
	2 Comportamiento del módulo complejo (G) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) con el ensayo AASHTO T315. Alternativamente, la viscosidad se puede obtener con datos de ensayos convencionales o usando el viscosímetro.
	3 Estimar los parámetros A y VTS para la temperatura de mezclado y compactación.
	4 Realizar la curva maestra después de establecer la relación de viscosidad - temperatura.
3	1 Calcular el módulo dinámico (E) por medio de ecuaciones
	2 Seleccionar valores típicos de A y VTS, basándose en el grado, viscosidad o penetración.
	3 Realizar la curva maestra después de establecer la relación de viscosidad - temperatura.

**Nivel 1:** Para el desarrollo de la curva maestra se necesita información tanto de la mezcla como del ligante. La información de la mezcla, consiste en el módulo dinámico a diferentes frecuencias; mientras que, la información del ligante consiste en el módulo complejo y el ángulo de fase a una frecuencia de 1.59 Hz y varias temperaturas.

El comportamiento del módulo dinámico (E), se obtendrá usando el ensayo NCHRP I28 - A, variando temperaturas y frecuencias, de acuerdo con la siguiente recomendación:

Tabla 2.3.3 Temperaturas y Frecuencias Recomendadas para la Determinación de E de la Mezcla

TEMPERATURA (°F)	E y $\delta$ (mezcla)			
	0.1 Hz	1 Hz	10 Hz	25 Hz
10	X	X	X	X
25				
40	X	X	X	X
55				
70	X	X	X	X
85				
100	X	X	X	X
115				
130	X	X	X	X

Sin embargo, se puede aumentar la cantidad de temperaturas y frecuencias en el caso de necesitarlo.

Comportamiento del módulo complejo (G) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante, usando el ensayo AASHTO T315 a una frecuencia de 1.59 Hz y variando temperaturas, de acuerdo con la siguiente recomendación:

Tabla 2.3.4 Temperatura Recomendada para Determinar el Módulo Complejo y el Ángulo de Fase del Ligante

TEMPERATURA (°F)	G y $\delta$ (Ligante)
40	x
55	x
70	x
85	x
100	x
115	x
130	x

Sin embargo, se puede aumentar la cantidad de temperaturas en el caso de necesitarlo.

Estimar los parámetros A y VTS, usando la ecuación que relaciona la rigidez y la viscosidad.

$$\eta = \frac{G}{10} \left( \frac{1}{\text{sen } \delta} \right)^{4.8628}$$

- Log Log  $\eta$  = A + VTS Log Tr
- G = Módulo Complejo (Pa)
- $\delta$  = Ángulo de fase (°)
- $\eta$  = Viscosidad (CP)
- Tr = Temperatura a la cual fue determinada la viscosidad (Rankine)
- A, VTS = Parámetros de regresión

Realización de la curva maestra, después de establecer la relación viscosidad - temperatura, usando la siguiente expresión:

$$\text{Log } (E) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma [\text{Log } (T) - c (\text{Log } (\eta) - \text{Lo } (\eta_{Tr}))]}}$$

- E = Módulo Dinámico (PSI)
- t = Tiempo de carga (s)
- $\eta$  = Viscosidad a la temperatura de interés (CP)
- $\eta_{Tr}$  = Viscosidad a la temperatura de referencia (CP)
- $\alpha, \beta, \delta, \gamma, c$  = Parámetros específicos de la mezcla

Nivel 2: Para el desarrollo de la curva maestra se necesita información tanto de la mezcla como del ligante. La información de la mezcla, consiste en el módulo dinámico; mientras que, la información del ligante consiste en el módulo complejo y el ángulo de fase a una frecuencia de 1.59 Hz y varias temperaturas de la mezcla.

Cálculo del módulo dinámico (E), por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Log } (E^*) = 3.750063 p_{200} - 0.001767 (p_{200})^2 - 0.002841 p_4 - 0.05809 V_a - 0.802208 \left[ \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right] + \frac{3.871977 - 0.0021 p_4 + 0.003958 p_{38} - 0.000017 (p_{38})^2 + 0.005470 p_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.31335 \log(f) - 0.393532 \log(\eta))}}$$

- E = Módulo Dinámico (PSI)

- $\eta$  = Viscosidad del ligante ( $10^6$  Poises)
- $f$  = Frecuencia de carga (Hz)
- $V_a$  = Contenido de aire (%)
- $V_{beff}$  = Contenido efectivo de ligante (%)
- $P_{34}$  = % retenido en  $\frac{3}{4}$ "
- $P_{38}$  = % retenido en  $\frac{3}{8}$ "
- $P_4$  = % retenido en # 4
- $P_{200}$  = % pasa en # 200

La anterior expresión fue obtenida por el Dr. M. W. Witczak, el Dr. W. Mirza y el Dr. Fonseca, profesores de la Universidad de Maryland, bajo el proyecto NCHRP I-37 A "Development of a Revised Predicted Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures". El proyecto buscaba recalibrar el modelo existente obtenido por el Dr. M. W. Witczak y otros colegas de la Universidad de Maryland, ya que este modelo tenía varias limitaciones como: sólo servía para asfaltos convencionales, la geometría de los especímenes utilizados no fue estandarizada, se utilizaron granulometrías determinadas, uso de diferentes métodos de compactación, y el modelo limitaba el valor del Módulo Dinámico; además, el proyecto buscaba ampliar la base de datos utilizada para el hallazgo de un modelo más general.

Como resultado, se obtuvo una ecuación más general, con menos limitaciones y que presenta las siguientes características:

Tabla 2.3.5 Características de la Ecuación de Dr. M. W. Witczak, el Dr. W. Mirza y el Dr. Fonseca

PARAMETRO	VALOR
$R^2$	0.96
$Se/Sy$	0.24
Número de datos	2750
Rango de temperatura	0 a 130 °F
Frecuencia de carga	0.1 a 25 Hz
Número de mezclas	Total = 205
	Asfalto sin modificar = 171
	Asfalto modificado = 34
Número de ligantes	Total = 23
	Sin modificar = 9
	Modificados = 14
Número de agregados	39
Forma de los especímenes	Cilindros = 4" x 8" o 3.75" x 5.5"
Métodos de compactación	Giratorio y amasado

Comportamiento del módulo complejo (G) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) del ligante, usando el ensayo AASHTO T315 o INV E-754 y después del ensayo de película delgada, a una frecuencia de 1.59 Hz y variando temperaturas, de acuerdo con la Tabla 2.3.4. Sin embargo, se pueden aumentar la cantidad de temperaturas en el caso de necesitarlo.

Otra de las formas de hallar la viscosidad es por medio del ensayo de penetración, con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Log } (\eta) &= 10.5012 - 2.2601 \text{ Log } (\text{Pen}) + 0.00389 \text{ Log } (\text{Pen})^2 \\ \eta &= \text{Viscosidad (Poises)} \\ \text{Pen} &= \text{Penetración para 100 g y 5 seg (mm/10)} \end{aligned}$$

Estimar los parámetros A y VTS, haciendo la regresión lineal de la ecuación que relaciona la rigidez y la viscosidad:

$$\eta = \frac{G}{10} \left( \frac{1}{\text{sen } \delta} \right)^{4.8628}$$

$$\begin{aligned} \text{Log Log } \eta &= A + \text{VTS Log Tr} \\ G &= \text{Módulo Complejo (Pa)} \\ \delta &= \text{Ángulo de fase (}^\circ\text{)} \\ \eta &= \text{Viscosidad (CP)} \\ \text{Tr} &= \text{Temperatura a la cual fue determinada la viscosidad (Rankine)} \\ A, \text{ VTS} &= \text{Parámetros de regresión} \end{aligned}$$

Se debe tener cuidado con el uso de la anterior ecuación, ya que a bajas temperaturas y a altas frecuencias de carga, la viscosidad del ligante tiende a un valor máximo constante igual a 2.7 E 10 Poises.

Realización de la curva maestra, después de establecer la relación viscosidad - temperatura, usando la siguiente expresión:

$$\text{Log } (E) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma [\text{Log } (T) - c (\text{Log } (\eta) - \text{Lo } (\eta_{Tr}))]}}$$

$$\begin{aligned} E &= \text{Módulo Dinámico (PSI)} \\ t &= \text{Tiempo de carga (s)} \\ \eta &= \text{Viscosidad a la temperatura de interés (CP)} \\ \eta_{Tr} &= \text{Viscosidad a la temperatura de referencia (CP)} \\ \alpha &= 3.871977 - 0.0021 * P_4 + 0.003958 * P_{38} - 0.000017 * P_{38}^2 + 0.005470 * P_{34} \\ \beta &= -0.603313 - 0.393532 * \text{Log}(\eta \text{Tr}) \\ \gamma &= 0.313351 \end{aligned}$$

$$c = 1.255882$$

$$\delta = 3.750063 + 0.03932 P_{200} - 0.001767 (P_{200})^2 - 0.002841 P_4 - 0.058097 V_a - 0.80228 \left[ \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right]$$

**Nivel 3:** Para el desarrollo de la curva maestra se necesita información tanto de la mezcla como del ligante. La información de la mezcla, consiste en el módulo dinámico; mientras que, la información del ligante consiste en el módulo complejo y el ángulo de fase a una frecuencia de 1.59 Hz y varias temperaturas.

Cálculo del módulo dinámico (E), por medio de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Log}(E^*) = & 3.750063 p_{200} - 0.001767 (p_{200})^2 - 0.002841 p_4 - 0.05809 V_a - 0.802208 \left[ \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right] \\ & + \frac{3.871977 - 0.0021 p_4 + 0.003958 p_{38} - 0.000017 (p_{38})^2 + 0.005470 p_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.31335 \log(f) - 0.393532 \log(\eta))}} \end{aligned}$$

- E = Módulo dinámico (PSI)
- $\eta$  = Viscosidad del ligante ( $10^6$  Poises)
- f = Frecuencia de carga (Hz)
- $V_a$  = Contenido de aire (%)
- $V_{beff}$  = Contenido efectivo de ligante (%)
- $P_{34}$  = % Retenido en  $\frac{3}{4}$ "
- $P_{38}$  = % Retenido en  $\frac{3}{8}$ "
- $P_4$  = % Retenido en # 4
- $P_{200}$  = % Pasa en # 200

Seleccionar los parámetros A y VTS, con base en el grado, viscosidad o penetración del asfalto:

Tabla 2.3.6 Valores Recomendados de A y VTS de acuerdo al Grado PG del Asfalto

GRADO ALTA TEMP.	GRADO A BAJA TEMPERATURA														
	-10		-16		-22		-28		-34		-40		-46		
	VTS	A	VTS	A	VTS	A	VTS	A	VTS	A	VTS	A	VTS	A	
46										-3.90	11.50	-3.39	10.10	-2.91	8.755
52	-4.57	13.39	-4.54	13.31	-4.34	12.76	-4.01	11.84	-3.60	10.71	-3.16	9.496	-2.74	8.310	
58	-4.47	12.32	-4.45	12.45	-3.98	11.79	-3.70	11.01	-3.35	10.04	-2.97	8.976			
64	-3.84	11.43	-3.82	11.38	-3.68	10.98	-3.44	10.31	-3.13	9.461	-2.80	8.524			
70	-3.57	10.69	-3.55	10.64	-3.43	10.30	-3.22	9.715	-2.95	8.965	-2.65	8.129			
76	-3.33	10.06	-3.32	10.02	-3.21	9.715	-3.02	9.20	-2.79	8.532					
82	-3.43	9.514	-3.41	9.475	-3.02	9.209	-2.86	8.75	-2.64	8.452					

Tabla 2.3.7 Valores recomendados para A y VTS de acuerdo a la viscosidad del asfalto (100\*poises)

GRADO	A	VTS
AC - 2.5	11.5167	-3.8900
AC - 5	11.2614	-3.7914
AC - 10	11.0134	-3.6954
AC - 20	10.7709	-3.6017
AC - 30	10.6316	-3.5480
AC - 40	10.5338	-3.5104

Tabla 2.3.8 Valores recomendados para A y VTS de acuerdo a la penetración del Asfalto (10/mm)

GRADO	A	VTS
40 - 50	10.5254	-3.5047
60 - 70	10.6508	-3.5537
85 - 100	11.8232	-3.6210
120 - 150	11.0897	-3.7252
200 - 300	11.8107	-4.0068

### 2.3.2.2 Relación de Poisson

La relación de Poisson de los materiales asfálticos, generalmente se encuentra entre 0.15 y 0.50 y es función de la temperatura, a continuación en la tabla 2.3.9, se muestran las diferentes formas de obtener esta relación:

Tabla 2.3.9 Estimación de la Relación de Poisson de Materiales Asfálticos

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1	No aplica
2	Utilizando ecuaciones o seleccionando un valor de rangos típicos
3	Valores típicos

#### Mezclas en caliente:

Nivel 1: No aplica debido a que no existen modelos de efectos de dilatación que garanticen un comportamiento no lineal.

Nivel 2: Existen tres formas de estimar la relación de Poisson, como son:

- Usando la ecuación que se presenta a continuación, en la cual el diseñador entra los valores de a y b estimados de una mezcla específica:

$$\mu_{ac} = 0.15 + \frac{0.35}{1 + e^{(a+bE_{ac})}}$$

$\mu_{ac}$  = Relación de Poisson de la mezcla a una temperatura específica



$E_{ac}$  = Módulo Dinámico de la mezcla a una temperatura específica (PSI)

- Usando la ecuación que se presenta a continuación, la cual tiene los valores típicos de a y b.

$$\mu_{ac} = 0.15 + \frac{0.35}{1 + e^{(-1.63 + 3.84E-6 * E_{ac})}}$$

$\mu_{ac}$  = Relación de Poisson de la mezcla a una temperatura específica

$E_{ac}$  = Módulo Dinámico de la mezcla a una temperatura específica (PSI)

- Seleccionar un valor de los rangos que se presentan en la tabla 2.3.10:

Tabla 2.3.10. Rango Típico de la Relación de Poisson de Mezclas Densas

TEMPERATURA °F	RANGO DE $\mu$
< 0	< 0.15
0 - 40	0.15 - 0.20
40 - 70	0.20 - 0.30
70 - 100	0.30 - 0.40
100 - 130	0.40 - 0.48
> 130	0.45 - 0.48

Nivel 3: Tomar el valor típico de la relación de Poisson, según la tabla 2.3.11:

Tabla 2.3.11. Valor Típico De La Relación De Poisson De Mezclas Densas

TEMPERATURA °F	RANGO DE $\mu$
< 0	0.15
0 - 40	0.20
40 - 70	0.25
70 - 100	0.35
100 - 130	0.45
> 130	0.48

Materiales tratados con asfalto:

Nivel 1: No aplica debido a que no existen modelos de efectos de dilatación que garanticen un comportamiento no lineal.

Nivel 2: Seleccionar un valor de los rangos que se presentan en la tabla 2.3.12:

Tabla 2.3.12. Rango Típico de la Relación de Poisson de Materiales Tratados con Asfalto

TEMPERATURA °F	RANGO DE $\mu$
< 40	0.35 - 0.40
40 - 100	0.35 - 0.40
> 100	0.40 - 0.48

Nivel 3: Tomar el valor típico de la relación de Poisson, de acuerdo a la tabla 2.3.13:

Tabla 2.3.13. Valor Típico de la Relación de Poisson de Materiales Tratados con Asfalto

TEMPERATURA °F	RANGO DE $\mu$
< 40	0.35
40 - 100	0.40
> 100	0.45

Mezcla en frío:

En esta categoría se encuentran tanto las mezclas en frío como los materiales reciclados

Nivel 1: No aplica debido a que no existen modelos de efectos de dilatación que garanticen un comportamiento no lineal .

Nivel 2: Seleccionar un valor de los rangos que se presentan a continuación:

Tabla 2.3.14. Rango Típico de la Relación de Poisson de Mezclas en Frío

TEMPERATURA °F	RANGO DE $\mu$
< 40	0.25 - 0.35
40 - 100	0.30 - 0.45
> 100	0.40 - 0.48

Nivel 3: Tomar el valor típico de la relación de Poisson, de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 2.3.15. Valor Típico de la Relación de Poisson de Mezclas en Frío

TEMPERATURA °F	RANGO DE $\mu$
< 40	0.30
40 - 100	0.35
> 100	0.45

### 2.3.2.3 Resistencia a tracción

La resistencia a tracción de materiales asfálticos se determina así:

Tabla 2.3.16. Estimación de la Resistencia a Tracción de Materiales Asfálticos

NIVEL	DESCRIPCION
1	Medirla a través de pruebas de laboratorio
2	Medirla a través de pruebas de laboratorio
3	Calcularla a través de correlaciones

**Nivel 1:** La resistencia a tracción se determina de acuerdo a la norma AASHTO T322 “Determinación del creep y resistencia de mezclas calientes mediante la tracción indirecta”.

**Nivel 2:** La resistencia a tracción se determina de acuerdo a la norma AASHTO T322 “Determinación del creep y resistencia de mezclas calientes mediante la tracción indirecta”.

**Nivel 3:** La resistencia a tracción se determina con la ecuación desarrollada en el proyecto NCHRP 1-37 A, la cual se presenta a continuación:

$$RT \text{ (PSI)} = 7416.712 - 114.016 * Va - 0.304 * Va^2 - 122.592 * VFA + 0.704 * VFA^2 + 405.71 \text{Log(Pen)} - 2039.296 \text{Log(A)}$$

- RT = Resistencia a tracción indirecta a 14° F
- Va = Volumen de vacíos (%)
- VFA = Volumen de aire llenos de asfalto (%)
- Pen = Penetración a 77° F (mm/10)
- A = Intercepto de la susceptibilidad de viscosidad - temperatura

#### 2.3.2.4 Creep

El creep de materiales asfálticos se determina de la siguiente manera:

Tabla 2.3.17. Estimación del Creep de Materiales Asfálticos

NIVEL	DESCRIPCION
1	Medirla a través de pruebas de laboratorio
2	Medirla a través de pruebas de laboratorio
3	Calcularla a través de correlaciones

**Nivel 1:** El creep se determina de acuerdo a la norma AASHTO T322 “Determinación del creep y resistencia de mezclas calientes usando la tracción indirecta”, teniendo en cuenta la siguiente recomendación:

Tabla 2.3.18. Requerimientos para el Ensayo de Creep en Mezclas Calientes

TIEMPO DE CARGA Hz	TEMPERATURA °F		
	-4	14	32
1	X	X	X
2	X	X	X
5	X	X	X
10	X	X	X
20	X	X	X
50	X	X	X
100	X	X	X

Nivel 2: El creep se determina de acuerdo al ensayo AASHTO T322 “Determinación del creep y resistencia de mezclas calientes usando la tracción indirecta”.

Nivel 3: El creep se determina con la ecuación desarrollada en el proyecto NCHRP 1-37 A, la cual se presenta a continuación:

$$D(t) = D1 * t^m$$

$$\text{Log}(D1) = -8.524 + 0.01306 * Te + 0.7957 \text{Log}(Va) + 2.0103 \text{Log}(VFA) - 1.923 \text{Log}(A)$$

$$m = 1.1628 - 0.00185 * Te - 0.04596 * Va - 0.01126 * VFA + 0.00247 * Pen + 0.001683 * Te * Pen^{0.4605}$$

Te = temperatura a la cual fue medido el creep (°F)  
 Va = volumen de vacíos en la construcción (%)  
 VFA = volumen de vacíos llenos de asfalto en la construcción (%)  
 Pen = penetración del asfalto a 77°F (mm/10)

### 2.3.2.5 Coeficiente de expansión térmico

El coeficiente de expansión térmico de materiales asfálticos se determina de la siguiente manera:

Tabla 2.3.19. Estimación del Coeficiente de Expansión Térmico de Materiales Asfálticos

NIVEL	DESCRIPCION
1	No aplica
2	No aplica
3	Calcularla con ecuaciones propuestas

Nivel 1: No aplica ya que no existen ensayos estándares, propuestos por la AASHTO o al ASTM, para determinar este parámetro.

Nivel 2: No aplica ya que no existen ensayos estándares, propuestos por la AASHTO o al ASTM, para determinar este parámetro.

Nivel 3: Usar la siguiente ecuación propuesta por Jones:

$$L_{mix} = \frac{VMA * Bac + Vagg * Bagg}{3 * Vtotal}$$

L<sub>mix</sub> = Coeficiente lineal de expansión térmico de la mezcla (1/°C)  
 Bac = Coeficiente de expansión térmico del asfalto en estado sólido (1/°C)  
 Bagg = Coeficiente de expansión térmico del agregado (1/°C)  
 VMA = Volumen de vacíos del agregado mineral (%)  
 Vagg = Volumen de agregados en la mezcla (%)  
 Vtotal = Volumen total de vacíos (%)

A continuación se presentan algunos valores típicos:

$$L_{mix} = 2.2E-5 \text{ a } 3.4 E-5 / ^\circ F$$

$$B_{ac} = 3.5E-4 \text{ a } 4.3E-4 / ^\circ C$$

$$B_{agg} = 21E-6 \text{ a } 37E-6 / ^\circ C$$

### 2.3.2.6 Absorción de onda corta

La absorción de onda corta de materiales asfálticos se determina de la siguiente manera:

Tabla 2.3.20. Estimación de la Absorción de Onda Corta de Materiales Asfálticos

NIVEL	DESCRIPCION
1	No aplica
2	No aplica
3	Seleccionar un valor por defecto

Nivel 1: No aplica ya que no existen ensayos estándares, propuestos por la AASHTO, para determinar este parámetro.

Nivel 2: No aplica ya que no existen correlaciones para determinar este parámetro.

Nivel 3: Seleccionar un valor de los siguientes rangos:

Tabla 2.3.21. Rango de Absorción de Onda Corta de Materiales Asfálticos

ESTADO	RANGO
Asfalto deteriorado	0.80 - 0.90
Asfalto nuevo	0.90 - 0.98

### 2.3.2.7 Conductividad térmica

La conductividad térmica de materiales asfálticos se determina de la siguiente manera:

Tabla 2.3.22. Estimación de la Conductividad Térmica de Materiales Asfálticos

NIVEL	DESCRIPCION
1	Medirla usando ensayo de laboratorio
2	No aplica
3	Seleccionar un valor por defecto

Nivel 1: Medir la conductividad térmica de materiales asfálticos con la norma ASTM E 1952 “Método Estándar para Conductividad Térmica y Difusión Térmica por Diferencial de Temperatura Escaneando Calorimetría”

Nivel 2: No aplica ya que no existen correlaciones para determinar este parámetro.

Nivel 3: Seleccionar un valor de conductividad térmica entre 0.44 a 0.81 Btu / pie\*hora\*°F

### 2.3.2.8 Capacidad de calor

La capacidad de calor de materiales asfálticos se determina de la siguiente manera:

Tabla 2.3.23. Estimación de la Capacidad de Calor de Materiales Asfálticos

NIVEL	DESCRIPCION
1	Medirla usando ensayo de laboratorio
2	No aplica
3	Seleccionar un valor por defecto

Nivel 1: Medir la capacidad de calor de materiales asfálticos con el ensayo ASTM D 2766 “Calor Específico de Líquidos y Sólidos”

Nivel 2: No aplica ya que no existen correlaciones para determinar este parámetro.

Nivel 3: Seleccionar un valor de conductividad térmica entre 0.22 a 0.40 Btu / libra x °F

### 2.3.3 Materiales estabilizados químicamente

Los modelos mecánico - empíricos necesitan diferentes datos de los materiales para la determinación de estados de esfuerzos, para los modelos de fatiga y para determinar perfiles de humedad y temperatura. Los datos necesarios para los materiales estabilizados químicamente, se muestran a continuación:

Tabla 2.3.24. Propiedades de Materiales Estabilizados Químicamente

MATERIAL	ENTRADAS NECESARIAS		
	RESPUESTAS DE LA ESTRUCTURA	DATOS ADICIONALES	DATOS MODELO CLIMATICO
Materiales estabilizados químicamente	Módulo elastico	Módulo resiliente	Conductividad térmica
	Relación de Poisson	Módulo de rotura	Capacidad de calor
	Peso unitario		

En este grupo se encuentran: el concreto pobre, gradaciones abiertas estabilizadas con cemento, suelo cemento, cal - cemento - escorias y materiales tratados con cal.

Cuando una capa estabilizada de poco espesor se encuentra en la parte baja de la estructura (debajo de la base o subbase), puede considerarse como una capa de módulo constante, insensible a la humedad, en otras palabras el consumo de fatiga de esta capa no es un problema y la precisión requerida para su caracterización es menor; mientras que, si este material se encuentra en una parte alta de la estructura el cálculo de la fatiga y la caracterización se debe realizar con más cuidado.

Las estabilizaciones generalmente se realizan para ganar un mínimo de resistencia a compresión dependiendo del tipo de pavimento y su relativa importancia en la estructura. Los valores mínimos recomendados se presentan a continuación en la tabla 2.3.25:

Tabla 2.3.25 Resistencia Mínima para Materiales Estabilizados Dependiendo del Tipo De Pavimento

CAPA	PAVIMENTO RIGIDO	PAVIMENTO FLEXIBLE
Base	500 PSI	750 PSI
Subbase	200 PSI	250 PSI

### 2.3.3.1 Módulo resiliente

Los módulos son obtenidos a los 28 días aunque este valor es muy conservador para diseño debido a que estos materiales algunos veces ganan resistencia con el tiempo y otras veces pierden resistencia con el tiempo, debido a cambios en las condiciones de humedad y temperatura, propiedades y cantidades del estabilizante o propiedades de los materiales estabilizados.

Tabla 2.3.26. Estimación del Módulo Resiliente o Elástico de Materiales Estabilizados Químicamente

NIVEL	DESCRIPCION
1	Determinados con ensayos de laboratorio
2	Determinados por correlaciones
3	Valores por defecto

Nivel 1: Los valores de los módulos resiliente, serán determinados de la siguiente manera:

Tabla 2.3.27. Módulo Elástico o Resiliente de Materiales Estabilizados Químicamente con Pruebas de Laboratorio

MATERIAL	ENSAYO
Concreto pobre	E con ASTM C 469
Agregado tratado con cemento	E con ASTM C 469
Gradacion abierta tratado con cemento	No aplica
Suelo - cemento	No aplica
Cal - cemento - escoria	No aplica
Suelo - cal	Mr con AASHTO T307

Los módulos de estructuras existentes pueden ser obtenidos con el deflectómetro de impacto FWD, con ayuda del Georadar GPR para la verificación de espesores. Cuando existen capas menores a 6 pulgadas en la parte baja de la estructura es muy difícil obtener el módulo por retrocálculo por lo que se recomienda hacer pruebas de laboratorio.

Nivel 2: Los valores de módulo resiliente se determina con las siguientes correlaciones:

Tabla 2.3.28 Módulo Resiliente de Materiales Estabilizados Químicamente por Correlaciones

MATERIAL	CORRELACION
Concreto pobre	$E=57000*(f_c)^{0.5}$ (PSI)
	fc obtenido con AASHTO T22
Agregado tratado con cemento	$E=57000*(f_c)^{0.5}$ (PSI)
	fc obtenido con AASHTO T22
Gradacion abierta tratado con cemento	No hay correlacion
Suelo - cemento	$E=1200*qu$ (PSI)
	qu obtenido con ASTM D 1633
Cal - cemento - escoria	$E=500*qu$ (PSI)
	qu obtenido con ASTM C 593
Suelo - cal	$Mr=0.124qu+9.98$ (KSI)
	qu obtenido con ASTM D 5102

Nivel 3: Valores de módulo resiliente por defecto:

Tabla 2.3.29 Módulo Elástico o Resiliente por Defecto de Materiales Estabilizados Químicamente

MATERIAL	RANGO	TIPICO
Concreto pobre	1.5E6 - 2.5E6	2E6
Agregado tratado con cemento	7E5 - 1.5E6	1E6
Gradacion abierta tratado con cemento	-	7.5E5
Suelo - cemento	5E4 - 1E6	5E5
Cal - cemento - escoria	5E5 - 2E6	1.5E6
Suelo - cal	3E4 - 6E4	4.5E4



### 2.3.3.2 Mínimo módulo en materiales estabilizados para mezclas en caliente.

La aplicación de cargas repetidas puede deteriorar los materiales estabilizados químicamente, el daño está relacionado con la magnitud y frecuencia de las cargas. Los valores que se presentan a continuación son los valores típicos aunque estos pueden ser modificados dependiendo de las condiciones locales, y se pueden aplicar a diseños nuevos, reconstrucción o rehabilitaciones.

Tabla 2.3.30 Módulo Mínimo para Materiales Estabilizados Químicamente en Pavimentos con Mezcla en Caliente

MATERIAL	MINIMO MODULO (PSI)
Concreto pobre	3E5
Agregado tratado con cemento	1E5
Gradacion abierta tratado con cemento	5E4
Suelo - cemento	2.5E4
Cal - cemento - escoria	4E4
Suelo - cal	1.5E4

### 2.3.3.3 Resistencia a tracción (para mezcla en caliente)

La vida de un material estabilizado está ligada a la Resistencia a Tracción, la cual debe ser medida a los 28 días y sirve para diseños nuevos, de reconstrucción o rehabilitación.

Tabla 2.3.31 Estimación de la Resistencia a Tracción de Materiales Estabilizados Químicamente

NIVEL	DESCRIPCION
1	Determinados con ensayos de laboratorio
2	Determinados por correlaciones
3	Valores por defecto

Nivel 1: Los valores de resistencia a tracción, serán determinados de la siguiente manera:

Tabla 2.3.32. Ensayos de Laboratorio de la Resistencia a Tracción de Materiales Estabilizados Químicamente

MATERIAL	ENSAYO
Concreto pobre	AASHTO T 97
Agregado tratado con cemento	AASHTO T 97
Gradacion abierta tratado con cemento	No aplica
Suelo - cemento	AASHTO T 97
Cal - cemento - escoria	ASTM D 1635
Suelo - cal	No aplica

**Nivel 2:** Los valores de resistencia a tracción se determina con las siguientes correlaciones:

Tabla 2.3.33 Valores por Correlaciones de la Resistencia a Tracción de Materiales Estabilizados Químicamente

MATERIAL	ENSAYO	CORRELACION
Concreto pobre	AASHTO T 22	$Mr=0.2*qu$
Agregado tratado con cemento	AASHTO T 22	$Mr=0.2*qu$
Gradacion abierta tratado con cemento	No aplica	$Mr=0.2*qu$
Suelo - cemento	AASHTO D 1633	$Mr=0.2*qu$
Cal - cemento - escoria	ASTM C 593	$Mr=0.2*qu$
Suelo - cal	ASTM D 5102	$Mr=0.2*qu$

**Nivel 3:** Valores de Resistencia a Tracción por defecto:

Tabla 2.3.34 Valores por Defecto de la Resistencia a Tracción de Materiales Estabilizados Químicamente

MATERIAL	Mr (PSI)
Concreto pobre	450
Agregado tratado con cemento	200
Gradacion abierta tratado con cemento	200
Suelo - cemento	100
Cal - cemento - escoria	150
Suelo - cal	25

#### 2.3.3.4 Relación de Poisson

Este es un parámetro requerido para diseño que se puede medir en laboratorio pero que económicamente no se justifica. Por lo anterior los valores recomendados son:

Tabla 2.3.35 Relación de Poisson de Materiales Estabilizados Químicamente

MATERIAL	RANGO DE $\mu$
Agregado tratado con cemento	0.1 - 0.2
Suelo - cemento	0.15 - 0.35
Cal - escoria	0.10 - 0.15
Suelo - cal	0.15 - 0.20

#### 2.3.3.5 Conductividad térmica

Es uno de los parámetros que controla el flujo de calor a través de la estructura del pavimento y tiene relación con los regímenes de temperatura y humedad.

Tabla 2.3.36 Estimación de la Conductividad Térmica de Materiales Estabilizados Químicamente

NIVEL	DESCRIPCION
1	Medido en laboratorio
2	No aplica
3	Valores por defecto

Nivel 1: Medido con el ensayo ASTM E 1952

Nivel 2: No aplica

Nivel 3: El coeficiente de Conductividad Térmica de Materiales Estabilizados Químicamente es 1.25 Btu / pie \* hora x °F, o se puede utilizar un valor entre 1.0 y 1.5 Btu / pie x hora x °F.

#### 2.3.3.6 Capacidad de calor

Es otro de los parámetros que controlan el flujo de calor a través de la estructura del pavimento y tiene relación con los regímenes de temperatura y humedad.

Tabla 2.3.37 Estimación de la Capacidad de Calor de Materiales Estabilizados Químicamente

NIVEL	DESCRIPCION
1	Medido en laboratorio
2	No aplica
3	Valores por defecto

Nivel 1: Medido con el ensayo ASTM D 2766

Nivel 2: No aplica

Nivel 3: El coeficiente de capacidad de calor de materiales estabilizados químicamente es 0.28 Btu / pie x °F, o se puede utilizar un valor entre 0.2 y 0.4 Btu / pie x °F.

#### 2.3.4 Materiales no conglomerados

Los modelos mecánico - empíricos necesitan diferentes datos de los materiales para la determinación de estados de esfuerzos, para los modelos de fatiga y para determinar perfiles de humedad y temperatura. Los datos necesarios para los materiales no conglomerados, se muestran a continuación en la tabla 2.3.38:

Tabla 2.3.38 Propiedades de Materiales no Conglomerado

MATERIAL	ENTRADAS NECESARIAS		
	RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA	DATOS ADICIONALES	DATOS NECESARIOS PARA EL MODELO CLIMATICO
Materiales no conglomerados (incluye capas de bases, subbases y subrasante)	Módulo resiliente (Mr)	Granulometría	Índice de plasticidad
	Relación de Poisson (μ)		Gravedad específica
	Peso unitario		Conductividad hidráulica saturada
	Coefficiente de presión lateral		Contenido óptimo de humedad

### 2.3.4.1 Módulo resiliente

Este parámetro afecta significativamente los cálculos de la respuesta del pavimento y el módulo dinámico de reacción (K), calculado internamente en el software. El módulo resiliente se determina de la siguiente manera:

Tabla 2.3.39 Estimación del Módulo Resiliente de Materiales no Conglomerados

NIVEL	DESCRIPCION
1	Determinado con ensayos de laboratorio
2	Determinado por correlaciones
3	Valores por defecto

Nivel 1: El módulo resiliente de materiales no conglomerados se determina bajo las normas NCHRP 1-28 o con AASHTO T307. Los dos (2) ensayos dan como resultado un modelo constitutivo de comportamiento que tiene la siguiente forma:

$$Mr = K1 * Pa \left( \frac{\theta}{Pa} \right)^{k2} \left( \frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{k2}$$

- Pa = Presión atmosférica
- θ = σ<sub>1</sub> + σ<sub>2</sub> + σ<sub>3</sub>
- σ<sub>1</sub> = Esfuerzo principal mayor
- σ<sub>2</sub> = Esfuerzo principal intermedio = σ<sub>3</sub> en cilindros
- σ<sub>3</sub> = Presión de confinamiento
- k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub> = constantes de regresión

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$$

Nivel 2: El módulo resiliente de los materiales no conglomerados se puede determinar por correlaciones con otros parámetros de la siguiente forma:

Tabla 2.3.40 Módulo Resiliente de Materiales no Conglomerados por Correlaciones

PARAMETRO	MODELO	ENSAYO
CBR	$Mr=2555(CBR)^{0.61}$ (PSI)	AASHTO T 493
R - valor	$Mr=1155+555R$ (PSI)	AASHTO T 190
Coeficiente $a_i$ AASHTO 93	$Mr=30000 (a_i/0.14)$ (PSI)	Guia AASHTO 2002
Gradacion y IP	$CBR=75/(1+0.728w*IP)$	AASHTO T 27 y T 90
PDC	$CBR=292/PDC^{1.12}$	ASTM D 6951

**Nivel 3:** Valores de Módulo Resiliente de Materiales no Conglomerados por defecto.

Tabla 2.3.41 Valores de Módulo Resiliente para Materiales no Conglomerados

MATERIAL	RANGO ( $M_r$ ) (PSI)	VALOR TIPICO $M_r$ (PSI)
A-1a	38500 - 42000	40,000
A-1b	35500 - 40000	38,000
A-2-4	28800 - 37500	32,000
A-2-5	24000 - 30000	28,000
A-2-6	24500 - 31000	26,000
A-2-7	21500 - 28000	24,000
A-3	24500 - 35500	29,000
A-4	24500 - 29000	24,000
A-5	17000 - 25500	20,000
A-6	13500 - 24000	17,000
A-7-5	8000 - 17500	12,000
A-7-6	5000 - 13500	8,000
CH	5000 - 13500	8,000
MH	8000 - 17500	11,500
CL	13500 - 24000	17,000
ML	17000 - 25500	20,000
SW	28000 - 37500	32,000
SP	24000 - 33000	28,000
SW-SC	24500 - 34000	25,500
SW-SM	24000 - 33000	28,000
SP-SC	24500 - 34000	25,500
SW-SM	24000 - 33000	28,000
SC	21500 - 28000	24,000
SM	28000 - 37500	32,000
GW	39500 - 42000	41,000
GP	35500 - 40000	38,000
GW-GC	28000 - 40000	34,500
GW-GM	35500 - 40500	38,500
GP-GC	28000 - 39000	34,000
GP-GM	34000 - 40000	36,000
GC	24000 - 37500	34,000
GM	33000 - 42000	38,500

Los datos también pueden obtenerse de una serie histórica de la agencia. Se debe tener cuidado con estos datos si hay presencia de un lecho rocoso cerca de la estructura.

Se ha observado que los valores propuestos en la tabla, para suelos gruesos, son el 60% al 80% de los valores obtenidos por retrocálculo en pavimentos rígidos, mientras que para los suelos finos los valores propuestos son 1.05 a 1.20 veces los retrocalculados.

#### 2.3.4.2 Relación de Poisson

Este es un parámetro requerido para diseño aunque no afecta mucho en el comportamiento del material. La relación de Poisson de materiales no conglomerados se obtienen de la siguiente manera:

Tabla 2.3.42 Estimación de la Relación de Poisson de Materiales no Conglomerados

NIVEL	DESCRIPCION
1	Determinado con ensayos de laboratorio
2	Determinado por correlaciones
3	Valores por defecto

Nivel 1: La relación de Poisson puede ser determinada con el ensayo del triaxial dinámico, pero no se justifica debido a que éste parámetro tiene poca influencia en el comportamiento del material.

Nivel 2: La relación de Poisson puede ser determinada por correlaciones con otros parámetros, pero no se recomienda. Se recomienda usar los valores que se dan en el Nivel 3.

Nivel 3: La relación de Poisson de los materiales no conglomerados son:

Tabla 2.3.43 Valores de Relación de Poisson de Materiales no Conglomerados

MATERIAL	RANGO DE $\mu$	VALOR TIPICO $\mu$
Arcilla saturada	0.40 - 0.50	0.45
Arcilla sin saturar	0.10 - 0.30	0.20
Limo - arcilla	0.20 - 0.30	0.25
Arena densa	0.20 - 0.40	0.30
Arena gruesa	0.15	0.15
Arena fina	0.25	0.25
Lecho rocoso	0.10 - 0.40	0.25

#### 2.3.4.3 Índice de plasticidad

Es la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), e indica la magnitud del rango de humedad sobre el cual el suelo está en condición plástica.

El límite plástico es el contenido de humedad que limita el estado semi - sólido y plástico de un suelo; mientras que, el límite líquido es el contenido de humedad que limita el estado plástico y el líquido de un suelo.

$$IP = LL - LP$$

El límite líquido y el límite plástico se determinan con los ensayos AASHTO T 89 y AASHTO T90, respectivamente.

#### 2.3.4.4 Gravedad específica

Se permite medirla directamente con ensayos o que el software de la guía lo calcule internamente con base en parámetros de granulometría ( $D_{60}$ ,  $P_{200}$ ,  $P_4$ ), y el IP.

#### 2.3.4.5 Conductividad eléctrica saturada

Se permite medirla directamente con ensayos o que el software de la guía lo calcule internamente con base en parámetros de granulometría ( $D_{60}$ ,  $P_{200}$ ,  $P_4$ ), y el IP.

#### 2.3.4.6 Grado de saturación

Es la porción de vacíos llenos con agua. Este parámetro es calculado internamente por el software.

#### 2.3.4.7 Coeficiente de presión lateral

Es la expresión utilizada para relacionar la presión vertical y horizontal. El coeficiente de presión lateral, se puede estimar usando los siguientes modelos:

Suelos friccionantes:

$$K_o = \frac{\mu}{1 - \mu}$$

Suelos cohesivos:

$$K_o = 1 - \text{sen}\phi$$

También se pueden usar valores típicos:

Tabla 2.3.44 Valores de Coeficiente de Presión Lateral de Materiales no Conglomerados

MATERIAL	$\Phi$	$K_o$
Roca limpia	35	0.495
Grava limpia, mezcla de grava y arena y arena gruesa	29 - 31	0.548 - 0.575
Arena media y fina limpia, grava y arena arcillosa	24 - 29	0.575 - 0.645
Arena fina o arena limosa	19 - 24	0.645 - 0.717
Arena fina con fino no plástico	17 - 19	0.717 - 0.746
Arcilla muy dura	22 - 26	0.617 - 0.673
Arcilla de mediana a dura	19	0.717

### 2.3.5 Lecho rocoso

Los modelos mecánico - empíricos necesitan diferentes datos de los materiales para la determinación de estados de esfuerzos, para los modelos de fatiga y para determinar perfiles de humedad y temperatura. Los datos necesarios para el lecho rocoso, se muestran a continuación:

Tabla 2.3.45. Propiedades del lecho rocoso

MATERIAL	ENTRADAS NECESARIAS		
	RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA	DATOS ADICIONALES	DATOS NECESARIOS PARA EL MODELO CLIMATICO
Lecho rocoso	Módulo elástico	No aplica	No aplica
	Relacion de Poisson		
	Peso unitario		

#### 2.3.5.1 Módulo de elasticidad

Una capa de lecho rocoso puede tener un impacto significativo en el comportamiento del pavimento y debe ser tenido en cuenta en el diseño, especialmente si el módulo es retrocalculado. Si la rigidez del lecho rocoso no se garantiza no se debe incorporar en el diseño. Los valores recomendados son:

Tabla 2.3.46 Modulo de Elasticidad de Lecho Rocosos

ESTADO	VALOR
Solida y bastante	Rango = 750 - 2000 KSI
	Típico = 1000 KSI
Fracturada - deteriorada	Rango = 250 - 1000 KSI
	Típico = 500 KSI



### 2.3.5.2 Relación de poisson

Este es un parámetro requerido para diseño, aunque no afecta la respuesta estructural. Los valores típicos son:

Tabla 2.3.47 Relación de Poisson de Lecho Rocoso

ESTADO	VALOR $\nu$
Sólida	Rango = 0.10 - 0.25
	Tipico = 0.15
Fracturada - deteriorada	Rango = 0.25 - 0.40
	Tipico = 0.30

## 2.4 CLIMA<sup>6</sup>

### 2.4.1 Introducción

#### 2.4.1.1 Importancia de la variable clima en el diseño.

Los efectos climáticos tienen un importante significado en el comportamiento de los pavimentos tanto flexibles como rígidos. Estos efectos son causados por factores externos tales como son: precipitación, temperatura, y nivel freático.

En una estructura de pavimento, la humedad y las temperaturas son las dos (2) variables que significativamente afectan la estructura del pavimento.

Los materiales asfálticos pueden variar en sus módulos dependiendo de la temperatura. Por ejemplo, se pueden encontrar módulos que pueden estar desde 14.000 MPa a 21.000 MPa durante el invierno, mientras que en el verano se pueden tener módulos de 700 MPa.

El contenido de humedad también tiene un papel importante, a mayor contenido de humedad menor módulo de los materiales; sin embargo la humedad tiene dos aspectos por separados:

1. Pueden afectar el estado de esfuerzos a través de la succión o presión de poro. En materiales gruesos y finos pueden incrementarse en más de una quinta parte en el módulo debido al secado de los suelos.
2. La estructura de pavimento, se puede afectar a través de la destrucción de su cimentación por el contenido de humedad entre las partículas de suelo.

#### 2.4.1.2 Efectos climáticos en el diseño.

##### Módulo Climático Integrado Mejorado (EICM).

Los cambios de temperatura y perfiles de humedad en la estructura del pavimento son considerados en la guía AASHTO 2002, a través del EICM (Enhanced Integrated Climatic Model). EICM es un modelo que acopla los resultados de flujos de calor y humedad para simular los cambios en comportamiento y características de los materiales del pavimento durante el período de diseño.

---

<sup>6</sup> Guide for Mechanistic - Empirical Design. NCHRP 1-37A. Part 2 Design Inputs, Chapter 3 Environmental Effects, March 2004.

*EICM está compuesto de tres modelos:*

1. El modelo climático - materiales - estructura (CMS MODEL), desarrollado por la Universidad de Illinois.
2. El modelo de esfuerzo de hielo y deshielo (CRREL MODEL), desarrollado por el ejército de los Estados Unidos.
3. El modelo de infiltración y drenaje (ID MODEL), desarrollado en la Universidad de Texas.

Los cambios al modelo climático EICM (Enhanced Integrated Climatic Model) por guía AASHTO 2002, fueron realizados con base al modelo simplificado ICM (Integrated Climatic Model), desarrollado por la Federal Highway Administración (FHWA).

*Las cinco (5) mejoras más relevantes del EICM en la guía AASHTO 2002, son las siguientes:*

1. El reemplazo de la curva característica suelo - agua (SWCC) de Gardner por la ecuación propuesta por Fredlund y Xing.
2. El desarrollo de estimaciones mejoradas de (SWCC), la conductividad hidráulica saturada ( $k_{sat}$ ), y gravedad específica de los sólidos ( $G_s$ ) conociendo las propiedades del suelo en su distribución de tamaños (porcentaje del pasa tamiz No 200  $P_{200}$ ), porcentaje que pasa en peso efectivo  $D_{60}$ , y el índice de plasticidad (IP).
3. Modelo de predicción de la conductividad hidráulica saturada basada en el SWCC propuesto por Fredlund en 1994.
4. La incorporación de una base de datos horarios en 800 estaciones climáticas de los Estados Unidos con parámetros de: nubosidad, lluvias, velocidad del viento, temperatura del aire, y humedad relativa.
5. La introducción del algoritmo para la estimación de la gravedad específica de los sólidos ( $G_s$ ) y la conductividad hidráulica saturada ( $k_{sat}$ ); estos pueden utilizarse en casos cuando  $G_s$  y  $k_{sat}$  no se puedan estimar en el campo o evaluar en el laboratorio (Nivel 2). El  $G_s$  y el  $k_{sat}$  son estimaciones que se encuentran en función del  $P_{200}$ , IP y el  $D_{60}$ .

*Consideraciones climáticas en los pavimentos flexibles:*

1. Proporcionar al diseñador las condiciones iniciales de módulo resiliente en las capas del pavimento. Generalmente con un contenido de agua óptimo y máximo peso unitario.
2. Evaluar los cambios esperados en los volúmenes de humedad desde sus condiciones iniciales o de equilibrio, teniendo en cuenta las variaciones de las estaciones climáticas.

3. Evaluar los efectos por cambios en el contenido de humedad con respecto a la condición de referencia o módulo de resiliencia  $M_r$ .
4. Utilizar los cambios del módulo resiliente  $M_r$  en función del tiempo para el cálculo de acumulación de daños.
5. Evaluar los cambios de temperatura como función del tiempo en la carpeta asfáltica.

Uno de los importantes reportes del EICM para pavimentos flexibles y rígidos es el factor de ajuste de las capas de los pavimentos por efectos climáticos ( $F_{env}$ ), en los contenidos de humedad.

El factor  $F_{env}$ , varia con la posición dentro de la estructura del pavimento y en el tiempo del período de análisis; es un coeficiente que se multiplica por el  $M_r$  óptimo para obtener el módulo en función del tiempo y posición.

#### 2.4.1.3 Resultados del EICM

EICM describe dos (2) factores (Internos y Externos), factores externos tales como por ejemplo módulo de respuesta o predicción estructural y factores internos tales como profundidad del nivel freático, información climática del sitio del proyecto.

En los factores internos, EICM determina los valores de contenido volumétrico de agua  $\theta_w$ , y temperatura en cada posición con el tiempo. El valor de  $\theta_w$  es dividido por el contenido volumétrico saturado de agua  $\theta_{sat}$  para calcular el grado de saturación  $S$ .

En los factores externos, se ajusta el módulo resiliente como función de la posición y el tiempo  $F_{env}$ , compuesto por valores de  $F_F$ ,  $F_R$ ,  $F_U$  en cada nodo. Estos factores son mencionados más adelante en función del tiempo y la posición. Temperaturas en la superficie y en la mitad de las capas de la estructura del pavimento para cada periodo de análisis (1 mes o 2 semanas). Estadísticamente, La media y la desviación estándar hacen parte de la predicción del modelo de deformación permanente y los valores de temperatura horaria en la superficie y a profundidades de cada pulgada.

#### 2.4.2 Parámetros de entrada para el modelo clima.

Las entradas necesarias para el modelo climático son las siguientes:

##### 2.4.2.1 Información general

*Mes y año en que se terminó la construcción Base / Subrasante:* Esta entrada se requiere en el diseño de pavimentos flexibles, para que el modelo EICM

determine la humedad en los materiales desde los volúmenes de humedad iniciales u óptimos hasta un valor de equilibrio. Si la diferencia de tiempo entre el mes de la construcción y operación del tránsito es 2 años y el diseño del pavimento es de 20 años, el período de análisis se realizará a 22 años.

*Mes y año de construcción del pavimento existente:* Sólo se requiere para rehabilitación de pavimentos.

*Mes y año de la construcción del pavimento:* Este parámetro ayuda a determinar la rigidez y resistencia de la capa asfáltica.

*Mes y año de operación del tránsito:* Es el mes que se espera la operación del tránsito después de su construcción. Este valor define las condiciones climáticas en el momento de operación en el cual se relacionan los gradientes de temperatura y módulos de las capas incluyendo la subrasante.

*Tipo de diseño del pavimento:* Determina los tipos de entradas requeridos para el análisis, según la estructura de pavimento seleccionada por el diseñador (pavimento nuevo o rehabilitado, flexible o rígido). El software automáticamente selecciona los parámetros iniciales para el modelo climático, los modelos de deterioro, los tipos de salidas, y así sucesivamente.

#### 2.4.2.2 Información climática

Para lograr el análisis climático solicitado en la acumulación incremental de daños, se requieren los siguientes cinco (5) parámetros:

*Temperatura del aire horaria:* Se requiere por la ecuación de balance térmico en el modelo EICM para el cálculo de radiaciones de onda larga emitidas por el aire y la transferencia de calor desde la superficie del pavimento.

*Precipitación horaria:* La precipitación e infiltración en la estructura del pavimento, no han sido considerados en las condiciones límites de flujo de calor. El papel de la precipitación bajo estas circunstancias no está completamente claro, y no se ha intentado realizar métodos para incorporarlo en el equilibrio de energía. Sin embargo la precipitación se necesita para calcular la infiltración, en pavimentos rehabilitados y envejecidos.

*Velocidad del viento horaria:* Se requiere en los cálculos, para el coeficiente de transferencia de calor en la superficie del pavimento. Ambos cálculos se describen en detalle más adelante.

*Porcentaje de nubosidad horaria:* Se requiere para el cálculo de balance de calor en la superficie del pavimento, con mayor detalle se explicará más adelante.

*Humedad relativa horaria:* Este parámetro causa gran impacto en los pavimentos rígidos, en el agrietamiento de las losas.

#### 2.4.2.3 Nivel freático

Para el Nivel 1, podría determinarse el perfil característico. En el Nivel 3, se necesita una estimación del valor medio anual.

#### 2.4.2.4 Drenaje

*Absorción de onda corta:* Esta entrada pertenece a las capas de concreto asfáltico y concreto hidráulico. La absorción de onda corta en la superficie depende de su composición, color, y textura, y se correlaciona directamente con la cantidad de energía solar disponible que absorbe la superficie del pavimento. En el nivel 1, se recomienda que este parámetro se determine en el laboratorio. Sin embargo, aunque hay procedimientos para medir la absorción de la onda corta, actualmente no hay ninguna norma certificada AASHTO.

En el nivel 2, no aplica.

En el nivel 3, pueden asumirse valores predefinidos por varios materiales del pavimento como sigue:

- Asfalto curado (gris) 0.80-0.90
- Asfalto Fresco (negro) 0.90-0.98
- Concreto Portland PCC 0.70-0.90

*Infiltración:* Este parámetro define, el potencial de infiltración de un pavimento en el período de diseño. La guía AASHTO 2002, recomienda la siguiente clasificación:

*Menor* (10% de la infiltración penetra en el pavimento); esta opción se recomienda en pavimentos rígidos de calzadas y bermas de concreto hidráulico o en pavimentos flexibles monolíticos en su ancho (bermas más calzada). Esta opción es aplicable cuando en el pavimento existan filtros o drenajes en la estructura de pavimento.

*Moderado* (50% de la infiltración penetra en el pavimento); esta opción es válida para todo tipo de bermas, restauración en concreto hidráulico, refuerzo en concreto asfáltico, carpetas existentes envejecidas o agrietadas.

*Alto* (100% de la infiltración penetra en el pavimento); generalmente no se usa en pavimentos nuevos o en diseños de rehabilitación.

### 2.4.2.5 Propiedades de la estructura del pavimento

*Espesores de las capas:* El modelo EICM, subdivide los espesores de la estructura del pavimento internamente para realizar los cálculos de humedad y perfiles de temperatura, por ejemplo la capa base granular, el software automáticamente la subdivide en dos (2) subcapas como mínimo, para obtener mayor precisión en los cálculos.

*Propiedades del material asfáltico:* Las propiedades de los materiales asfálticos que se necesitan en los cálculos del modelo EICM son los siguientes:

- Absorción de la onda corta: Esta se explicará más adelante.
- La conductibilidad térmica K: Es la cantidad de calor que normalmente fluye por una área de superficie, en una unidad de tiempo y por la unidad de temperatura.
- La capacidad térmica Q, es la cantidad de energía para cambiar la temperatura de una masa unitaria por un grado.

Tabla 2.4.1 Parámetros de entrada del concreto asfáltico para EICM

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	NIVEL	DESCRIPCION
Conductividad térmica, K	1	Es recomendable para este nivel medirla directamente (ASTM E 1952)
	2	No aplica
	3	El diseñador selecciona valores típicos basados en datos históricos, para el concreto asfáltico desde 0.44 a 0.81 Btu/(ft)(h)(°F)
Capacidad térmica, Q	1	Es recomendable para este nivel medirla directamente (ASTM D 2766)
	2	No aplica
	3	El diseñador selecciona valores típicos basados en datos históricos, para el concreto asfáltico desde 0.22 a 0.40 Btu/(ft)(h)(°F)

*Propiedades de los materiales granulares:* Los parámetros que interesan en esta categoría son la máximo peso unitario seco ( $\gamma_d$  máx.), gravedad específica ( $G_s$ ), y contenido de humedad óptimo ( $w_{opt}$ ). Con estas tres (3) entradas, todos los otros parámetros pueden calcularse, incluso el grado de saturación inicial,  $S_{opt}$ , el contenido de agua volumétrica óptima,  $\theta_{opt}$ , y, el contenido de agua óptimo volumétrico saturado  $\theta_{opt}$ . Estos cálculos los hace internamente el software de la AASHTO 2002 y son parte de las salidas internas del modelo EICM. La tabla 2.4.2 describe el procedimiento para obtener los parámetros de entrada para materiales compactados. El nivel 1 requiere  $\gamma_{dmáx}$ ,  $w_{opt}$ , y  $G_s$  medidos en el

laboratorio según las normas estándar de cada capa. Si no es posible medirlas en el laboratorio, se pueden adoptar valores de  $P_{200}$ ,  $D_{60}$ , y IP (nivel 2). Con estos parámetros EICM calcula internamente  $S_{opt}$ ,  $\theta_{opt}$ .y  $\theta_{sat}$ . usando las siguientes ecuaciones:

$$\theta_{opt} = \frac{W_{opt} \times \gamma_{d \max}}{\gamma_{water}}$$
$$S_{opt} = \frac{\theta_{opt}}{1 - \frac{\gamma_{d \max}}{\gamma_{water} \times G_s}}$$
$$\theta_{opt} = \frac{W_{opt} \times \gamma_{d \max}}{\gamma_{water}}$$



Tabla 2.4.2 Parámetros de entrada del concreto asfáltico para EICM

PROPIEDAD DE LOS MATERIALES	NIVEL	DESCRIPCIÓN
Gravedad específica $G_s$	1	Medida directamente AASHTO T100 (realizado junto con las pruebas de consolidación - AASHTO T180 para bases o AASHTO T 99 para otras capas).
	2	Determinar $P_{200}$ y IP de las capas subyacentes: 1. Determinar $P_{200}$ y IP. 2. Calcular $G_s$ : $G_s = 0.041(P_{200} * IP)^{0.29} + 2.65$
	3	No aplica.
Contenido de agua óptimo de los sólidos, $w_{opt}$ , y máximo peso unitario $\gamma_{dmax}$	1	Típicamente, AASHTO T180 Para bases compactadas y AASHTO T99 compactación de otras capas.
	2	Determinar $D_{60}$ , $P_{200}$ y IP de las capas subyacentes :  1. Mida IP, $P_{200}$ , y $D_{60}$ . Identifique las capas de base, subbase y subrasante natural.  2. Calcular $S_{opt}$ : $S_{opt} = 6.752 (P_{200} * IP)^{0.147} + 78$ 3. Compute $w_{opt}$ : Si $P_{200} * IP > 0$ $w_{opt} = 1.3 (P_{200} * IP)^{0.73} + 11$ Si $P_{200} * IP = 0$ $w_{opt(T99)} = 8.6425 (D_{60})^{-0.1038}$  Si no es una base $w_{opt} = w_{opt(T99)}$  Si es una base $\Delta w_{opt} = 0.0156[w_{opt(T99)}]^2 - 0.1465w_{opt(T99)} + 0.9$ $w_{opt} = w_{opt(T99)} - \Delta w_{opt}$  4. Obtenga $G_s$ referido en el nivel 2 5. Calcule $\gamma_{dmax}$ para materiales compactados $\gamma_{dmax comp}$ 6. Si es un material compactado  7. Calcule $\gamma_{dmax}$ Si es una capa natural in situ $\gamma_{dmax comp} = \frac{G_s \times \gamma_{water}}{1 + \frac{w_{opt} \times G_s}{S_{opt}}}$  8. EICM use $\gamma_d$ para $\gamma_{dmax}$
	3	No aplica

Tabla 2.4.3 Parámetros de Entrada para Materiales Compactados para EICM  
- Conductividad Hidráulica Saturada  $K_{sat}$  -

PROPIEDAD DE MATERIALES	NIVEL	DESCRIPCIÓN
Conductividad hidráulica saturada, $k_{sat}$	1	Medida directamente (AASHTO T215) es recomendado este nivel
	2	<p>Determinar <math>P_{200}</math>, <math>D_{60}</math>, y IP de las capas subyacentes:</p> <p>1. Determine <math>P_{200}</math> <math>IP = P_{200} * IP</math></p> <p>2. Si <math>0 \leq P_{200} PI &lt; 1</math> (ft/h)  <math>K_{sat} = 18.11 \times 10^{[-1.1273(\log D_{60} + 2)^2 + 7.2816(\log D_{60} + 2) - 11.2891]}</math> (ft/h)</p> <p>Valido para <math>D_{60} &lt; 0.75</math> in</p> <p>Si <math>D_{60} &gt; 0.75</math> in, entonces <math>D_{60} = 0.75</math> mm</p> <p>3. Si <math>P_{200} PI \geq 1</math> (ft/h)  <math>K_{sat} = 118.11 \times 10^{[0.0004(P_{200} * IP)^2 - 0.0929(P_{200} * IP) - 6.56]}</math> (ft/h)</p>
	3	No aplica.

$P_{200}$  y  $D_{60}$  pueden ser obtenidos de las gradaciones del material (AASHTO T 27).

<sup>2</sup> IP puede ser estimado de acuerdo a los límites de Atterberg (AASHTO T 90).

Tabla 2.4.4 Parámetros de entrada para materiales compactados para EICM  
- conductividad térmica seca K y capacidad de calor Q -

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	NIVEL	DESCRIPCIÓN		
Conductividad térmica seca, K	1	Medida directamente es recomendado este nivel (ASTM E1952).		
	2	No aplica		
	3	<i>Tipo de suelo rangos recomendados</i>		
		<i>Btu/(ft)(h)(°F)</i>		
		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 - 0.23	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		
A-7-6	0.09 - 0.17	0.12		
Capacidad de calor seca Q	1	Medida directamente es recomendado este nivel (ASTM D2766).		
	2	No aplica.		
	3	<p>Valores basados en datos históricos rango de datos :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Valores tipicos rango 0.17 to 0.20 Btu/(lb)(°F).</li> </ul>		

- Parámetros de la curva características suelo - agua (SWCC).

SWCC se define como la relación entre contenido de agua y succión del suelo. La tabla 2.4.5 muestra los parámetros característicos del SWCC para cada nivel jerárquico, para obtener parámetros de Fredlund y la ecuación de Xing para índice de suelos.

Tabla 2.4.5 Opciones para estimar los parámetros de SWCC

NIVEL	PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS DE SWCC	ENSAYO
1	<p>1) Medida directamente de la succión (h) en psi, y contenido de agua volumétrica (<math>\theta_w</math>)</p> <p>2) Medida directamente el contenido de agua óptima, <math>w_{opt}</math> y máxima densidad seca, <math>\gamma_{d,max}</math>.</p> <p>3) Medida directamente de la gravedad de los sólidos, <math>G_s</math></p> <p>4) Calcule <math>\theta_{opt}</math></p> <p>5) Calcule el <math>S_{opt}</math></p> <p>6) Calcule <math>\theta_{sat}</math></p> <p>7) Basado en análisis de regresión lineal, calcule los parámetros del modelo SWCC <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 el (<math>h</math>, <math>\theta_w</math>) pares de valores calculados anteriormente en 1.</p> $\theta_w = C(h) \times \left[ \frac{\theta_{sat}}{\ln \left[ \ln \left[ \exp(1) + \left( \frac{h}{a_f} \right)^{b_f} \right] \right]^{c_f}} \right]$ $C(h) = \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{h}{h_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{1.45 \times 10^5}{h_r} \right)} \right]$ <p>8) Entrada <math>a_f</math> (psi), <math>b_f</math>, <math>c_f</math>, y <math>h_r</math> (psi) en el software de la nueva guía AASHTO 2002.</p> <p>9) EICM generará la función a cualquier volumen de agua (SWCC).</p>	<p>AASHTO T180 o AASHTO T99 para <math>\gamma_{d,max}</math>.</p> <p>AASHTO T100 para <math>G_s</math>.</p>

<p>2</p>	<p>1) Medida directamente el contenido óptimo de agua, <math>w_{opt}</math> y máximo peso unitario <math>\gamma_{dmax}</math>.</p> <p>2) Medida directamente de la gravedad de los sólidos <math>G_s</math>.</p> <p>3) Medida directamente de <math>P_{200}</math>, <math>D_{60}</math>, y PI.</p> <p>4) El EICM hará internamente lo siguiente:</p> <p>a) Calculará <math>P_{200} \cdot PI</math>.</p> <p>b) Calculará <math>\theta_{opt}</math>, <math>S_{opt}</math>, y <math>\theta_{sat}</math> como se describió en el nivel 1.</p> <p>c) Basado en un análisis de regresión no lineal, el EICM calculará con los parámetros <math>a_f</math>, <math>b_f</math>, <math>c_f</math>, y <math>h_r</math> usando correlaciones como <math>P_{200}</math>, PI y <math>D_{60}</math>.</p> <p><math>P_{200} \times IP &gt; 0</math></p> $a_f = \frac{0.00364 \times (P_{200} \times IP)^{3.35} + 4 \times (P_{200} \times IP) + 11}{6.895}, (psi)$ $\frac{b_f}{c_f} = -2.313 \times (P_{200} \times IP)^{0.14} + 5$ $c_f = 0.0514 \times (P_{200} \times IP)^{0.465} + 0.5$ $\frac{h_r}{a_f} = 32.44e^{0.0186(P_{200})}$ <p><math>P_{200} \times IP = 0</math></p> $a_f = \frac{0.8627 \times (D_{60})^{-0.751}}{6.895}, (psi)$ $b_f = 7.5$ $c_f = 0.1772 \times \ln(D_{60}) + 0.7734$ $\frac{h_r}{a_f} = \frac{1}{D_{60} + 9.7e^{-4}}$ <p>d) El SWCC que usa internamente Fredlund y Xing en el nivel 1.</p>	<p>AASHTO T180 o AASHTO T99 para <math>\gamma_{dmax}</math>.</p> <p>AASHTO T100 para <math>G_s</math>.</p> <p>AASHTO T27 para <math>P_{200}</math> y <math>D_{60}</math>.</p> <p>AASHTO T90 para IP.</p>
<p>3</p>	<p>Medida directamente de <math>P_{200}</math>, PI, y <math>D_{60}</math>, después que EICM usa correlaciones con <math>P_{200}</math>, PI y <math>D_{60}</math> automáticamente genera SWCC parámetros para cada suelo, tal como sigue:</p> <p>1) Identifica la capa como base u otra capa</p> <p>2) Calcula <math>G_s</math> como en la tabla 2.3.3 para el nivel 2.</p> <p>3) Calcule <math>P_{200} \cdot PI</math></p> <p>4) Calcule <math>S_{opt}</math>, <math>w_{opt}</math>, y <math>\gamma_{dmax}</math> conocido por el nivel 2</p> <p>6) Basado en un análisis de regresión no lineal, el EICM calculado en el modelo SWCC parámetros <math>a_f</math>, <math>b_f</math>, <math>c_f</math>, y <math>h_r</math> usando correlaciones como <math>P_{200}</math>, PI y <math>D_{60}</math>, conocido en el nivel 2.</p> <p>7) El SWCC usando internamente Fredlund y la ecuación de Xing conocida en el nivel 1.</p>	<p>T27 para <math>P_{200}</math> y <math>D_{60}</math>.</p> <p>T90 para IP.</p>

*Propiedades de los materiales de subrasante:* En la tabla 2.4.6, se presentan los parámetros de entrada para los materiales naturales o in situ para el cálculo del modelo climático EICM.

Tabla 2.4.6 Entradas para materiales de subrasante para EICM

PROPIEDADES	PROCEDIMIENTO
Gravedad específica, $G_s$	No requiere medida directamente (Nivel 1). La tabla 2.4.2 estima los parámetros desde su gradación (Nivel 2).
Conductividad hidráulica saturada, $k_{sat}$	No requiere medida directamente (Nivel 1). La tabla 2.4.3 estima los parámetros desde su gradación (Nivel 2).
Máximo peso unitario, $\gamma_{dmax}$	No requiere medida directamente (Nivel 1). La tabla 2.4.2 estima los parámetros desde su gradación (Nivel 2).
Conductividad térmica seca, K Capacidad seca, Q	Medida directamente por defecto en la tabla 2.4.2 rango razonables de valores.
Índice de plasticidad, PI	Medida directamente en la norma AASHTO T 90.
$P_{200}, P_4, D_{60}$	Medida directamente en la norma AASHTO T 27.
Contenido de agua óptima, $w_{opt}$	No requiere, se encuentra referida en la tabla 2.4.2.
Contenido de agua de equilibrio	La medida directa se requiere para el análisis de rehabilitación de pavimentos. Este parámetro no se requiere para el análisis de pavimentos nuevos.

## 2.4.3 Cálculo EICM - factor clima para ajustar al módulo resiliente-

### 2.4.3.1 Factor de ajuste climático $F_{env}$ .

Para evaluar el módulo resiliente ( $M_r$ ), influyen varios factores que necesitan ser considerados:

- Estado de esfuerzo.
- Las variaciones de humedad y densidad.

El estado de esfuerzos del  $M_r$  en las capas granulares es considerado a través de la ecuación constitutiva que relaciona el módulo resiliente de los invariantes de tensiones, esfuerzos octohedrales y presiones atmosférica. La guía AASHTO 2002, considera para el nivel 1, la sensibilidad de esfuerzos de las capas granulares, en el diseño de pavimentos flexibles. En el nivel 2, se estima el  $M_r$  de acuerdo a sus condiciones óptimas de humedad y máximo peso unitario, y es posible entrar con otros parámetros como el CBR o coeficientes estructurales ( $a_i$ ). En el nivel 3 es suficiente estimar el módulo resiliente  $M_R$ .

Aunque la sensibilidad de esfuerzo sólo es considerada en el nivel 1, el impacto de las variaciones de humedad y temperatura en el  $M_R$  se considera a través del factor de ajuste climático  $F_{env}$ . El modelo EICM considera los factores de humedad del suelo, succión y temperatura en función del tiempo y posición de los materiales, la cual se determina a través del factor  $F_{env}$ . El módulo resiliente  $M_R$  en función del tiempo y posición, es expresado de la siguiente manera:

$$M_R = F_{env} * M_{Ropt}$$

El factor  $F_{env}$  es el factor de ajuste y el  $M_{Ropt}$  es el módulo en condiciones óptimas (máximo peso unitario seco y contenido de humedad óptima).

#### 2.4.3.2 Efectos climáticos en el $M_R$ .

El modelo que adoptó la guía AASHTO 2002, se presenta a continuación.

$$\text{Log} \frac{M_R}{M_{Ropt}} = a + \frac{b - a}{1 + \text{EXP}(\ln \frac{-b}{a} + Km \times (S - S_{opt}))}$$

- $M_R/M_{Ropt}$  = Relación de módulo resiliente;  $M_R$  es el módulo resiliente en un momento dado y  $M_{Ropt}$  es el módulo resiliente de referencia.
- a = Mínimo valor de  $\log (M_R/ M_{Ropt})$ .
- b = Máximo valor de  $\log (M_R/ M_{Ropt})$ .
- $k_m$  = Parámetro de regresión.
- ( $S-S_{opt}$ ) = La variación en el grado de saturación expresado en el decimal.

Tabla 2.4.7 valores de a, b y  $K_m$  para materiales gruesos y finos.

PARÁMETROS	MATERIALES DE SUELO GRUESO	MATERIALES DE SUELO FINO	COMENTARIOS
a	- 0.3123	-0.5934	Parámetros de regresión.
b	0.3	0.4	Conservadoramente, corresponden a las proporciones de módulos de 2 y 2.5, respectivamente.
$k_m$	6.8157	6.1324	Parámetros de regresión

*Condiciones óptimas de referencia e iniciales para el  $M_r$ :* Las razones de evaluar las condiciones óptimas e iniciales del  $M_r$ , son las siguientes:

- La mayoría de pruebas de módulo resiliente se les realiza a muestras en condiciones óptimas ( $\gamma_d = \gamma_{dmax}$ ,  $w = w_{opt}$  y  $S = S_{opt}$ ). Sin embargo, la

condición óptima del  $M_{R_{opt}}$  de la base de datos crecerá rápidamente en el tiempo.

- Es común que los contratistas compacten las bases granulares a por lo menos 95% de  $\gamma_{dmax}$  según norma AASHTO T180 (modificada) y otras capas por 95% por la norma AASHTO T99 (estándar). Ósea que la compactación típicamente designada sobre el mínimo requerido, compactación de campo  $\gamma_d = \gamma_{dmax}$  es una aproximación como condición de referencia. El contenido de humedad es raramente controlado estrictamente por la especificación, pero la práctica de buenas construcciones les obliga a los contratistas a que lleven el material cerca al óptimo para facilitar la compactación. Así  $w = w_{opt}$  y  $S = S_{opt}$  también son medidas razonables para condiciones de referencia, aunque el contenido de humedad de compactación en campo puede variar por encima o por debajo del óptimo.

Las condiciones de referencia e inicial, son ambas razonables y prácticas. La densidad de compactación y humedad pueden medirse en varios puntos específicos de la estructura, después de la construcción, sin embargo es necesario en el diseño del pavimento.

Si la compactación  $S_{opt}$  es supuesto, entonces es normal que  $S$  crezca o decrezca con el tiempo a un valor de equilibrio  $S_{equil}$ , tal como se muestra en la figura 2.4.1 o 2.4.2. El modelo EICM calcula el valor de  $S_{equil}$  usando la profundidad del nivel freático,  $\gamma_{GWT}$ , y la curva característica de suelo - agua, SWCC. Este valor de  $S_{equil}$  no depende del valor inicial de saturación  $S$ , si la saturación inicial  $S_0$  es más alto que el  $S_{opt}$  como se puede observar en la figura 2.4.1 o más bajo que el  $S_{opt}$  como se muestra en la figura 2.4.2 la trayectoria busca a  $S_{equil}$ . Ese cambio de  $S_{opt} - S_{equil}$  es de gran importancia en el diseño, y el procedimiento para valorar este cambio es el siguiente:

1. Estime o mida el  $M_R$  a las condiciones óptimas para conseguir  $M_{R_{opt}}$ .
2. Estime o mida el  $S_{opt}$ .
3. Use el modelo EICM para calcular el  $S_{equil}$
4. Use  $(S_{opt} - S_{equil})$  para evaluar el cambio en el  $M_R$  desde la condición de referencia ( $M_{R_{opt}}$ ) al final, a condiciones de equilibrio ( $M_{Requil}$ ).

El procedimiento más exacto es iniciar en  $S_0$  hasta llegar a  $S_{equil}$  pero se considera injustificado ya que la duración  $S_{opt} - S_{equil}$  es considerada relativamente corta de  $t_{equil}$  y además no produce ningún error significativo en el cálculo de acumulación de daños en el diseño del pavimento.

Figura 2.4.1 Variación del grado de saturación con el tiempo.

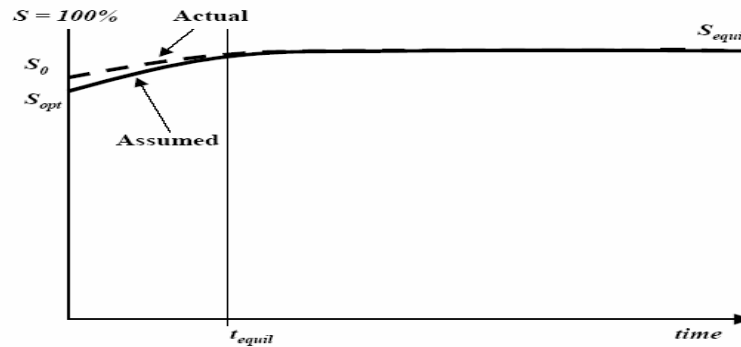
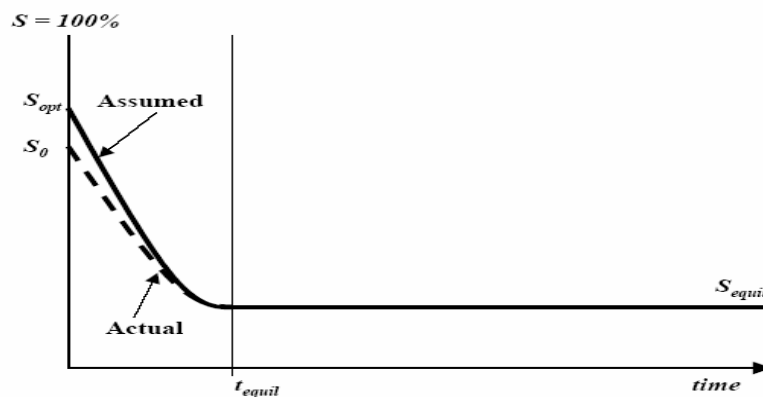


Figura 2.4.2 Variación de del grado de saturación con el tiempo



### 2.4.3.3 Calculo del factor de ajuste climático $F_{env}$ .

El módulo resiliente  $M_R$  en función del tiempo y posición es determinado como el producto del factor de ajuste climático,  $F_{env}$  y modulo resiliente en condiciones óptimas.

$$M_R = F_{env} * M_{Ropt}$$

El factor de ajuste climático  $F_{env}$  representa en general, un promedio pesado de los factores climáticos que se pueden presentar, en cada capa estructural del pavimento.

- FF: Factor para materiales bajo condiciones climáticas de heladas.
- FR: Factor de recuperación de los materiales que estuvieron bajo condiciones de heladas.
- FU: Factor para materiales normales, que no están expuestos a congelamientos.

La metodología para estimar el factor de ajuste climático se realiza para todos los (tres) 3 niveles de jerarquía, a cada nodo y a cada capa.



- A cada nodo: En el modelo EICM, la estructura del pavimento se subdivide en una serie de nodos, en que los valores de humedad, succión, y temperatura están calculados en cualquier tiempo t.
- Para cada capa (base, subbase, subrasante): El cálculo del factor de ajuste climático es útil cuando el material en una capa se encuentra todo en el mismo estado (descongelado o recuperado). Esto es debido ya que los factores de ajuste varían de nodo a nodo (por humedad o succión) y es necesario tener un factor equivalente en toda la capa.
- Los cálculos para encontrar  $F_{env}$ , son internamente realizados dentro del software de la nueva guía AASHTO 2002.
- Factores de ajustes a nivel del nodo: El cálculo de los factores de ajustes para cada caso específico (congelamiento, descongelamiento, normal), a nivel de cada nodo son los siguientes:

$F_F$  “Factor de ajuste para materiales en congelamiento”

Este parámetro se calcula según el procedimiento de la tabla 2.4.8.

$F_R$  “Factor de ajuste para materiales en recuperación”

En la tabla 2.4.9 se presenta el procedimiento para estimar este parámetro.

$F_U$  “Factor de ajuste para materiales para materiales que no se congelan”

La tabla 2.4.10 presenta el procedimiento implementado para estimar el factor  $F_U$ .

Tabla 2.4.8 Resumen de cálculos realizados por el EICM para determinar el factor de ajuste para materiales en congelamiento,  $F_F$ .

PASO NO.	DESCRIPCIÓN
1	Obtenga $P_{200}$ , IP, y $D_{60}$ , y calcule $P_{200} * IP$ .
2	Obtenga una estimación del valor $Mr_{opt\_est}$ (use esta entrada). $Mr_{opt}$ médalo directamente o estímelo con propiedades de la ingeniería como CBR, coeficientes estructurales ( $a_i$ ), índice de penetración, o mediante los parámetros de gradación del material, anotados anteriormente.
3	Asigne valores para el módulo resiliente congelado, $Mr_{frz}$ a) Si $P_{200} * IP = 0$ $Mr_{frz} = 2.5 \times 10^6$ psi b) Si $P_{200} * IP > 0$ $Mr_{frz} = 1 \times 10^6$ psi
4	Calcule el factor de ajuste por congelamiento, $F_F$ $F_F = \frac{Mr_{frz}}{Mr_{opt\_est}}$

Tabla 2.4.9 Resumen de Cálculos Realizados por el EICM para Determinar el Factor de Ajuste para Materiales en Recuperación, FR.

PASO NO.	DESCRIPCIÓN
1	Use parámetros de gradación $P_{200}$ , $P_4$ , IP, y $D_{60}$ estime la profundidad de la tabla de agua, $y_{GWT}$ . Calcule $P_{200} * IP$ .
2	<p>Calcule, RR:</p> <p><math>\Delta t</math> = Número de horas desde que empezó a deshelar</p> <p><math>T_R</math>, período de recuperación es una función de los materiales:</p> <p><math>T_R = 90</math> días para arenas/gravas con <math>P_{200} * IP &lt; 0.1</math>;</p> <p><math>T_R = 120</math> días para limos/arcillas con <math>0.1 &lt; P_{200} * IP &lt; 10</math>; y,</p> <p><math>T_R = 150</math> días para arcillas con <math>P_{200} * PI &gt; 10</math>.</p>
3	Calcule $S_{opt}$ Como se realizó en la tabla 2.3.3 para el nivel 2 o en la ecuación 2.3.2 para el nivel 1.
4	<p>Calcule <math>S_{equil}</math> desde el SWCC:</p> $S_{equil} = C(h) \times \left[ \frac{1}{\ln \left[ \ln \left[ \ln \left[ \ln \left[ \ln \left( 1 + \left( \frac{h}{a_f} \right)^{b_f} \right) \right] \right] \right] \right] \right]^{a_f}}$ $C(h) = 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{h}{h_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{1.45 \times 10^5}{h_r} \right)}$ <p><math>h = y_{GWT} * \gamma_{water}</math>, en psi</p> <p><math>a_f</math> (psi), <math>b_f</math>, <math>c_f</math>, y <math>h_r</math> (psi) son calculados en la tabla 2.3.6.</p>
5	<p>Calcule el valor de <math>R_{equil}</math>:</p> $\text{Log} R_{equil} = \text{Log} \frac{M_R}{M_{Ropt}} = a + \frac{b - a}{1 + \text{EXP} \left( \ln \frac{-b}{a} + K_m \times (S - S_{opt}) \right)}$ <p><math>a</math>, <math>b</math>, y <math>k_m</math> son constantes de la tabla 2.3.8.</p>
6	Calcule el valor RF como función de IP, $P_4$ , y $P_{200}$ desde la tabla 2.3.9 y 2.3.10.
7	<p>Calcule el factor de recuperación del material, <math>F_R</math>:</p> <p>Si <math>(S_{equil} - S_{opt}) &lt; 0</math>:</p> <p><math>F_R = RF + R_{equil} * RR - RR * RF</math></p> <p>Si <math>(S_{equil} - S_{opt}) &gt; 0</math>:</p> <p><math>F_R = R_{equil} (RF + RR - RR * RF)</math></p>

Tabla 2.4.10 Resumen de cálculos realizados por el EICM para determinar el factor de ajuste para materiales en descongelamiento o total recuperación, FU.

PASO NO.	DESCRIPCIÓN
1	Calcule $S_{opt}$ como se realizó en la tabla 2.3.3 para el nivel 2 o en la ecuación 2.3.2 para el nivel 1.
2	<p>Calcule el factor de ajuste para descongelamiento o total recuperación, <math>F_U</math></p> $\text{Log}F_U = \text{Log} \frac{M_R}{M_{Ropt}} = a + \frac{b - a}{1 + \text{EXP}(\ln \frac{-b}{a} + Km \times (S - S_{opt}))}$ <p>a, b, y <math>k_m</math> son constantes de la tabla 2.3.8. S grado de saturación estimado en cada nodo.</p>

Estos factores ayudan a visualizar los cambios posibles en  $M_R$  ocasionados por los cambios físicos con el tiempo, un diagrama de tiempo y profundidad para una estructura típica, tal como se presenta en la figura 2.4.3, en la cual se muestran los tres (3) posibles estados de un material.

La solución al problema de generar un factor de ajuste climático  $F_{env}$ , consiste en ir construyendo una matriz que tenga los elementos de ajuste al  $M_R$  en cada nodo y tiempo, teniendo en cuenta un número de filas igual al número de columnas y al intervalo de tiempo considerada en el período de análisis (periodo de 2 semanas o 1 mes).

La matriz corresponde al diagrama de tiempo profundidad. En la figura 2.4.3, se muestra un ejemplo numérico con valores de  $F_F$ ,  $F_R$ , y  $F_U$  los cuales son evaluados en cada nodo/tiempo y sus símbolos son reemplazados numéricamente.

Una vez la matriz de factores de ajuste se establece, se subdivide de la siguiente manera:

En las capas, corresponde cada capa estructural definida por el diseñador (base, subbase, subrasante).

En las subcapas, definidas por el modelo EICM, mínimo dos (2) subcapas por capa de pavimento. A mayor número de capas mayor precisión.

Para cada periodo de análisis (2 semanas o 1 mes), una submatriz de factores ajustados de módulos resiliente es asignada a cada subcapa.



Un factor de ajuste climático,  $F_{env}$ , para considerar una subcapa (submatriz) puede expresarse de la siguiente manera:

$$F_{env} = \frac{h_{total} \times t_{total}}{\sum_{t=1}^{t_{total}} \left( \sum_{node=1}^n \left( \frac{h_{node}}{F_{node,t}} \right) \right)}$$

$F_{env}$  = Factor de ajuste que considera las subcapas

$F_{nodo,t}$  = Factor de ajuste de un nodo y tiempo (puede ser  $F_F$ ,  $F_R$ , o  $F_U$ , dependiendo del estado del material).

$h_{total}$  = Altura total de la capa o subcapa considerada.

$t_{total}$  = Tiempo total sobre el módulo compuesto (número de columnas en la matriz). Para el uso en el EICM, cada incremento de tiempo se ha puesto a 1 hora.

$h_{nodo}$  = Longitud del nodo en consideración.

Como ejemplo,  $F_{env}$ , se calcula para la base y subbase en la figura 2.4.5. Para simplificar, se asignan las longitudes iguales a cada nodo.

Figura 2.4.5 Cálculo de ejemplo de  $F_{env}$

	Time (days)															
Nodes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
3	50	50	50	50	50	50	50	50	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	BASE $F_{env} = 1.45$	
4	50	50	50	50	50	50	50	50	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7		
5	50	50	50	50	50	50	50	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7		
6	50	50	50	50	50	50	50	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7		
7	50	50	50	50	50	50	50	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7		
8	50	50	50	50	50	50	50	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7		
9	75	75	75	75	75	75	75	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6		SUBBASE $F_{env} = 0.92$
10	75	75	75	75	75	75	75	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6		
11	75	75	75	75	75	75	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7		
12	75	75	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7		
13	75	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7		
14	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1	1	1		
15	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1	1	1	1		
16	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1	1	1	1	1	1		

La guía AASHTO 2002 tiene dos opciones de análisis estructural: LEA (Análisis Elástico Lineal) y (Análisis por Elementos Finitos) FEA. Aunque el EICM proporciona una base de datos climáticos para cada hora, es evidentemente impráctico realizar el análisis elástico o de elementos finitos para cada hora.

Para solucionar esto, se toman periodos de análisis de un (1) mes o quince (15) días al cual se le realizan los análisis de esfuerzo-tensión.

En el módulo LEA, el valor de módulo es usado para la capa estructural y se obtiene de la multiplicación del módulo de referencia por el valor de  $F_{env}$  generado por el EICM para cada capa y período de análisis. El módulo de referencia se considera bajo condiciones de contenido de humedad óptima y máximo peso unitario seco ( $MR_{opt}$ ).

$$M_R = F_{env} * MR_{opt}$$

En el módulo FEA,  $MR_{opt}$  es una función del estado de tensión, como se muestra en la siguiente ecuación (modelo constitutivo universal):

$$M_{Ropt} = k_1 \times p_a \times \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$$

$k_1, k_2, k_3$	=	Constantes de regresión.
$p_a$	=	Presión atmosférica.
$\theta$	=	Volumen de esfuerzo.
$\tau_{oct}$	=	Esfuerzos octohedrales.

También se puede resolver el  $F_{env}$  por un procedimiento similar descrito al principio de esta sección, conociendo el estado de esfuerzo con base a (1) hora para cada columna de la matriz tiempo - profundidad. Esto involucra un análisis de elementos finitos corriente a una base de cada hora que reemplaza el propósito de encontrar un equivalente, para el valor de  $F_{env}$  se hace impráctico en lo que se refiere al tiempo computacional (720 análisis por (1) mes, 1.7 millones para (20) años de análisis de un pavimento).

Para solucionar este problema fue considerado aceptable usar un factor de ajuste  $F_{env}$  para módulos en cada nodo de la malla de elementos finitos. Por consiguiente, la ecuación para calcular el módulo tensión depende del análisis de los elementos finitos:

$$M_R = F_{env} \times k_1 \times p_a \times \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$$

$M_R$  = Módulo resiliente resultado del análisis de elementos finitos.  
 $F_{env}$  = Factor climático ajustado para cada capa/subcapa que considera el análisis de elementos de finitos.

## 2.4.4 Cálculo EICM - temperaturas en la estructura del pavimento-

### 2.4.4.1 Introducción.

Es un hecho claro que los factores ambientales tales como la temperatura y la humedad afectan significativamente los materiales.

Debido a que el asfalto es un material visco-elástico, sus propiedades dependen en gran parte de la temperatura. A temperaturas muy frías su rigidez se acerca a la de un pavimento rígido (PCC), y a temperaturas muy calientes, la rigidez se acerca del límite del material.

En el modelo EICM, los modelos CMS y CRREL son los encargados principalmente del cálculo de temperaturas, que a continuación se explican.

*Modelo CMS:* El modelo CMS se desarrolló inicialmente en la Universidad de Illinois. Este es un modelo de transferencia de calor que determina la distribución de la temperatura en el pavimento. El modelo considera las radiaciones, conducciones y el efecto del calor presente.

Las entradas para el modelo son:

- Capacidad de los materiales a temperaturas altas.
- Conductividad térmica de los materiales del pavimento.
- Absorción y emisión de la superficie del pavimento.
- Temperatura del aire.
- Velocidad del viento.
- Radiación solar.

El EICM asume que los datos de entrada, que proporciona el diseñador, tales como: capacidad de calor y conductividad térmica no varían con el tiempo, aunque los contenidos de humedad, la capacidad de calor y conductividad térmica cambian con el tiempo.

Los datos de entrada de capacidad de calor seco y conductividad térmica seca en el modelo EICM, son utilizados internamente para calcular la capacidad de calor húmedo y la conductividad térmica húmeda. De esta manera se acoplan los cálculos calor/temperatura y las predicciones de humedad del EICM.

El modelo CMS define dos límites de temperatura que son: el límite superior de la superficie del pavimento, y el límite inferior que es a una temperatura constante a la profundidad del nodo. Para los límites superior, los parámetros tales como temperatura del aire, velocidad del viento, cantidad de radiación

solar y absorción y emisión del pavimento. El límite inferior es a una temperatura constante en el nodo, capaz de proporcionar una cantidad infinita de calor para conservar constante la temperatura en el nodo. Así mismo el modelo de flujo de calor calcula temperaturas a varias profundidades.

Una vez se definan las propiedades térmicas de flujo de calor a través del pavimento y se establezcan los límites de las capas y se identifiquen las condiciones límites de las capas, es necesario determinar la cantidad de flujo de calor entrando y saliendo del pavimento. Los dos procesos de entrada y salida de calor de la superficie del pavimento son la transmisión y radiación, estos se discuten a continuación:

*Proceso de transmisión:* La transmisión es el proceso de transferir la energía de calor debido a las diferencias en la temperatura del aire y la temperatura del pavimento. Si la superficie del pavimento es más caliente que el aire, el calor se pierde en el límite superior. Si la superficie del pavimento está más fría que el aire, el calor se agrega al límite superior. La cantidad de transmisión que ocurre se relaciona directamente a esta diferencia de temperatura y la velocidad del viento. Altas velocidades del viento aceleran directamente las proporciones de la transmisión.

*Proceso de radiación:* El segundo método de flujo de calor a la superficie es la radiación. La fuente primaria de flujo de calor de radiación es la onda de radiación corta del sol. La cantidad de radiación solar que choca en la superficie del pavimento es dependiente de los siguientes factores:

- La posición del sol.
- La nubosidad.

La latitud del sitio, el día y el año determinan la posición del sol. Estos cálculos los hace internamente el EICM. La cantidad de nubosidad puede obtenerse de la base de datos climática. Estas dos variables determinan la cantidad de radiación solar que está llegando a la superficie del pavimento.

Otro tipo de radiación que induce el flujo de calor es la radiación de onda larga. La radiación de la onda larga es la radiación térmica que se emite por el pavimento según la teoría de radiación de cuerpo negro. Dependiendo de la temperatura absoluta de un material en grados Kelvin, una cantidad específica de energía de calor es emitida en forma de radiación de la onda larga. El EICM asume un valor constante por emisión para los pavimentos, dependiendo de la temperatura. Una porción de esta radiación de onda larga es emitida por el pavimento y absorbida por el paisaje rodeando al pavimento. El método determina la cantidad de radiación de onda larga absorbida en forma similar al empleado para la radiación de la onda corta.



*Modelo CRREL:* El modelo CRREL utiliza perfiles de temperatura a través de capas de asfalto como las establecidas por el modelo CMS para calcular cambios en el perfil de temperatura del suelo y así la penetración de helada y de descongelamiento.

Este modelo no se tendrá en cuenta, debido a que en Colombia no se presentan heladas.

#### 2.4.4.2 Modelo CMS

*Condiciones límites para el Modelo CMS:* Temperaturas a lo largo de la estructura del pavimento son dominadas por las condiciones atmosféricas de la superficie. Mientras es fácil medir las temperaturas del aire, no hay una correspondencia directa entre las temperaturas del aire y temperaturas de superficie del pavimento. Para estimar la temperatura del pavimento y el balance de energía en la superficie, el modelo CMS utiliza la siguiente ecuación, que es ilustrada en la figura 2.4.6:

$$Q_i - Q_r - Q_a - Q_e \pm Q_c \pm Q_h \pm Q_g = 0$$

- $Q_i$  = Radiación de la onda corta entrante.
- $Q_r$  = Radiación de la onda corta.
- $Q_a$  = Radiación de la onda larga entrante.
- $Q_e$  = Radiación de la onda larga saliente.
- $Q_c$  = Transferencia de calor.
- $Q_h$  = Efectos de transpiración, condensación, evaporación, y sublimación.
- $Q_g$  = Energía absorbida por la tierra.

La longitud total de radiación en la superficie es  $Q_n$ .

$$Q_n = Q_s - Q_l$$

$Q_s$  = Radiación de la onda corta neta.

$Q_l$  = Radiación de la onda larga neta.

$$Q_s = Q_i - Q_r.$$

$$Q_l = Q_a - Q_e.$$

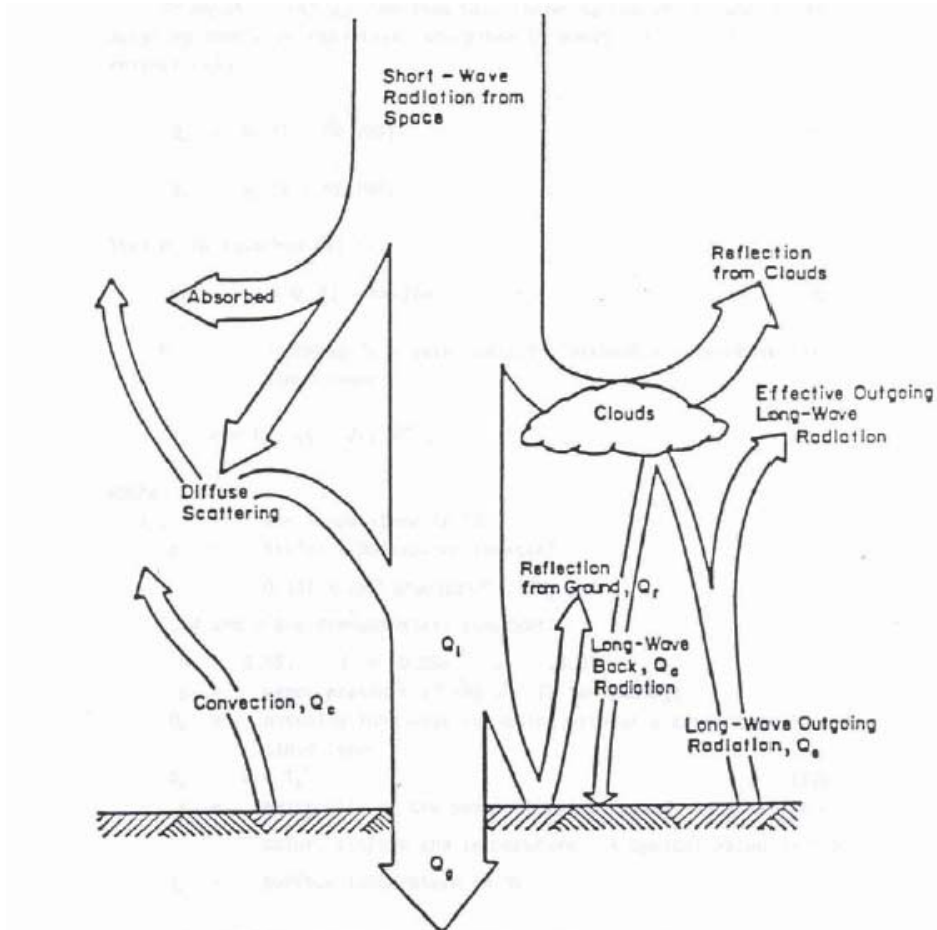


Figura 2.4.6 Transferencia de calor entre la superficie del pavimento y el aire en un día soleado.

$Q_s$  está dado según Barker y Haines como:

$$Q_s = a_s \times R \times \left[ A + B \times \frac{S_c}{100} \right]$$

- $a_s$  = Superficie de absorción de onda corta de la superficie del pavimento.
- $R^*$  = Incidencia de la radiación en una superficie horizontal a la atmósfera, depende de la latitud del sitio y de la declinación solar, que es la posición del norte o al sur del ecuador y es una función del tiempo y del año.
- A, B = Constante de respuestas a absorción de la atmósfera. Los valores de A y B para el oeste han mostrado ser de 0.202 y 0.539 respectivamente.
- $S_c$  = Porcentaje de influencia de nubosidad.

La longitud de onda larga de radiación entrante  $Q_a$ , y la radiación de la onda larga saliente  $Q_e$ , son dados por las ecuaciones.

$$Q_a = Q_z \times \left(1 - \frac{NW}{100}\right)$$

$$Q_e = Q_x \times \left(1 - \frac{NW}{100}\right)$$

Así  $Q_t$  se tiene en la siguiente:

$$Q_t = (Q_z - Q_x) \times \left(1 - \frac{NW}{100}\right)$$

La radiación de la onda larga entrante es  $Q_z$  sin su corrección por nubosidad y  $(1 - NW/100)$  representa la nubosidad.

$$Q_z = \sigma_{sb} \times T_{air} \times \left(G - \frac{J}{10^{\rho p}}\right)$$

$N$  = Factor de nubes (0.9 a 0.8 para las alturas de nube de 1,000 a 6,000 pies).

$W$  =  $100 - S_c$  (promedio de la nubosidad durante día o noche).

$T_{air}$  = Temperatura del aire en  $^{\circ}R$ .

$\sigma_{sb}$  = Constante de Stefan-Boltzmann,  $0.172 \times 10^{-8}$  Btu/(h-ft<sup>2</sup>- $^{\circ}R$ ).

$G$  = 0.77.

$J$  = 0.28.

$\rho$  = 0.074.

$p$  = Presión de vapor de aire (1 a 10 mm Hg).

$Q_x$  = Radiación de la onda larga saliente sin corrección por nubosidad.

$$Q_x = \sigma_{sb} \times \epsilon \times T_s^a$$

$\epsilon$  = Emisión del pavimento que depende del color del pavimento, textura y temperatura. Un valor típico es 0.93.

$T_s$  = Temperatura de la superficie en  $^{\circ}R$ .

El incremento de transferencia de calor por transmisión  $Q_c$ , se da por la siguiente ecuación:

$$Q_c = H \times (T_{air} - T_s) \quad T_{air} \text{ y } T_s \text{ en } ^{\circ}F$$

$H$  = Coeficiente de transferencia de calor por transmisión.

Este parámetro es difícil de determinar debido a las muchas variables que influyen en él. Sin embargo también puede expresarse como sigue:

$$H = 122.93 \times \left[ 0.00144 \times T_m^{0.3} \times U^{0.7} + 0.00097 \times (T_s - T_{air})^{0.3} \right]$$

- $T_s$  = Temperatura de la Superficie, en °C.  
 $T_{air}$  = Temperatura del aire, en °C.  
 $T_m$  = Promedio de temperatura de superficie y aire, en °K.  
 $U$  = Velocidad media del viento diaria en m/s.

El máximo valor del coeficiente de transferencia de calor (H) es controlado internamente por EICM. El máximo valor sugerido es 3.0 Btu/(h-ft<sup>2</sup>-°F). Los efectos de transporte, condensación, evaporación y sublimación ( $Q_h$ ) han sido abandonados en la formación porque ellos son demasiado pequeños para ser significante o se anulan los efectos fuera del balance de energía.

En resumen, los cálculos anteriores determinan la temperatura de la superficie y controlan la temperatura de los materiales subyacentes.

*Velocidad del viento:* Se requieren velocidades de viento en los cálculos para transmisión de transferencia calor descrito anteriormente. Se necesitan velocidades diarias para los cálculos de coeficiente de transferencia de calor que son determinados por la interpolación lineal entre los meses adyacentes.

*Nubosidad:* No todas las estaciones climáticas usan datos para el modelo EICM, se tiene frecuentemente un porcentaje (%) de datos posibles de nubosidad. Los datos más aproximados a situaciones similares son tomados para estos cálculos. Estos datos no afectan significativamente el cálculo de equilibrio de calor a la superficie del pavimento.

*Temperatura del aire:* La descripción presentada muestra las temperaturas aéreas que se necesitan para el cálculo de la radiación de la onda larga emitida por el aire y la transmisión de calor desde la superficie. Mientras solamente los valores de máximos y mínimos son registrados por las estaciones de tiempo, se requieren valores para cada hora en los cálculos del EICM. Las observaciones han mostrado que las variaciones de temperatura sobre periodos de 24 horas pueden adecuarse a una onda de seno que tiene un valor mínimo de temperatura ligeramente después de la salida del sol y picos en la mitad del día. Teniendo en cuenta que la salida del sol puede variar significativamente con los datos de las estaciones, es conveniente utilizar un promedio como dato de cálculo para el programa.

*La lluvia:* Los flujos de calor son el resultado de la precipitación e infiltración en la estructura del pavimento, estos no han sido considerados en las condiciones

límites de flujo de calor. El papel de la precipitación bajo estas circunstancias no es completamente claro, y no se han intentado métodos para incorporarlo en el equilibrio de energía.

#### 2.4.4.3 Perfil de distribución de temperatura

Las entradas y salidas de transmisión de calor y radiación en la superficie del pavimento, son adicionadas o sustraídas de la cantidad límite superior de calor. El EICM en un solo paso calcula el nuevo perfil de temperatura para el pavimento. Este perfil es necesario para el paso siguiente.

*Datos de temperatura para el análisis de pavimentos flexibles:* El propósito de la guía AASHTO 2002, es usar una unidad base de un mes para calcular los daños incrementales. Es importante comprender que si sólo se utiliza el valor de temperatura promedio mensual en el análisis, no se evaluarán los daños producidos por las temperaturas altas presentes en el pavimento.

La guía AASHTO 2002 para solucionar este problema de incluir las temperaturas extremas durante un mes dado decidió lo siguiente. El EICM proporciona 0.1 horas (6 minutos) de temperatura para el período del análisis. Esta temperatura durante un mes dado (o 15-días) puede representarse por una distribución normal con un cierto valor medio ( $\mu$ ) y la desviación normal ( $\sigma$ ), como se muestra en la figura 2.4.7.

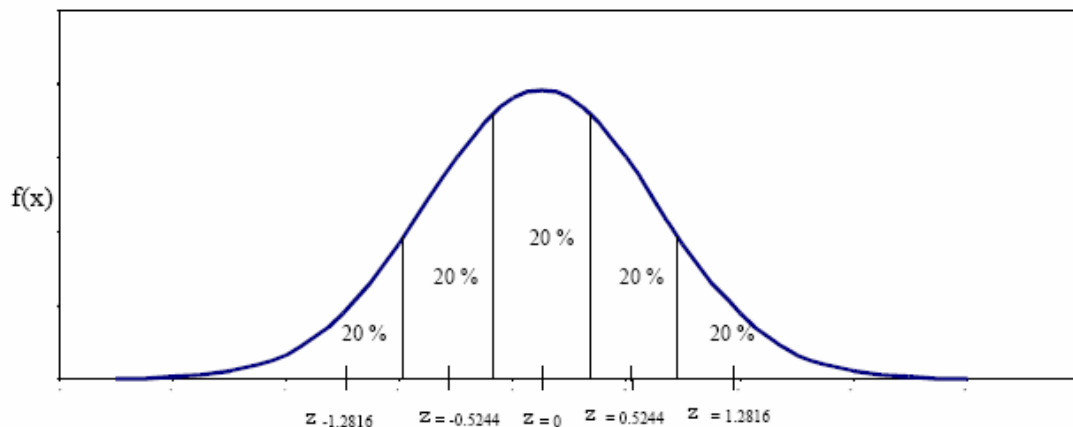


Figura 2.4.7. Distribución de temperatura para un periodo de análisis dado.

Mientras el EICM calcula la temperatura en un paso de tiempo relativamente pequeño de 0.1 horas, las temperaturas son salidas de la guía AASHTO 2002 de archivos en dos (2) formatos para el análisis del pavimento flexible. Uno de ellos se usa para hacer análisis de ahuellamiento y fatiga mientras el otro es usado para agrietamientos por temperatura.

*Datos de temperatura para ahuellamiento y fatiga:* Este es un factor importante que afecta la rigidez del asfalto (stiffness) y por consiguiente el módulo dinámico del concreto asfáltico. Ya que el módulo de la carpeta asfáltica dentro de la estructura del pavimento afecta la respuesta general del pavimento, es importante considerar la temperatura como una función del tiempo y la profundidad.

El modelo de EICM presenta una distribución de frecuencia de la temperatura del pavimento como una función de tiempo y la profundidad. Se asume que la distribución de frecuencia de los datos de temperatura obtenidos en el EICM normalmente es distribuida, como se muestra en la figura 2.4.7. El diagrama de frecuencia obtenido del EICM representa la distribución en una profundidad específica y tiempo. Para las diferentes temperaturas y distribuciones de frecuencia a lo largo de la profundidad de la carpeta asfáltica, las capas del asfalto se subdividen en subcapas.

En la figura 2.4.7, un mes dado puede tener pocas temperaturas extremas que podrían ser significantes para calcular daños de ahuellamiento y fatiga. Usando un valor medio no se obtienen los daños causado por estas temperaturas extremas. Las respuestas de las temperaturas extremas, ó sea las temperaturas por encima de un intervalo dado se dividen en cinco subestaciones diferentes. Para cada subestación la temperatura de la subcapa es definida por una temperatura que representa el 20% de la distribución de frecuencia para la temperatura del pavimento, como se presenta en la figura 2.4.7.

Esta subdivisión también es representativa cuando ocurran condiciones del 20% del tráfico mensual. Esto debe calcularse para temperaturas de pavimentos que correspondan a una desviación estándar normal ( $\sigma$ ) de -1.2816, -0.5244, 0, 0.5244 y 1.2816, como se encuentra en la figura 2.4.6. Estos valores corresponden a las frecuencias acumuladas de 10, 30, 50, 70 y 90% dentro de un mes dado. Como un ejemplo, si la temperatura mensual ( $\mu$ ) es 50 °F (10 °C) y tiene una desviación normal ( $\sigma$ ) de 15 °F (-9 °C), las temperaturas para cinco intervalos como se muestra en la tabla 2.4.11.

Tabla 2.4.11 Distribución de temperatura

SUBESTACIÓN	VALOR DE $Z_R$	TEMPERATURA, °F = $\mu + Z_R (\Sigma)$
1	-1.2816	30.8
2	-0.5244	44.8
3	0	50.0
4	0.5244	55.2
5	1.2816	69.2

La tabla 2.4.11 muestra claramente que tiene en cuenta las temperaturas extremas en un intervalo dado. Cada subestación responderá por el 20% del tránsito en el intervalo correspondiente. El EICM genera cinco temperaturas de los cinco valores de cada intervalo y a cada uno les selecciona sus profundidades (es decir, para ahuellamiento y fatiga, se requieren los valores de temperatura a la superficie de la estructura del pavimento y a una profundidad media de la carpeta asfáltica). Desde la primera subcapa de la carpeta asfáltica siempre 0.5 pulgadas, las temperaturas se proporcionan a 0.25 pulgadas de la superficie. Ninguna información de temperatura se genera para cualquier otro tipo de capa, por que no se requiere para el análisis.

La temperatura de la superficie y la temperatura a 0.25 pulgadas se usa para estimar la fatiga en la superficie de la carpeta asfáltica. Las tensiones de fatiga desarrolladas en la superficie y a 0.5 pulgadas son ocasionadas por la tensión térmica, estas profundidades son necesarias para estimar la fatiga arriba y debajo de la carpeta asfáltica.

En resumen el EICM mantiene los valores de temperatura en los cinco (5) intervalos del perfil de distribución de temperatura para el uso de fatiga por agrietamiento y modelos de deformación permanente. Estas son proporcionadas en función del tiempo y profundidad. La profundidad a que estas distribuciones de temperatura necesitan ser calculadas, es definida por el espesor de la subcapa en la carpeta asfáltica.

*Datos de Temperatura por fatiga térmica:* En el análisis de fatiga térmica se requieren los datos de temperatura horarios. Se requieren los valores de temperatura en la superficie, a 0.5 pulgada, y a cada pulgada siguiente dentro de la capa asfáltica. Con el fin de encontrar la relación de la temperatura-profundidad dentro de la capa asfáltica. Para el módulo de fatiga térmica, la temperatura en la última profundidad debe corresponder a (2, 4, 6, 8 pulgadas...etc), si el espesor de capa del asfalto es 7 pulgadas, las temperaturas de cada hora a una profundidad de 8 pulgadas. Por ejemplo para una capa del asfalto de 7 pulgadas, la temperatura a una profundidad de 8 pulgadas corresponderá a la capa subyacente, la cual depende del tipo de material de la capa subyacente.

Además de desarrollar un perfil de temperatura-profundidad para predecir el módulo de fatiga por agrietamiento térmico, las temperaturas en la superficie y a 0.5 pulgadas se usan para estimar esfuerzos a tensión. Los esfuerzos a tensión a estas dos profundidades son ocasionadas por los esfuerzos desarrollados por el tránsito para estimar el agrietamiento arriba (grietas top - down) y debajo de la carpeta asfáltica.

En resumen, el modelo EICM genera un archivo de temperatura, que define la relación de la temperatura-profundidad para predecir el agrietamiento térmico en un pavimento flexible. El archivo incluye los valores de temperatura horario para el período del análisis.



## 2.5 TRÁNSITO<sup>7</sup>

### 2.5.1 Introducción

El tránsito es una de las principales variables del diseño y análisis de pavimentos. Este es requerido para estimar el número de repeticiones aplicadas al pavimento y su respectiva frecuencia, a lo largo de la vida útil de la estructura del pavimento.

Los datos que se necesitan son:

- Volumen del tránsito.
- Velocidad de operación.
- Factor de distribución por carril y por sentido.
- Clases de vehículos.
- Factor de distribución de carga.
- Presión de inflado y radio de la llanta.
- Factores de crecimiento.

### 2.5.2 Jerarquías usadas en la caracterización del tránsito

El espectro de carga es necesario para el análisis y diseño de estructuras de pavimentos flexibles nuevos; debido a que algunas agencias no poseen los datos suficientes para completar el espectro de cargas y determinar el tránsito futuro, la guía proporciona tres niveles de entrada de los datos de tránsito, los cuales representan la exactitud con la que el diseñador puede calcular el tránsito futuro, y son:

*Nivel 1:* En el cual se tiene un buen conocimiento de las características del tránsito pasado, presente y futuro. Los datos de volúmenes y pesajes pueden considerarse de cualquier punto dentro del sitio específico del tramo vial en estudio, además, se cuenta con información de carreteras cercanas.

*Nivel 2:* En el cual se tiene un conocimiento moderado de las características del tránsito pasado, presente y futuro. Se cuenta con los datos de volúmenes y pesajes de la zona, región o departamento del proyecto. Requiere que el diseñador reúna gran información de volúmenes en un sitio, incluyendo la variación del tránsito en días de semana y fines de semana, y una significativa tendencia de las cargas por periodos de tiempo.

---

<sup>7</sup> Guide for Mechanistic - Empirical Design. NCHRP 1-37A. Part 2 Design Inputs, Chapter 4 Traffic, March 2004.

*Nivel 3:* En el cual hay un pobre conocimiento de las características del tránsito pasado, presente y futuro. Se cuentan con los datos de volúmenes y pesajes del país en donde se va a realizar el proyecto. Requiere que el diseñador recolecte datos de TPD y porcentaje de camiones, incluyendo el tamaño y peso de carga que transportan, además, puede usar datos promedios de las regiones o departamento, o valores obtenidos de las experiencias locales.

Tabla 2.5.1 Datos de tránsito requeridos para cada nivel de entrada de datos

INFORMACIÓN		NIVEL		
		1	2	3
Camiones y Llantas	Factor de distribución por dirección	Sitio específico	Regional	Nacional
	Factor de distribución por carril	Sitio específico	Regional	Nacional
	Número de ejes, por tipo de eje y por clase de camión	Sitio específico	Regional	Nacional
	Espaciamiento de ejes y llantas	No aplica	No aplica	No aplica
	Presión de inflado	No aplica	No aplica	No aplica
	Función de crecimiento de camiones	No aplica	No aplica	No aplica
	Velocidad de operación	No aplica	No aplica	No aplica
	Factor de distribución lateral de camiones	No aplica	No aplica	No aplica
	Factor de distribución mensual de camiones	Sitio específico	Regional	Nacional
	Factor de distribución horario de camiones	Sitio específico	Regional	Nacional
Distribución de camiones y variables de volúmenes	TPD del año base	No aplica	No aplica	No aplica
	Distribución de camiones/espectro por clase de camión del año base	Sitio específico	Regional	Nacional
	Distribución de carga por eje/espectro por clase de camión y tipo de eje	Sitio específico	Regional	Nacional
	Grupo de clasificación de tránsito de camiones	No aplica	No aplica	No aplica
	Porcentaje de camiones	No aplica	No aplica	No aplica

### 2.5.3 Descripción de la base de datos y elementos usados en la caracterización del transito

#### 2.5.3.1 Peso en movimiento (WIM)

Es una tabulación del tipo, número, separación y peso por eje de cada vehículo estudiado, en un periodo de tiempo. Estos datos son utilizados para determinar la distribución de carga por eje o espectro para cada tipo de eje y para cada clase de vehículo. El peso en movimiento es clasificado en tres niveles, dependiendo de la fuente de información, de la siguiente manera:

Tabla 2.5.2 Estimación de la información de peso de ejes

FUENTE DE INFORMACIÓN	NIVEL		
	1	2	3
Sitio específico	X		
Valores regionales		X	
Valores nacionales			X

#### 2.5.3.2 Clasificación de vehículos (AVC)

Es una tabulación del tipo y número de vehículos encontrados en un periodo de tiempo. El análisis de la clasificación de vehículos se realiza para determinar la distribución de las diferentes clases de vehículos. La clasificación de vehículos se da en tres niveles, dependiendo de la fuente de información, de la siguiente manera:

Tabla 2.5.3 Estimación de la información de clasificación de vehículos

FUENTE DE INFORMACIÓN	NIVEL		
	1	2	3
Sitio específico	X		
Valores regionales		X	
Valores nacionales			X

#### 2.5.3.3 Conteo de vehículos

Es un simple conteo del número total de vehículos categorizados en tres grandes grupos:

- Automóviles.
- Buses.
- Camiones.

Durante un periodo de tiempo determinado. El conteo puede ser de uno de los siguientes tipos:

- Continuo: se realiza los 365 días del año.
- Por periodo de tiempo: se realiza 2 ó 12 veces en un año, de 24 horas a 2 semanas seguidas.
- De corta duración: se realiza de 6 horas a 7 días seguidos.

Los conteos de vehículos se clasifican en tres (3) niveles, dependiendo de la fuente de información, de la siguiente manera:

Tabla 2.5.4 Estimación de la Información de Conteo de Vehículos

FUENTE DE INFORMACIÓN	NIVEL		
	1	2	3
Sitio específico		X	X

#### 2.5.3.4 Modelos de tránsito pronóstico y atraído

Son modelos para la predicción del tránsito futuro, utilizados generalmente en zonas urbanas y la información es obtenida de estudios de origen - destino, movimiento de carga, placas, entre otros. No se recomienda el uso de modelos nacionales, en el estudio del tránsito de una ciudad específica.

#### 2.5.4 Suposiciones

Dos (2) grandes suposiciones se realizaron para el software de la guía:

- 1) La distribución de la carga por eje, de cada clase de camión, permanece constante año a año, hay que tener en cuenta que ésta puede cambiar debido a medidas políticas o económicas del gobierno; mientras que, la distribución del volumen de camiones si puede cambiar año a año.
- 2) La distribución de la carga por eje, de cada clase de camión, y la distribución del volumen de camiones permanecen constantes tanto en días de semana como fines de semana, en un periodo determinado de tiempo.

#### 2.5.5 Entradas requeridas para la caracterización del tránsito

Cuatro tipos de datos son requeridos para el diseño de estructuras de pavimentos flexibles nuevos:

- 1) Volumen de tránsito - año base.

2) Factores de ajuste del volumen del tránsito.

- Ajuste mensual
- Distribución de clase de vehículo
- Distribución horaria de camiones
- Factor de crecimiento

3) Factor de distribución de carga por eje.

4) Generales.

- Número de ejes/camiones
- Configuración del eje
- Factores de las llantas

2.5.5.1 Volumen de tránsito - año base:

El año base es el primer año, después de construida la vía, en el cual está abierta al tránsito. Los datos que se requieren, son:

- Tráfico promedio anual de camiones, en los dos sentidos (AADT).
- Número de carriles en la dirección de diseño.
- Porcentaje de camiones en el sentido de diseño (DDF).
- Porcentaje de camiones en el carril de diseño.
- Velocidad de operación de camiones.

*Tráfico promedio anual de camiones, en los dos sentidos (AADT):*

Es el número total de camiones (en los dos sentidos) que pasan por un punto o tramo que se va a diseñar, durante un periodo de 24 horas, y un periodo determinado de días; dividido por el número de días del mismo periodo.

Tabla 2.5.5 Determinación del tránsito promedio anual de camiones

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1	Datos de peso y clasificación del sitio específico
2	Datos de peso y clasificación de la región del proyecto
3	Datos estimados de conteos y porcentajes de camiones estimados

*Nivel 1:* Los datos de peso y clasificación, de este nivel, son obtenidos del sitio específico. Se recomienda usar la información del promedio de los tres (3) años más recientes. Este promedio necesita ser ajustado, con los respectivos factores de crecimiento, dependiendo de la diferencia entre éstos años y el año base.

*Nivel 2:* Los datos de peso y clasificación, de este nivel, son los obtenidos de la región del proyecto. Se recomienda usar la información del promedio de tres (3) años previos al año base.

*Nivel 3:* Los datos para estimar el tránsito promedio anual de camiones son los conteos y porcentajes de camiones propuestos por las agencias, en general, y el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), en particular. Se recomienda usar la información de los tres (3) años más recientes.

*Número de carriles en el sentido de diseño:* El número de carriles en el sentido de diseño es determinado de las especificaciones y representa el número de carriles en una dirección de flujo de los vehículos.

*Porcentaje de camiones en la dirección de diseño (DDF):* El porcentaje de camiones en la dirección de diseño o el factor de distribución de dirección (DDF), es usado para cuantificar y diferenciar el volumen de camiones en las dos direcciones. Usualmente, se usa el cincuenta por ciento cuando los conteos se hacen en las dos direcciones, sin embargo, no siempre es así.

Tabla 2.5.6 Estimación del porcentaje de camiones en la dirección de diseño

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1	Determinado de la información de peso y clasificación del sitio específico
2	Determinado de la información de peso, clasificación y conteos de la región del proyecto
3	Determinado de promedios nacionales o basados en experiencias locales.

El software de la guía proporciona un valor de 55% por defecto, el cual fue obtenido de los datos del Long Term Pavement Performance (LTPP). Los valores usados en los cálculos para la determinación de este valor se presentan a continuación:

- Buses = 0.50 (excepto para buses donde se manejan valores de 0.8 a 1.0)
- Camiones = 0.62
- Camiones con un remolque = 0.55
- Camiones con varios remolques = 0.5

*Porcentajes de camiones en el carril de diseño (LDF):* El porcentaje de camiones en el carril de diseño o factor de distribución de carril (LDF), representa la distribución de camiones entre los carriles con el mismo sentido. En carreteras de dos carriles y dos sentidos el valor es de 1, mientras, que para carreteras de múltiples carriles y dos sentidos este valor depende de la geometría y las condiciones del sitio.

Tabla 2.5.7 Estimación del porcentaje de camiones en el carril de diseño

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1	Determinado de la información de peso y clasificación del sitio específico
2	Determinado de la información de peso, clasificación y conteos de la región del proyecto
3	Determinado de promedios nacionales o basados en experiencias locales.

Los valores recomendados por la guía, fueron determinados del análisis de información del Long Term Pavement Performance (LTPP), y son los siguientes:

- Vías de un carril por sentido = 1.0
- Vías de dos carriles por sentido = 0.90
- Vías de tres carriles por sentido = 0.60
- Vías de cuatro o más carriles por sentido = 0.45

*Velocidad de operación de vehículos pesados:* La velocidad de operación de vehículos pesados o la velocidad promedio de viaje, generalmente, depende de muchos factores incluyendo el tipo de vía, el terreno por donde pasa la vía, el porcentaje de camiones, entre otros. El software de la guía usa una velocidad por defecto de 60 Millas/h, la cual puede ser cambiada de acuerdo a las condiciones locales.

#### 2.5.5.2 Ajustes del volumen de tránsito:

Los factores de ajuste requeridos para la caracterización del tránsito son:

- Ajuste mensual.
- Distribución de clase de vehículo.
- Distribución horaria de camiones.
- Factor de crecimiento.

#### *Factor de ajuste mensual (MAF):*

El factor de ajuste mensual representa la proporción del tránsito anual de camiones, para una clase de camión, que ocurre en un mes específico. En otras palabras, es el tránsito mensual, de una clase de camión, dividido el tránsito anual, de la misma clase de camión. Este factor está ligado a factores como uso del suelo, industrias en el área, clima, economía y localización de la vía (rural o urbana), por lo que éste puede cambiar a lo largo de la vida útil de la estructura de pavimento; sin embargo, para esta guía de diseño el factor de ajuste mensual se asume constante a lo largo de la vida útil de la estructura de pavimento.

Tabla 2.5.8 Estimación del factor de ajuste mensual

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1	Determinado de la información de peso y clasificación del sitio específico
2	Determinado de la información de peso, clasificación y conteos de la región del proyecto
3	Determinado de la información de peso, clasificación, conteos o basados en experiencias locales.

Cada agencia, como el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), puede generar los factores de ajuste mensual (MAF) para diferentes tipos de vías, de la siguiente manera:

- 1) Para la información de tránsito (24 horas continuas), determine el número de camiones, de cada clase. Si la información no es de 24 horas continuas, el tráfico de camiones debe ser ajustado para ser representativo de las 24 horas.
- 2) Usando la información diaria representativa, de los diferentes meses del año, determine el promedio diario de camiones para cada mes.
- 3) Sume el promedio diario de camiones de cada mes.
- 4) Calcule el factor de ajuste mensual (MAF), dividiendo el promedio diario de camiones de cada mes entre la suma de los promedios diarios mensuales de camiones de todo el año, y multiplicando por doce (12).

$$MAF = \frac{PDCM}{\sum_1^{12} PDCM} * 12$$

La suma de los factores de ajuste mensual debe ser igual a 12. Por defecto el software tiene un factor de ajuste mensual (MAF) igual a 1 para todos los meses.

*Distribución de clase de vehículo:* La distribución de vehículo por clase de es calculado de la información obtenida de pesaje, clasificación y conteos. Una buena clasificación no depende de la fuente de información sino de la forma y habilidad para obtenerla, la verificación de su veracidad, resumiéndola, organizándola en formatos y manejando un proceso eficiente.

La distribución de clase de vehículo representa el porcentaje de cada tipo de camión del año base. La suma de estos porcentajes debe ser igual a 100.

Tabla 2.5.9 Estimación de la distribución de clase de vehículo

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1	Determinado de la información de peso y clasificación del sitio específico.
2	Determinado de la información de peso, clasificación y conteos de la región del proyecto.
3	Determinado de la información de peso, clasificación y conteos basados en experiencias locales.



Los valores por defectos dados en el software de diseño (Nivel 3), fueron determinados de la información del Long Term Pavement Performance (LTPP). Estos fueron elegidos basados en la clase de vía y la mejor combinación de la clasificación de tránsito de camiones (TTC), que describen el flujo esperado de camiones en la vía.

Tabla 2.5.10 Valores por defecto para la clasificación de tránsito de camiones

TTC	DESCRIPCIÓN	CLASE DE VEHICULO / DISTRIBUCIÓN CLASE DE CAMIONES									
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Muchos camiones de un solo remolque (I)	1.3	8.5	2.8	0.3	7.6	74	1.2	3.4	0.6	0.3
2	Muchos camiones de un solo remolque (II)	2.4	14.1	4.5	0.7	7.9	66.3	1.4	2.2	0.3	0.2
3	Muchos camiones de uno y multiremolque (I)	0.9	11.6	3.6	0.2	6.7	62	4.8	2.6	1.4	6.2
4	Muchos camiones de un solo remolque (III)	2.4	22.7	5.7	1.4	8.1	55.5	1.7	2.2	0.2	0.4
5	Muchos camiones de uno y multiremolque (II)	0.9	14.2	3.5	0.6	6.9	54	5	2.7	1.2	11
6	Algunos camiones de un solo remolque y livianos (I)	2.8	31	7.3	0.8	9.3	44.8	2.3	1	0.4	0.3
7	Muchos camiones (I)	1.0	23.8	4.2	0.5	10.2	42.2	5.8	2.6	1.3	8.4
8	Muchos camiones multiremolque (I)	1.7	19.3	4.6	0.9	6.7	44.8	6	2.6	1.6	11.8
9	Algunos camiones de un solo remolque y livianos (II)	3.3	34	11.7	1.6	9.9	36.2	1	1.8	0.2	0.3
10	Muchos camiones (II)	0.8	30.8	6.9	0.1	7.8	37.5	3.7	1.2	4.5	6.7
11	Muchos camiones multiremolque (II)	1.8	24.6	7.6	0.5	5	31.3	9.8	0.8	3.3	15.3
12	Algunos camiones de un solo remolque y livianos (III)	3.9	40.8	11.7	1.5	12.2	25	2.7	0.6	0.3	1.3
13	Muchos camiones (III)	0.8	33.6	6.2	0.1	7.9	26	10.5	1.4	3.2	10.3
14	Muchos camiones livianos (I)	2.9	56.9	10.4	3.7	9.2	15.3	0.6	0.3	0.4	0.3
15	Muchos camiones livianos (II)	1.8	56.5	8.5	1.8	6.2	14.1	5.4	0	0	5.7
16	Muchos camiones multiremolque y livianos	1.3	48.4	10.8	1.9	6.7	13.4	4.3	0.5	0.1	12.6
17	Muchos buses	36.2	14.6	13.4	0.5	14.6	17.8	0.5	0.8	0.1	1.5

Tabla 2.5.11 Definición de los grupos de clasificación de tránsito de camiones

BUSES	COMODIDADES PARA CADA CAMIÓN		TTC
	MULTIREMOLQUE	CAMIONES CON UN SOLO REMOLQUE Y CAMIONES SENCILLOS	
<2%	Alta cantidad de camiones multiremolque (>10%)	Predominan camiones con un solo remolque	5
		Alto porcentaje de camiones con un solo remolque, pero algunos camiones sencillos	8
		Muchos camiones de diferente tipo, pero la mayoría son con un solo remolque	11
		Muchos camiones de diferente tipo, pero igual cantidad de un solo remolque y sencillos	13
		Predominan camiones sencillos	16
	Moderada cantidad de camiones multiremolque (2-10%)	Predominan camiones con un solo remolque	3
		Muchos camiones de diferente tipo, pero predominan los de un solo remolque	7
		Muchos camiones de diferente tipo, pero igual cantidad de un solo remolque y sencillos	10
		Predominan camiones sencillos	15
	>2%	Baja cantidad a ninguno (<2%)	Predominan camiones con un solo remolque
Alto porcentaje de camiones con un solo remolque, pero algunos camiones sencillos			2
Alto porcentaje de camiones con un solo remolque, pero moderados camiones sencillos			4
Muchos camiones de diferente tipo, pero la mayoría son con un solo remolque			6
Muchos camiones de diferente tipo, pero igual cantidad de un solo remolque y sencillos			9
Muchos camiones de diferente tipo, pero la mayoría son sencillos			12
Predominan camiones sencillos			14
>25%	Baja cantidad a ninguno (<2%)	Muchos camiones de diferente tipo, pero igual cantidad de un solo remolque y sencillos	17

Tabla 2.5.12 Guía sugerida para la selección de los grupos de TTC, para diferentes clases de vías

CLASE DE VÍA	GRUPOS DE TTC APLICABLES
Arterias principales - rutas intermunicipales y de defensa	1,2,3,4,5,8,11,13
Arterias principales - rutas intermunicipales incluyendo autopistas y vías expresas	1,2,3,4,6,7,8,9,10,11,12,14,16
Arterias menores	4,6,8,9,10,11,12,15,16,17
Colectoras principales	6,9,12,14,15,17
Colectoras menores	9,12,14,17
Rutas locales o calles	9,12,14,17

*Factor de distribución horaria (HDF):* El factor de distribución horaria (HDF), representa el porcentaje del tráfico promedio anual de camiones, en los dos sentidos (AADT), en cada hora del día.

Tabla 2.5.13 Determinación del factor de distribución horario

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1	Determinado de la información de peso y clasificación del sitio específico
2	Determinado de la información de peso, clasificación y conteos de la región del proyecto
3	Determinado de información nacional de pesos, clasificación y conteos o basados en experiencias locales.

Para cualquiera de los niveles, el factor de distribución horaria (HDF), debe ser calculado de la siguiente manera:

- 1) Determinar el número total de camiones, en cada hora, de la muestra diaria.
- 2) Promediar el número de camiones, de cada una de las 24 horas del día, de la muestra total. Por ejemplo, si se tiene información del número total de camiones de 6 am a 7 am durante 6 días, entonces se deben sumar los seis datos y dividir entre seis.
- 3) Sumar los promedios obtenidos en el paso 2, de las 24 horas del día.
- 4) Divida cada promedio del paso 2 entre el total del paso 3, y multiplique por 100.

La suma de los HDF en cada incremento de tiempo debe ser igual a 100.

Los valores por defecto del factor de distribución horario (HDF), utilizados por el software de diseño (Nivel 3), fueron determinados de los datos del Long Term Pavement Performance (LTPP).

Tabla 2.5.14 Valores por defecto del factor de distribución horario (HDF)

HORA	PORCENTAJE	HORA	PORCENTAJE
12 a.m. - 1 a.m.	2.3	12 p.m. - 1 p.m.	5.9
1 a.m. - 2 a.m.	2.3	1 p.m. - 2 p.m.	5.9
2 a.m. - 3 a.m.	2.3	2 p.m. - 3 p.m.	5.9
3 a.m. - 4 a.m.	2.3	3 p.m. - 4 p.m.	5.9
4 a.m. - 5 a.m.	2.3	4 p.m. - 5 p.m.	4.6
5 a.m. - 6 a.m.	2.3	5 p.m. - 6 p.m.	4.6
6 a.m. - 7 a.m.	5.0	6 p.m. - 7 p.m.	4.6
7 a.m. - 8 a.m.	5.0	7 p.m. - 8 p.m.	4.6
8 a.m. - 9 a.m.	5.0	8 p.m. - 9 p.m.	3.1
9 a.m. - 10 a.m.	5.0	9 p.m. - 10 p.m.	3.1
10 a.m. - 11 a.m.	5.9	10 p.m. - 11 p.m.	3.1
11 a.m. - 12 p.m.	5.9	11 p.m. - 12 a.m.	3.1

*Factor de crecimiento:* Los factores de crecimiento son bien estimados cuando se cuenta con información continua de conteo de tránsito (considerándola confiable y que los cambios año a año sean debido a factores normales). Un factor de crecimiento de menor calidad puede ser obtenido de datos tomados de conteos de corta duración, siempre y cuando estos sean de diferentes días y no seguidos. Se recomienda utilizar datos de conteos de corta y larga duración o datos del sitio específico con datos de la región.

El software de diseño permite utilizar tres (3) funciones de crecimiento:

Tabla 2.5.15 Funciones de crecimiento manejadas por el software de diseño

DESCRIPCIÓN DE LA FUNCIÓN	MODELO
Sin crecimiento	$AADT_f = AADT_i * 1.0$
Crecimiento lineal	$AADT_f = m * t + AADT_i$
Crecimiento compuesto	$AADT_f = AADT_i * (m)^t$

- $AADT_f$  = Tráfico promedio anual de camiones, en los dos sentidos, futuro.
- $AADT_i$  = Tráfico promedio anual de camiones, en los dos sentidos, inicial.
- $m$  = factor propio de la ecuación.
- $t$  = tiempo en años.

El software de diseño permite introducir tanto factores de crecimiento como funciones de crecimiento. Una función o factor de crecimiento puede ser elegido para todos los camiones o cada camión puede tener su propio factor o función de crecimiento.

### 2.5.5.3 Factor de distribución de carga:

El factor de distribución de carga representa el porcentaje del total de aplicaciones en cada uno de los intervalos de carga, de cada eje y clase de vehículo. Los intervalos de carga se realizan de la siguiente forma:

- Eje simple = de 3.000 lb a 40.000 lb en intervalos de 1.000 lb en 1.000 lb.
- Eje tandem = de 6.000 lb a 80.000 lb en intervalos de 2.000 lb en 2.000 lb.
- Eje tridem = de 12.000 lb a 102.000 lb en intervalos de 3.000 lb en 3.000 lb.

El espectro de carga solo puede ser determinado de información de pesaje y su exactitud depende de la fuente de donde fue tomada la información. El espectro es un factor muy importante en procedimientos mecánico - empíricos de diseño, éste debe ser anual debido a que no se presentan mayores cambios entre el análisis mes a mes o el análisis año a año, según las investigaciones realizadas con información del Long Term Pavement Performance (LTPP).

Tabla 2.5.16 Estimación del factor de distribución de carga

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1	Determinado con la información de pesaje del sitio específico
2	Determinado con la información de pesaje de la región
3	Determinado con la información de pesaje del país

El factor de distribución de carga se determina con base en la información de pesaje, de la siguiente manera:

- 1) Organice la información anual y determine el porcentaje de ejes que pertenecen a cada intervalo de carga, de cada clase de eje y clase de vehículo.
- 2) Calcule el promedio y la varianza de cada intervalo de carga, de cada clase de eje y clase de vehículo. Estos parámetros son importantes para ver cambios en el comportamiento anual.
- 3) Compare los espectros de carga anuales de la clase de camiones que más repeticiones presenta. Si no presentan cambios significativos, los valores pueden promediarse, para obtener una distribución estándar de cada tipo de eje; mientras que, si se presentan cambios significativos, los datos deben manejarse por separado y el diseñador puede:
  - Decidir cuál de todas utilizar para el año base y todo el periodo de diseño.
  - Seleccionar las distribuciones de algunos años y combinarlas.
  - Determinar cómo cambia la distribución con el tiempo y predecir los valores futuros.

Los valores por defecto de los factores de distribución de carga, proporcionados por la guía para los ejes simples y tandem, son los siguientes:

Tabla 2.5.17 Valores por defecto de los factores de distribución de carga en ejes simples

CARGA (lb)	CLASE DE VEHÍCULOS									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
3.000	1.80	10.03	2.47	2.14	11.62	1.74	3.64	3.55	6.68	8.88
4.000	0.96	13.19	1.78	0.55	5.36	1.37	1.24	2.91	2.29	2.67
5.000	2.91	16.40	3.45	2.42	7.82	2.84	2.36	5.19	4.87	3.81
6.000	3.99	10.69	3.95	1.70	6.98	3.53	3.38	5.27	5.86	5.23
7.000	6.80	8.21	6.70	3.21	7.98	4.93	5.18	6.32	5.97	6.03
8.000	11.45	8.26	8.44	5.81	9.69	8.43	8.34	6.97	8.85	8.10
9.000	11.28	7.11	11.93	5.26	9.98	13.66	13.84	8.07	9.57	8.35
10.000	11.04	5.84	13.55	7.38	8.49	17.66	17.33	9.70	9.95	10.69
11.000	9.86	4.53	12.12	6.85	6.46	16.69	16.19	8.54	8.59	10.69
12.000	8.53	3.46	9.47	7.41	5.18	11.63	10.30	7.28	7.09	11.11
13.000	7.32	2.56	6.81	8.99	4.00	6.09	6.52	7.16	5.86	7.34
14.000	5.55	1.92	5.05	8.15	3.38	3.52	3.94	5.65	6.58	3.78
15.000	4.23	1.54	2.74	7.77	2.73	1.91	2.33	4.77	4.55	3.10
16.000	3.44	1.19	2.66	6.84	2.19	1.55	1.57	4.35	3.63	2.58
17.000	2.54	0.90	1.92	5.67	1.83	1.10	1.07	3.56	2.56	1.52
18.000	4.98	0.68	1.43	4.63	1.53	0.88	0.71	3.02	2.00	1.32
19.000	4.53	0.52	1.07	3.50	1.16	0.73	0.53	2.06	1.54	1.00
20.000	4.49	0.40	0.82	2.64	0.97	0.53	0.32	1.63	0.98	0.83
21.000	4.46	0.31	0.64	1.90	0.61	0.38	0.29	1.27	0.71	0.64
22.000	0.66	0.31	0.49	1.31	0.55	0.25	0.19	0.76	0.51	0.38
23.000	0.56	0.18	0.38	0.97	0.36	0.17	0.15	0.59	0.29	0.52
24.000	0.37	0.14	0.26	0.67	0.26	0.13	0.17	0.41	0.27	0.22
25.000	0.34	0.15	0.24	0.43	0.19	0.08	0.09	0.25	0.19	0.13
26.000	0.48	0.12	0.13	1.18	0.16	0.06	0.05	0.14	0.15	0.26
27.000	0.48	0.08	0.13	0.26	0.11	0.04	0.03	0.21	0.12	0.28
28.000	0.44	0.05	0.08	0.17	0.08	0.03	0.02	0.07	0.08	0.12
29.000	0.08	0.05	0.08	0.17	0.05	0.02	0.03	0.09	0.09	0.13
30.000	0.05	0.02	0.05	0.08	0.04	0.01	0.02	0.06	0.02	0.05
31.000	0.04	0.02	0.03	0.72	0.04	0.01	0.03	0.03	0.03	0.05
32.000	0.04	0.02	0.03	0.06	0.12	0.01	0.01	0.04	0.01	0.08
33.000	0.04	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.06
34.000	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
35.000	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
36.000	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
37.000	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
38.000	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01
39.000	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
40.000	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00
41.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 2.5.18 Valores por defecto de los factores de distribución de carga en ejes tandem

CARGA (lb)	VEHICULO / CLASE DE CAMIÓN									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
6.000	5.88	7.06	5.28	13.74	18.95	2.78	2.45	7.93	5.23	6.41
8.000	1.44	35.42	8.42	6.71	8.05	3.92	2.19	3.15	1.75	3.85
10.000	1.94	13.23	10.81	6.49	11.15	6.51	3.65	5.21	3.35	5.58
12.000	2.73	6.32	8.99	3.46	11.92	7.61	5.40	8.24	5.89	5.66
14.000	3.63	4.33	7.71	7.06	10.51	7.71	6.90	8.88	8.72	5.73
16.000	4.96	5.09	7.50	4.83	8.25	7.00	7.51	8.45	8.37	5.53
18.000	7.95	5.05	6.76	4.97	6.77	5.82	6.99	7.08	9.76	4.90
20.000	11.58	4.39	6.06	4.58	5.32	5.59	6.61	5.49	10.85	4.54
22.000	14.20	2.31	5.71	4.26	4.13	5.16	6.26	5.14	10.78	6.45
24.000	13.14	2.28	5.17	3.85	3.12	5.05	5.95	5.99	7.24	4.77
26.000	10.75	1.53	4.52	3.44	2.34	5.28	6.16	5.73	6.14	4.34
28.000	7.47	1.96	3.96	6.06	1.82	5.53	6.54	4.37	4.93	5.63
30.000	5.08	1.89	3.21	3.68	1.58	6.13	6.24	6.57	3.93	7.24
32.000	3.12	2.19	3.91	2.98	1.20	6.34	5.92	4.61	3.09	4.69
34.000	1.87	1.74	2.12	2.89	1.05	5.67	4.99	4.48	2.74	4.51
36.000	1.30	1.78	1.74	2.54	0.94	4.46	3.63	2.91	1.73	3.93
38.000	0.76	1.67	1.44	2.66	0.56	3.16	2.79	1.83	1.32	4.20
40.000	0.53	0.38	1.26	2.50	0.64	2.13	2.24	1.12	1.07	3.22
42.000	0.52	0.36	1.01	1.57	0.28	1.41	1.69	0.84	0.58	2.28
44.000	0.30	0.19	0.83	1.53	0.28	0.91	1.26	0.68	0.51	1.77
46.000	0.21	0.13	0.71	2.13	0.41	0.59	1.54	0.32	0.43	1.23
48.000	0.18	0.13	0.63	1.89	0.20	0.39	0.73	0.21	0.22	0.85
50.000	0.11	0.14	0.49	1.17	0.14	0.26	0.57	0.21	0.22	0.64
52.000	0.06	0.20	0.39	1.07	0.11	0.17	0.40	0.07	0.23	0.39
54.000	0.04	0.06	0.32	0.87	0.06	0.11	0.38	0.13	0.20	0.60
56.000	0.08	0.06	0.26	0.81	0.05	0.08	0.25	0.15	0.12	0.26
58.000	0.01	0.02	0.19	0.47	0.03	0.05	0.16	0.09	0.07	0.18
60.000	0.02	0.02	0.17	0.49	0.02	0.03	0.15	0.03	0.19	0.08
62.000	0.10	0.01	0.13	0.38	0.06	0.02	0.09	0.06	0.09	0.14
64.000	0.01	0.01	0.08	0.24	0.02	0.02	0.08	0.01	0.04	0.07
66.000	0.02	0.01	0.06	0.15	0.02	0.02	0.06	0.01	0.02	0.08
68.000	0.01	0.00	0.07	0.16	0.00	0.02	0.05	0.01	0.04	0.03
70.000	0.01	0.02	0.04	0.06	0.00	0.01	0.11	0.00	0.12	0.01
72.000	0.00	0.01	0.04	0.13	0.00	0.01	0.04	0.00	0.01	0.04
74.000	0.00	0.00	0.02	0.06	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02
76.000	0.00	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.04
78.000	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02
80.000	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
82.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

#### 2.5.5.4 Información general:

La información general define la configuración de eje y detalles de cargas

*Localización promedio de la llanta:* Distancia desde el borde del pavimento hasta la marca de la llanta.

Tabla 2.5.19 Estimación de la localización promedio de la llanta

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1	Determinado a través de la medición en el sitio
2	Determinado como promedio de mediciones en carreteras similares de la región
3	Determinado como promedio nacionales o basado en experiencias locales

El valor por defecto, proporcionado por el software de diseño (Nivel 3), es de 18 pulgadas (45.72 cm).

*Desviación de las llantas que se salen del promedio:* Esta es la desviación lateral del tránsito, con respecto a la marca de la llanta promedio. Esta desviación es utilizada para determinar el número de aplicaciones de carga sobre un punto, para predecir los esfuerzos y comportamiento.

Tabla 2.5.20 Estimación de la desviación de las llantas que se salen del promedio

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1	Determinado a través de la medición en el sitio
2	Determinado como promedio de mediciones en carreteras similares de la región
3	Determinado como promedio nacionales o basado en experiencias locales

El valor por defecto, proporcionado por el software de diseño (Nivel 3), es de 10 pulgadas (25.4 cm).

*Ancho de carril:* Es definido como la distancia entre líneas que demarcan el carril, este puede ser igual o no al ancho de la losa.

El valor por defecto, proporcionado por el software de diseño (Nivel 3), es de 12 pies (3.6 m).

*Número de ejes por camión:* Representa el número promedio de ejes para cada clase de camión (simples, tandem y tridem).



Tabla 2.5.21 Estimación del número de ejes por camión

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1	Determinado con el análisis de los datos de peso, clasificación o conteos del sitio específico
2	Determinado con el análisis de los datos de peso, clasificación o conteos de la región del proyecto
3	Determinado con el análisis de los datos de peso, clasificación o conteos del país.

*Configuración de ejes:* Una serie de datos son necesarios para describir la configuración de las llantas típicas y pesos de eje que pueden ser aplicados en una carretera, debido a que la respuesta del pavimento es muy sensible a estas variables. Estos datos se pueden obtener de los constructores o midiéndolos en el campo.

Los valores típicos son proporcionados para cada tipo de eje, aunque se recomienda medirlos en campo:

- Ancho promedio de los ejes = 8.5 pies (2.55 m) (distancia entre los extremos del eje).
- Separación entre llantas de un eje dual = 12 pulgadas (30.48cm).
- Separación entre ejes = 51.6 pulgadas (1.31 m) para ejes tandem.  
49.2 pulgadas (1.25 m) para ejes tridem.

Para el análisis de pavimentos con juntas (JCPC), el espaciamiento entre el primer eje y el segundo (y tercero en caso de ejes tridem) es utilizado para determinar la posición crítica de los ejes sobre la losa de concreto.

Valores por defecto de separación de ejes (Nivel 3), se han encontrado con la información de pesaje del Long Term Pavement Performance (LTPP).

Tabla 2.5.22 valores de espaciamento entre el primer eje y los demás ejes

CLASE DE CAMIÓN	ESPACIAMIENTO ENTRE EJES		
	ESPACIAMIENTO PROMEDIO (pies)	MEDIANA (pies)	OCURRENCIA DE PICOS (pies)
4	29.9	29.9	26.9 y 30.5
5	19.7	18.7	16.1
6	20.7	21.0	21.7
7	15.7	15.1	14.8
8	13.8	16.1	16.1
9	19.4	20.0	15.1 y 22.0
10	20.3	21.0	23.3
11	17.7	16.4	16.7
12	18.0	17.4	15.1 y 21.7
13	17.7	16.4	15.7 y 23.0

*Wheelbase:* Una serie de elementos son necesarios para describir a detalle las características de los vehículos y realizar los cálculos de respuesta del pavimento. Estos datos pueden ser obtenidos directamente de los datos de los fabricantes o medidos en campo. Valores típicos son presentados a continuación, pero se recomienda usar los datos del sitio:

Separación promedio de ejes para camiones con uno o varios remolques= se recomiendan 12 pies (3.6 m), 15 pies (4.5 m) y 18 pies (5.4 m) para remolques cortos, medianos y grandes respectivamente.

*Dimensiones de llantas y presiones de inflado:* Las dimensiones de las llantas y presiones de inflado son dos parámetros importantes para los modelos de predicción del comportamiento de las estructuras de pavimento.

La información fue tomada de las principales fabricas de llantas y entidades reguladoras, como: Tire and Rime Association (TRA), Rubber Manufacturers Association (RMA), American Trucking Association (ATA) y Truck Trailer Manufacturers Association (TTMA), al igual que, del libro anual de la TRA (1999). Estas dimensiones fueron utilizadas para determinar el espaciamento de las llantas en un sistema dual.

Tabla 2.5.23 Anchos de llantas y espaciamento mínimo en sistemas duales

TAMAÑO	ESPACIAMIENTO MÍNIMO (Pulg)	ANCHO DE LA LLANTA (Pulg)	
		NUEVO	MÁXIMO
295/75 R 22.5	13.5	11.7	12.5
11 R 22.5	12.5	11.0	12.0
11 R 24.5	12.5	11.0	12.0
285/75 R 24.5	12.5	11.1	11.7
11 R 22.5	12.5	11.0	12.0
11 R 24.5	12.5	11.0	12.0
225/70 R 19.5	10.0	8.9	9.5
255/70 R 22.5	11.5	10.0	10.5

Tabla 2.5.24 Presión de inflado y carga máxima en sistemas duales

TAMAÑO	PRESIÓN DE INFLADO (PSI)		CARGA MÁXIMA (Lb)	
	SIMPLE	DUAL	SIMPLE	DUAL
295/75 R 22.5	110	110	6.200	5.700
11 R 22.5	104	104	6.200	5.900
11 R 24.5	104	104	6.600	6.000
285/75 R 24.5	110	110	6.200	5.700
11 R 22.5	120	120	6.600	6.000
11 R 24.5	120	120	7.200	6.600
225/70 R 19.5	96	96	3.600	3.400
255/70 R 22.5	120	120	5.500	5.100

### 2.5.6 Proceso de introducción de datos

Los datos del tránsito mencionados en este capítulo, son usados para el cálculo de la respuesta estructural del pavimento debido a la aplicación de cargas. La salida del software es el número de aplicaciones de cargas aplicadas, en incrementos de tiempo (hora o mensual), en un punto del pavimento a lo largo de su vida útil. El resultado final contiene los siguientes datos:

- Número de ejes simples.
- Número de ejes tandem.
- Número de ejes tridem.
- Número de camiones con remolque (para cálculos de fisuración en pavimentos de juntas JCPC).

A continuación se describen los ocho principales parámetros que se necesita entrar en el software de diseño:

- 1) Determinar el incremento de tiempo (hora o mes).
- 2) Determinación del Tráfico promedio anual de camiones, en los dos sentidos (AADT), para el año base.
- 3) Determinar la distribución de camiones para el año base.
- 4) Determinar el número de ejes, de cada tipo de eje y clase de camión.
- 5) Determinar el espectro de carga de cada eje, de cada tipo de eje y clase de camión.
- 6) Decida la función de crecimiento del tránsito y revise el incremento anual durante el periodo de diseño.
- 7) Multiplicar el espectro de carga por el espectro de clase de camiones para determinar el número total de aplicaciones de cada eje, en cada intervalo de carga, de cada tipo de eje, para cada periodo de tiempo durante el periodo de diseño.
- 8) Especificar detalles de los ejes y las llantas.

#### 2.5.6.1 Determinar el incremento de tiempo:

Los datos de tránsito deben ser divididos en periodos de análisis. Un incremento puede ser definido de diferentes maneras, pero se recomienda 1 hora o 1 mes, para simplificar los cálculos ya que todos los datos tienen estos mismos incrementos.

#### 2.5.6.2 Determinación del tráfico promedio anual de camiones, en los dos sentidos (AADT), para el año base:

Este paso ya fue explicado en la sección 2.5.5.1 Tráfico promedio anual de camiones, en los dos sentidos (AADT), de este capítulo.

#### 2.5.6.3 Determinar la distribución de camiones para el año base:

Este paso es para determinar la distribución del número de camiones, por clase de vehículo, y para determinar si estos cambian en el tiempo.

#### 2.5.6.4 Determinar el número de ejes, de cada tipo de eje y clase de camión:

El número de ejes, de cada tipo de eje y clase de camión, puede ser determinado del análisis de los datos de pesaje, descritos en este capítulo, para calcular el número de ejes, de cada tipo de eje (simple, tandem, tridem), dividiéndolos para cada clase de camión (generalmente no depende de las condiciones del sitio y las condiciones específicas).

#### 2.5.6.5 Determinar el espectro de carga de cada eje, de cada tipo de eje y clase de camión:

En este paso se determina el espectro de carga de cada eje, de cada tipo de eje y clase de camión, los cuales son normalizados anualmente porque no hay diferencia significativa entre el análisis con datos mes a mes o año a año, según estudios realizados con datos del Long Term Pavement Performance (LTPP).

#### 2.5.6.6 Definir la función de crecimiento del tránsito y revise el incremento anual durante el periodo de diseño:

Los datos de tránsito del año base son estimados de datos de series históricas de tránsito. Los datos del año base son modificados para determinar futuros crecimientos, que reflejan cambios en las condiciones locales. Mientras los datos puedan ser medidos en el campo, se recomienda este procedimiento ya que la mala predicción de estos cambios puede ser altamente dañino. La estimación del tránsito futuro es complejo y riesgoso, por lo que se recomienda hacer un buen

análisis de los datos históricos y seleccionar la función que más se adapte a las condiciones particulares.

#### 2.5.6.7 Predecir el tránsito total futuro:

La distribución de carga de ejes y de distribución de camiones son combinadas con el número total de vehículos para determinar el número total de ejes, de cada intervalo de carga para cada tipo de eje y cada clase de vehículo, en el periodo de diseño.

La predicción se realiza de la siguiente manera:

- 1) El Tráfico promedio anual de camiones, en los dos sentidos (AADT), se multiplica por el factor de camión, y posteriormente se multiplica por el número de días del mes.
- 2) El resultado del paso 1 se multiplica por la distribución de camiones.
- 3) El resultado del paso 2 se multiplica por el número promedio de ejes de cada clase de camión.
- 4) El resultado del paso 3 se multiplica por el factor de distribución de carga por eje (intervalos de carga).

Las aplicaciones de carga de cada tipo de eje son sumados para todas las clases de camión y para todos los incrementos de tiempo, obteniendo de esta manera el número de aplicaciones en cada intervalo de carga, de cada tipo de eje.

Se debe hacer énfasis en el estudio de los ejes pesados ya que estos son los que realmente producen daño a las estructuras de pavimento.

#### 2.5.6.8 Determinar detalles de ejes y llantas:

Las recomendaciones fueron presentadas en la sección 2.5.5.4 de este capítulo.

#### 2.5.7 Plan de muestreo de peso y clasificación

En esta sección se proporciona una guía de requerimientos de un plan de muestreo para estimar las características del tránsito, en un segmento de carretera. Si se van a utilizar datos regionales o nacionales, para las entradas del software de diseño, se debe combinar información de sitios similares.

*Tamaño y frecuencia de la muestra:*

Los datos deben recolectarse de acuerdo a los procedimientos y equipos especificados por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Se pueden utilizar como base los siguientes criterios determinar el número de días para recolectar información de peso, clasificación de vehículos y conteos:

Tabla 2.5.25 tamaño mínimo de la muestra (días por año) para determinar la distribución de carga por eje - datos de peso

ERROR ESPERADO (%)	NIVEL DE CONFIANZA (%)				
	80	90	95	97.5	99
20	1	1	1	1	1
10	1	1	2	2	3
5	2	3	5	7	10
2	8	19	30	43	61
1	32	74	122	172	242

Tabla 2.5.26 tamaño mínimo de la muestra (días por año) para determinar la distribución de carga por eje - datos de clasificación

ERROR ESPERADO (%)	NIVEL DE CONFIANZA (%)				
	80	90	95	97.5	99
20	1	1	1	2	2
10	1	2	3	5	6
5	3	8	12	17	24
2	20	45	74	105	148
1	78	180	295	---	---

Tabla 2.5.27 tamaño mínimo de la muestra (días por año) para determinar la distribución de carga por eje - datos de conteos

ERROR ESPERADO (%)	NIVEL DE CONFIANZA (%)				
	80	90	95	97.5	99
20	3	7	12	16	23
10	12	27	45	64	90
5	47	109	179	254	---
2	292	---	---	---	---
1	---	---	---	---	---

*Datos de carga:* Se ha encontrado que la distribución de la carga es constante en el tiempo, por lo que la muestra debe ser de 1 año, a menos que la experiencia o los estudios indiquen cambios significativos.

*Datos de clasificación:*

Mínimo número de años de la muestra: El mínimo número de datos, incluidos en la muestra, debe ser de tres. Es posible excluir datos fuera de lo normal (picos).

*Muestras por temporadas:* El plan de muestreo debe ser consistente con el periodo usado para el análisis de daños. Se recomienda el uso de temporadas de un mes. Si no se cuenta con la información suficiente se toma la encontrada como representativa; sin embargo, la mayoría de agencias cuentan con la información suficiente.

*Plan de muestreo aleatorio:* Un plan de muestreo aleatorio debe ser implementado y desarrollado para identificar alguna diferencia mensual o anual que se presente con relación al tránsito proyectado.

*Datos de volumen:* La recolección de información del volumen del tránsito debe ser consistente con los datos de clasificación. La tabla 2.5.27 presenta el número de días por año para su determinación. El número de días debe ser dividido en días de semana y fines de semana.

## 2.6 DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES<sup>8</sup>

### 2.6.1 Introducción

Este capítulo describe el procedimiento mecánico - empírico para pavimentos flexibles nuevos. Para esta Guía, los pavimentos flexibles nuevos son definidos como sistemas de pavimento que tienen una superficie de concreto asfáltico, entre los cuales se encuentran:

- Pavimentos flexibles convencionales. Capas delgadas de mezcla asfáltica en caliente (HMA) sobre materiales granulares (base/subbase).
- Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (HMA) resistente y profunda. Capas gruesas de mezcla asfáltica en caliente (HMA) sobre capas granulares.
- Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (HMA) “full depth”. Secciones consistentes en capas de mezcla asfáltica en caliente (HMA) únicamente (superficie y bases estabilizadas).
- Pavimentos semirígidos. Secciones que tienen algún tipo de capa estabilizada bajo la capa de mezcla asfáltica en caliente (HMA).

La sección transversal de pavimento permitida incluye la sección transversal (materiales de menor calidad con la profundidad) y estructuras “sándwich” (agregados sin conglomerar colocados entre 2 capas estabilizadas).

Los procedimientos descritos en este capítulo son aplicables cuando los diseños contemplan pavimentos con mezcla asfáltica en caliente (HMA) densas. Los modelos de comportamiento desarrollados son validos para pavimentos construidos con este tipo de mezclas. Para pavimentos flexibles construidos con materiales como mezclas de asfalto de matriz rocosa (SMA), mezclas de asfalto modificado con polímeros (PMA) y mezclas asfálticas que contengan material de pavimento asfáltico reciclado (RAP), las herramientas descritas en este capítulo también pueden ser utilizadas pero usando el Nivel 1 relacionado con las entradas de la mezcla ya que la ecuación de comportamiento calibrada no tuvo en cuenta muchas secciones de prueba con este tipo de mezclas. En general, las mezclas modificadas son aplicables a esta metodología de diseño; sin embargo, un mayor juego de datos será eventualmente requerido para desarrollar un modelo de comportamiento calibrado para usar en diseño.

El diseño mecánico - empírico de pavimentos flexibles nuevos requiere un proceso iterativo por parte del diseñador. El diseñador debe seleccionar un modelo de prueba y luego analizar en detalle si este cumple con los criterios de

---

<sup>8</sup> Guide for Mechanistic - Empirical Design. NCHRP 1-37A. Part 3 Desing Analysis, Chapter 3 Design of New and Reconstructed Flexible Pavements, March 2004.



comportamiento establecidos, de no ser así éste debe modificarlo y reanalizar hasta que el modelo satisfaga todos los criterios. Los criterios considerados en esta Guía son: ahuellamiento (rutting), fisuras por fatiga (abajo - arriba y arriba - abajo), fisuración térmica, y rugosidad (IRI). El modelo que satisfaga los criterios de comportamiento establecidos es considerado como factible desde el punto de vista funcional y estructural y pueden ser considerados para otras evaluaciones como el análisis del ciclo de costo de vida.

Este capítulo proporciona una descripción detallada del proceso de diseño de pavimentos flexibles, incluyendo los siguientes temas:

- 1) Un esquema del procedimiento de diseño de pavimentos flexibles.
- 2) Entradas de diseño para pavimentos flexibles nuevos.
- 3) Procedimiento de diseño de pavimentos flexibles nuevos.
- 4) Consideraciones especiales de carga.
- 5) Calibración a condiciones locales.

El procedimiento descrito en esta Guía también puede ser utilizado en la reconstrucción de pavimentos flexibles, sin embargo, un aspecto importante es que en la reconstrucción el potencial uso de materiales existentes es un aspecto importante que debe ser tenido en cuenta.

#### 2.6.2 Esquema del procedimiento de diseño de pavimentos flexibles

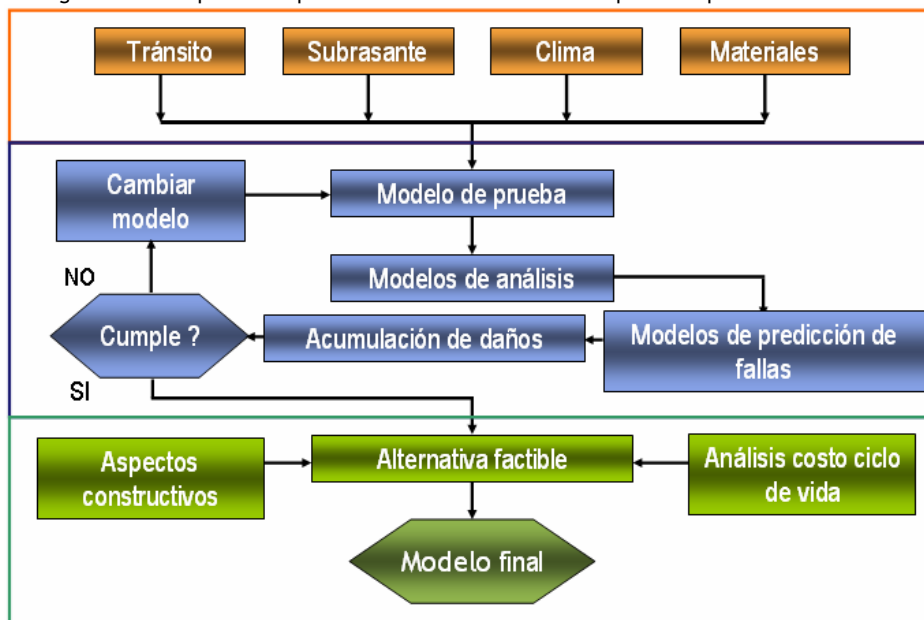
El proceso iterativo de diseño de pavimentos flexibles es ilustrado en la figura 2.6.1, los principales pasos del proceso de diseño son:

- Organizar un modelo de prueba para las condiciones específicas del sitio. Defina las propiedades de la capa de subrasante, de las capas granulares y de la capa de concreto asfáltico, además, defina las cargas del tráfico, condiciones climáticas y aspectos relacionados con el tipo de pavimento, el diseño y la construcción.
- Establecer criterios para aceptar el comportamiento del pavimento al final de su vida útil (niveles de ahuellamiento, de fisuras por fatiga, de fisuras térmicas y de IRI).
- Seleccionar el nivel de confianza deseado para cada uno de los comportamientos evaluados.
- Procesar los datos de entrada para obtener valores mensuales del tránsito y las variaciones de las propiedades de los materiales y el clima, necesarios para la evaluación a lo largo del periodo de diseño.
- Calcular la respuesta estructural (esfuerzos y deformaciones) usando la teoría elástica multicapa o elementos finitos basándose en modelos de respuesta de

pavimento para cada tipo de eje, magnitud de carga e incremento de tiempo durante el periodo de diseño.

- Calcular los daños o esfuerzos acumulados al final de cada incremento de tiempo analizado durante el periodo de diseño.
- Predecir los principales daños (ahuellamiento, fisuras por fatiga, fisuras térmicas) al final de cada incremento de tiempo analizado durante el periodo de diseño usando los modelos de comportamiento calibrados y proporcionados por la Guía.
- Predecir la rugosidad (IRI) en función del IRI inicial, daños calculados y factores de sitio al final de cada incremento de tiempo analizado durante el periodo de diseño.
- Evaluar el comportamiento esperado con el modelo de prueba con los niveles de confianza dados.
- Si el modelo de prueba no satisface los criterios de comportamiento, modifíquelo y repita el procedimiento hasta que cumpla con los criterios establecidos.

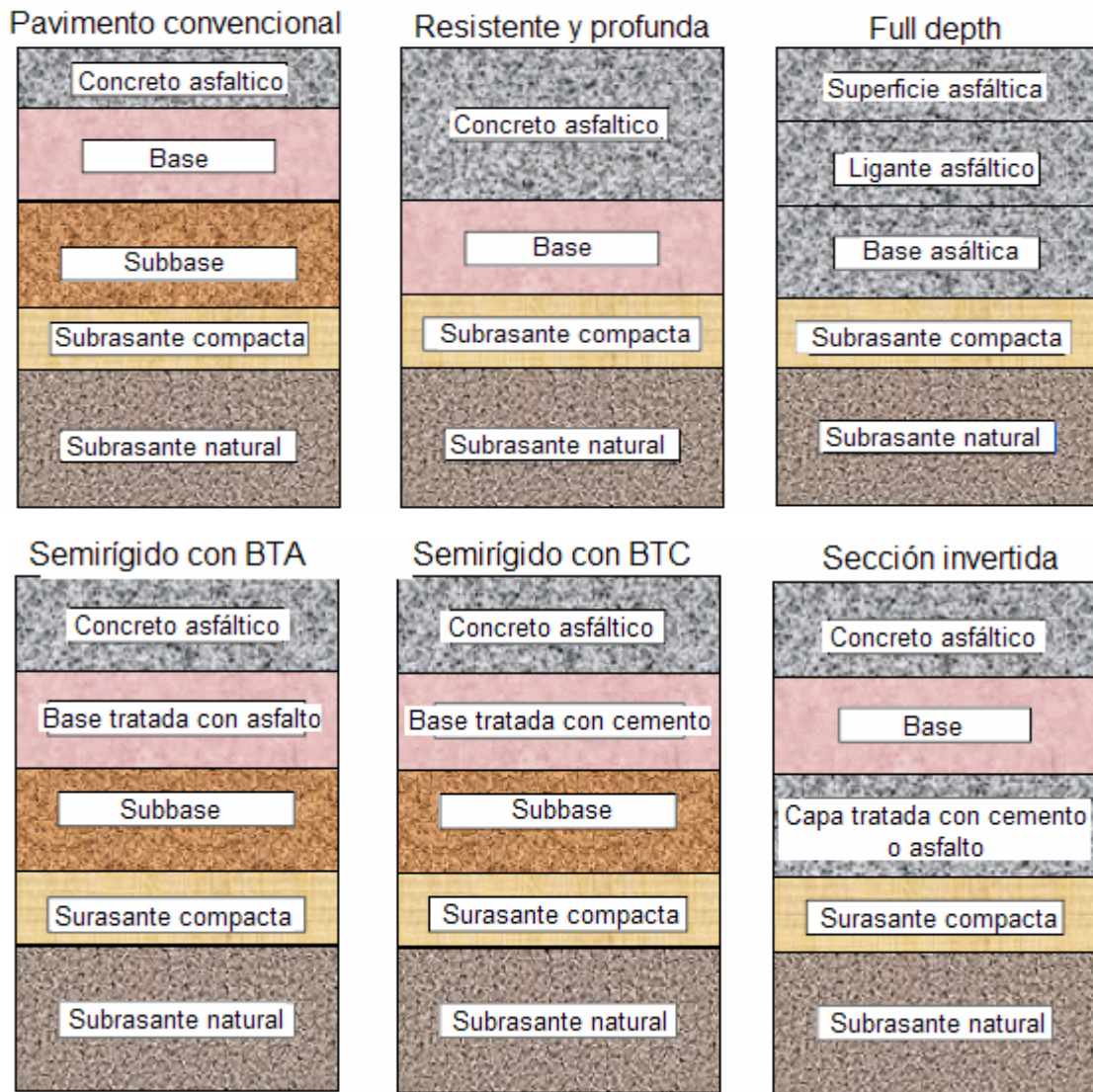
Figura 2.6.1. Esquema del proceso de diseño mecánico - empírico de pavimentos flexibles



### 2.6.2.1 Entradas de diseño

Entradas del modelo de prueba y condiciones del sitio: El procedimiento de diseño permite la posibilidad de considerar un amplio rango de secciones transversales. Un diseño aceptable es determinado por un análisis iterativo hasta alcanzar el cumplimiento de los criterios de comportamiento.

Figura 2.6.2 Tipos de pavimentos flexibles



Adicionalmente, el diseñador debe proporcionar información del sitio del proyecto como las propiedades de la subrasante (incluyendo la presencia de lecho rocoso), del tránsito y del clima. Existen otras entradas relacionadas a la construcción como la rugosidad inicial, el mes de construcción y el mes que se espera el pavimento sea abierto al tráfico.

Se tiene gran dificultad para obtener la información adecuada ya que la mayoría de datos por lo general no están disponibles durante la época de diseño y a menudo deben ser estimados con ventaja a la etapa de construcción. Los materiales usados en un proyecto no se conocen sino hasta pocas semanas antes que la construcción comience. El diseñador debe obtener la mayor información real como sea posible para obtener un diseño acorde a ésta. Además, el

diseñador debe realizar un análisis de sensibilidad para identificar los principales factores que afectan el comportamiento del pavimento y con base en estos realizar las recomendaciones de control necesarias.

Niveles de la información de entrada: Para la mayoría de los datos de entrada el diseñador puede elegir de múltiples niveles de calidad de la información (generalmente 3), los cuales son:

- Nivel 1 = Información de los materiales y/o sitio obtenidos por medio de ensayos de laboratorio o mediciones.
- Nivel 2 = Uso de correlaciones para establecer o determinar la información requerida.
- Nivel 3 = Uso de valores por defecto (nacionales o regionales) para la información requerida.

El nivel de calidad puede variar de parámetro a parámetro, teniendo en cuenta que el nivel elegido para cada parámetro puede tener un efecto significativo en el diseño, en los costos y en la veracidad.

Procesamiento de la información para un periodo de análisis: La información de entrada debe ser procesada para obtener valores parciales de tránsito, de materiales, de clima en cada incremento de tiempo. Los incrementos de tiempo generalmente son del orden de dos semanas para pavimentos flexibles y la información requerida para el análisis es:

- Número promedio de ejes simples, tandem y tridem en cada intervalo de carga.
- Temperatura en la capa de pavimento. Valores promedios de temperatura son usados para determinar la dependencia de temperatura de la rigidez del asfalto para la predicción del ahuellamiento y las fisuras por fatiga; mientras que, valores horarios de temperatura son necesarios para predecir las fisuras térmicas. Mínimo se requiere la información climática de 1 año.
- Valores promedios del módulo de las capas no conglomeradas (base, subbase y subrasante).

El Capítulo 2.5 Tránsito, describe con mayor detalle el cálculo del tránsito; mientras que, el Capítulo 2.4 Clima, describe mejor los aspectos relacionados con humedad y temperatura y los cambios de las propiedades de los materiales de la estructura del pavimento, el Capítulo 2.3 Materiales, describe con mayor detalle las propiedades de los materiales usados en la construcción de pavimentos flexibles, y el Capítulo 2.2 Subrasante, describe mejor las propiedades de la capa de subrasante.

### 2.6.2.2 Modelos de respuesta del pavimento

El propósito de los modelos de respuesta del pavimento es determinar la respuesta estructural de la estructura de pavimento debido a las cargas del tránsito y la influencia del medio ambiente. La influencia del medio ambiente puede ser directa (expansión y retracción térmica) o indirecta afectando las propiedades de los materiales (cambio en la rigidez).

Los resultados de los modelos de respuesta del pavimento son los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en las capas del pavimento. De interés particular son las respuestas críticas, como lo son:

- Esfuerzo horizontal de tracción en el fondo de la capa de mezcla asfáltica en caliente (HMA) (para fisuración por fatiga).
- Esfuerzo vertical de compresión en la capa de mezcla asfáltica en caliente (HMA) (para ahuellamiento).
- Esfuerzo vertical de compresión en las capas de base y subbase (para ahuellamiento).
- Esfuerzo vertical de compresión en la parte superior de la subrasante (para ahuellamiento).

Cada variable de respuesta del pavimento debe ser evaluada en la posición crítica dentro de la capa del pavimento en la cual el parámetro tenga el valor extremo. Para la carga de una sola rueda, la posición crítica puede ser determinada por inspección (ej: el mayor esfuerzo horizontal de tracción en la capa de mezcla asfáltica en caliente (HMA) es directamente debajo del centro de la rueda). La posición crítica para la carga de varias llantas y/o ejes será función de la configuración de carga y de la estructura de pavimento. Condiciones mixtas de tráfico complican el problema ya que la posición crítica en la estructura no será la misma para todos los tipos de vehículos y se debe buscar para cada uno de ellos.

Dos métodos de análisis de pavimentos flexibles han sido implementados en la Guía. El primero, es para casos en los cuales todos los materiales de la estructura de pavimento realmente puedan ser tratados como linealmente elásticos, donde una teoría elástica multicapa es usada para determinar la respuesta del pavimento. El segundo, es para casos en los cuales materiales no conglomerados (no lineales) también son utilizados, donde un procedimiento de elementos finitos es utilizado para determinar los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en el pavimento. Ninguno de los procedimientos desarrollados y discutidos en esta Guía han sido validados o calibrados con este método de análisis de respuesta estructural, por lo que será necesario para implementar completamente los métodos de elementos finitos en rutinas de diseño de pavimentos.

### 2.6.2.3 Acumulación de daños y esfuerzos

El diseño de prueba es analizado por conveniencia dividiéndolo en periodos cortos comenzando en el mes de apertura el tránsito. En cada incremento, todos los factores que afectan la respuesta del pavimento son dejados constantes:

- Niveles de tráfico.
- Módulo del dinámico.
- Módulo resiliente de la base y subbase.
- Módulo resiliente de la subrasante.

Los valores de esfuerzos y/o deformaciones son determinados para cada periodo de tiempo y posteriormente convertidos en daños. Cada incremento de daño es acumulado hasta llegar al final del periodo de análisis (vida útil del pavimento).

Las fisuras (arriba - abajo y abajo - arriba) son predichas en términos del índice de daño, el cual, es un parámetro mecanicista que representa la carga asociada al daño en la estructura de pavimento. Cuando el daño es pequeño (ej: 0.0001) se espera que la estructura de pavimento no presente fisuras significativas. El daño es acumulado usando las leyes de Miner y posteriormente convertido en fisuras físicas usando modelos calibrados que relacionan el daño obtenido con fisuras visibles, los cuales fueron obtenidos de información obtenida de un gran número de pavimentos flexibles localizados en una variedad de climas y sujetos a varias condiciones de tráfico.

Definiciones detalladas de varios de los daños presentes en pavimentos flexibles y considerados por la Guía, se describen a continuación.

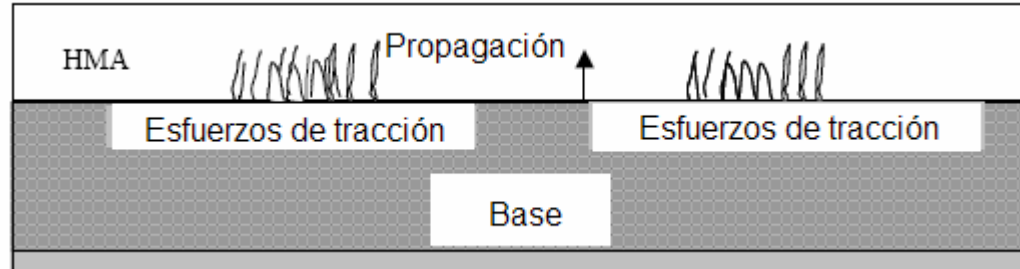
Fisuras abajo - arriba o piel de cocodrilo: Este tipo de fisura se presenta primero en la parte inferior en forma de una pequeña fisura longitudinal en la huella de la llanta que rápidamente se dispersa y se conecta en forma de piel de cocodrilo. Estas fisuras inician en el fondo de la capa de mezcla asfáltica en caliente (HMA) y se propaga a la superficie bajo la aplicación repetida de cargas.

Este tipo de fisura por fatiga surge de la repetida deformación de la capa de mezcla asfáltica en caliente (HMA), debido al esfuerzo horizontal de tracción en el fondo de ésta. Las principales razones por las que ocurre este daño son:

- Pequeñas capas de mezcla asfáltica en caliente (HMA) comparadas con las cargas aplicadas.
- Altas cargas y presiones de inflado.
- Zonas débiles en las capas granulares o en la subrasante.

- Capas de base o subbase débiles causadas por mala compactación o aumento en el nivel de la tabla de agua.

Figura 2.6.3 Fisuras abajo - arriba

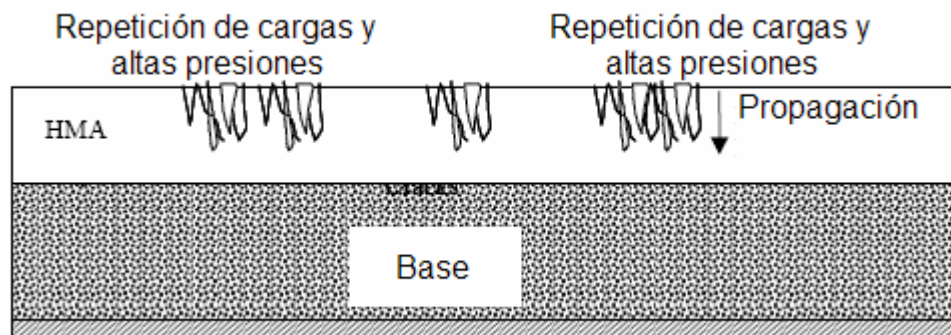


Fisuras arriba - abajo o fisuras longitudinales: A pesar de que la mayoría de fisuras son abajo - arriba, existe evidencia que sugiere que las fisuras relacionadas a las cargas inician en la superficie y se propagan hacia abajo. Hay varios mecanismos de este tipo de fisuras, entre los cuales están:

- La carga induce esfuerzos de tracción que causan fisuras en la superficie. El envejecimiento de las capas de mezcla asfáltica en caliente (HMA) aceleran la iniciación y propagación de estas fisuras.
- Los cortantes en la superficie de las capas de mezcla asfáltica en caliente (HMA) causadas por las llantas con altas presiones de inflado.
- Envejecimiento severo de la capa de mezcla asfáltica en caliente (HMA) produce alta rigidez que combinada con altas presiones y cargas causa el inicio y propagación de fisuras.

La Guía ha incorporado un modelo preliminar de fisuras arriba - abajo que considera grandes esfuerzos de tensión debidos a cargas y envejecimiento de la capa de mezcla asfáltica en caliente (HMA).

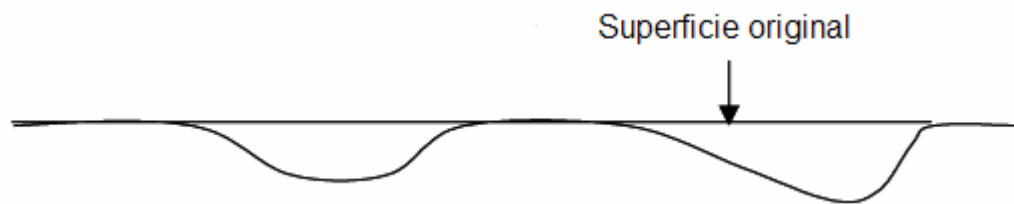
Figura 2.6.4. Fisuras arriba - abajo



**Deformación permanente o ahuellamiento (rutting):** Rutting es una depresión superficial en la huella de la llanta causada por la deformación plástica o inelástica en alguna o todas las capas del pavimento o la subrasante. La deformación plástica es resultado de:

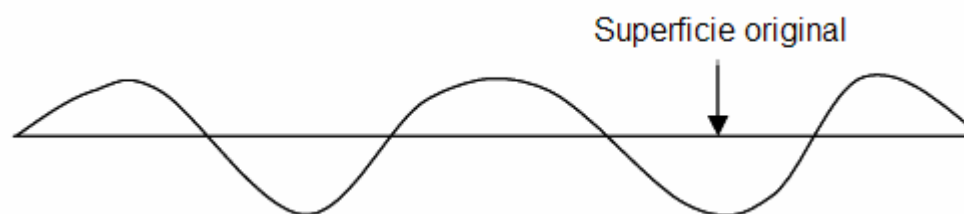
- La densificación o compresión y consolidación unidimensional. Un ahuellamiento causado por la densificación es una depresión cerca al centro de la huella de la rueda sin abultamientos en los lados de la depresión, causada por exceso de vacíos o inadecuada compactación de alguna de las capas del pavimento, y la aplicación de cargas.

Figura 2.6.5. Ahuellamiento por densificación



- Movimientos laterales o flujo plástico de los materiales. Un ahuellamiento causado por el flujo lateral de material es una depresión cerca al centro de la huella de la rueda con abultamientos a los lados de la depresión, causada por grandes esfuerzos cortantes y presencia de ahuellamiento por densificación. Este tipo de deformación es más complejo de medir y predecir en el laboratorio.

Figura 2.6.6. Ahuellamiento por flujo lateral de materiales



**Fisuras térmicas:** Las fisuras en pavimentos flexibles debidas a la retracción por los cambios de temperaturas, son referidas como fisuras térmicas. Generalmente, aparecen transversales a la línea central del pavimento, en la superficie.

Existen dos tipos de fisuras térmicas que no tienen relación con las cargas: las fisuras transversales y las de bloque. Las fisuras transversales ocurren primero seguidas de la ocurrencia de las de bloque por el envejecimiento del asfalto.



Las fisuras transversales son predichas por modelos en la Guía, mientras que las de bloque son manejadas con los materiales y las variables de construcción.

Fractura por fatiga en capas estabilizadas químicamente: Este tipo de falla es tenida en cuenta especialmente en pavimentos semirígidos. Para los propósitos de la Guía, las capas químicamente estabilizadas son de alta calidad y son tratadas con cemento, escorias o cal, las cuales, bajo la acción repetida de cargas genera microfisuras conduciendo a la reducción del módulo. Además, este tipo de fisuras se debe tener en cuenta porque se reflejaran en capas superiores. Por lo anterior, un buen diseño de la mezcla, un buen diseño estructural y buenas prácticas de construcción son necesarios para minimizar este tipo de falla.

Hay que anotar que la consideración de fracturas por fatiga de capas estabilizadas químicamente es opcional dependiendo de la posición de esta capa en la estructura del pavimento, ya que si ésta está muy profunda se puede obviar, mientras que si está superficial y expuesta a esfuerzos de tracción se debe tener en cuenta, lo cual conlleva a un mayor número de datos de entrada por esta capa. Por otra parte, cualquiera que sea su posición en la estructura su contribución estructural si es tenida en cuenta en la predicción del comportamiento.

#### 2.6.2.4 Predicción de la rugosidad (IRI)

El IRI a lo largo del periodo de diseño depende del perfil inicial después de la construcción y el consecuente desarrollo de fallas en el tiempo. Estas fallas incluyen ahuellamiento, fisuras arriba - abajo / abajo - arriba y fisuras térmicas. El modelo de IRI usa las fallas predichas usando los modelos incluidos en la Guía, IRI inicial y factores de sitio para la predicción del IRI en el tiempo. Los factores de sitio incluyen los factores de subrasante y clima. El IRI es calculado incrementalmente a lo largo del periodo de diseño.

#### 2.6.2.5 Evaluación del comportamiento y modificaciones del diseño

Los diseños factibles son obtenidos de la iteración del procedimiento de diseño mecanicista. El proceso involucra los siguientes pasos:

- Establecer los criterios de diseño. Niveles de aceptación al final de la vida útil y la confiabilidad de cada uno.
- Establecer la estructura de prueba.
- Predecir el comportamiento a lo largo del periodo de diseño.
- Evaluar el comportamiento predicho con relación a los requerimientos de diseño.

- Si los criterios de diseño no son satisfechos, revise el diseño y repita el procedimiento hasta que la estructura cumpla con los requerimientos propuestos.

#### 2.6.2.6 Confiabilidad del diseño

Una cantidad de incertidumbres y variables existen en el diseño y construcción de un pavimento, también como en la aplicación de cargas y los factores climáticos a lo largo del periodo de diseño. En el diseño mecánico - empírico las salidas son cantidades individuales de fallas, por lo tanto las fallas predichas son una variable aleatoria de interés en la confiabilidad del diseño. En la Guía la variabilidad asociada con la cantidad de fallas predichas es estimada con base en el análisis cuidadoso de las diferencias entre lo predicho y lo observado en campo. Para propósitos de diseño, la confiabilidad del diseño es establecido basado en el conocimiento de la variación de un comportamiento dado alrededor de la predicción promedia.

La confiabilidad del diseño para cada uno de los modelos de fallas de pavimentos flexibles es basada en el error estándar de estimaciones de cada modelo obtenido a través del proceso de calibración. La estimación del error incluye una combinación de variables de entrada y variables en el proceso de construcción.

El nivel de confiabilidad del diseño en esta Guía está dado por el nivel de confiabilidad de la falla que se desea evaluar encontrado al final del periodo de diseño. Por supuesto, una mayor confiabilidad del diseño implica un mayor costo inicial aunque el costo de mantenimiento disminuye.

#### 2.6.2.7 Estimación de costo del ciclo de vida

Después de que una estructura ha cumplido con los requerimientos estructurales y funcionales, ésta se convierte en un diseño técnicamente factible. En este punto el pavimento puede ser analizado para el costo del ciclo de vida y ser comparado con otros diseños técnicamente factibles. La predicción de fallas y del IRI de los diseños factibles pueden ser usados en la estimación de vida útil promedio y su desviación estándar, con base en las políticas de mantenimiento y rehabilitación definidas por el diseñador, las cuales se deben tener en cuenta en el análisis del costo del ciclo de vida del pavimento.

#### 2.6.3 Entradas de diseño para pavimentos flexibles nuevos

Los datos de entrada usados en este capítulo para el diseño de pavimentos flexibles nuevos se categorizan en:

- Información general.
- Identificación del sitio/proyecto.
- Parámetros de análisis.
- Tránsito.
- Clima.
- Propiedades de la superficie y drenaje.
- Estructura de pavimento.

Muchas de estas entradas son iguales a las utilizadas en el diseño de pavimentos rígidos nuevos, sin embargo, existen variaciones en la forma de procesar la información. El propósito de este capítulo es resumir la información necesaria para el diseño de pavimentos flexibles nuevos, con sus respectivos comentarios y cómo ella es relacionada con el diseño.

Muchos de los detalles de la descripción de las entradas se encuentran indicados en los capítulos:

Capítulo 2.2 - Subrasante

Capítulo 2.3 - Caracterización de materiales

Capítulo 2.4 - Efectos ambientales

Capítulo 2.5 - Tránsito

#### 2.6.3.1 Información general

La siguiente información define el periodo de análisis y tipo de estructura:

- Periodo de diseño. La vida esperada del pavimento (años).
- Mes de la construcción de la subbase y la base. El mes aproximado en el cual la subbase y la base será construída, éste sirve para definir el  $t = 0$  del modelo climático.
- Mes de construcción de la capa asfáltica. El mes aproximado en el cual la capa de rodadura será construída, éste sirve para definir el  $t = 0$  del modelo de envejecimiento de la capa asfáltica y el modelo de fisuración térmico.
- Mes de apertura al tránsito. El mes aproximado en el cual el pavimento es abierto al tránsito, éste sirve para definir las condiciones climáticas al momento de la apertura al tránsito y define el  $t = 0$  para los cálculos de fallas.
- Tipo de pavimento. Esta entrada determina el método de evaluación del diseño y los modelos de comportamiento a aplicar.

### 2.6.3.2 Identificación del sitio/proyecto

Este grupo de información incluye:

- Localización del proyecto.
- Identificación del proyecto: Identificación del proyecto, identificación del tramo, PR inicial y PR final, dirección del tráfico.
- Tipo de carretera: Las opciones son: carretera principal, carretera secundaria, carretera terciaria, calle local.

La localización del proyecto define las condiciones climáticas para el proyecto y el tipo de carretera influye en los criterios por defecto en el diseño (distribución de vehículos, velocidad de operación, entre otros).

### 2.6.3.3 Parámetros de análisis

IRI inicial: El IRI inicial define las condiciones de rugosidad del pavimento después de ser construido. Este parámetro depende de las especificaciones de construcción y tiene gran impacto en la calidad del pavimento a través del tiempo.

Criterios de comportamiento: El diseño de pavimentos flexibles está basado en fisuras por fatiga arriba - abajo, fisuras por fatiga abajo - arriba, fisuras térmicas, fisuras por fatiga en capas estabilizadas químicamente, deformación permanente en la capa de rodadura y toda la estructura de pavimento, y el IRI. El diseñador puede seleccionar algunos de estos indicadores y establecer criterios para evaluar el diseño y realizar las modificaciones necesarias. Los criterios de comportamiento de cada indicador dependerán de cada agencia encargada de las vías, además dependerá de la confiabilidad del diseño, el cual, a su vez depende de la importancia de la vía.

Fisuras por fatiga arriba - abajo: Este tipo de fisuras se manifiestan como fisuras longitudinales en el borde de la huella de la rueda, la cual, permiten la entrada del agua a las capas inferiores provocando fallas estructurales en el pavimento y desfavorece la rugosidad.

El criterio de comportamiento de este tipo de falla está definido por la máxima longitud permitida de fisuras en 1 milla al final del periodo de diseño.

A pesar que la calibración del modelo de fisura por fatiga arriba - abajo fue hecha con base en 500 secciones los resultados son extrapolados y dados en pies/millas.

Fisuras por fatiga abajo - arriba: Este tipo de fisuras se manifiestan como piel de cocodrilo en la huella de la rueda, la cual, permite la entrada del agua a las capas inferiores provocando fallas estructurales en el pavimento y desfavorece la rugosidad.

El criterio de comportamiento de este tipo de falla está definido por el porcentaje máximo de área con piel de cocodrilo con relación al área del carril al final del periodo de diseño.

Fisuras térmicas: Este tipo de fisuras se manifiestan como fisuras transversales separadas a lo largo de la superficie del pavimento, inducidas por cambios climáticos rápidos y la cual permite la entrada del agua a las capas inferiores provocando fallas estructurales en el pavimento y desfavorece la rugosidad.

El criterio de comportamiento de este tipo de falla está definido por la máxima longitud permitida de fisuras transversales por Km de pavimento al final del periodo de diseño.

A pesar que la calibración del modelo de fisura por fatiga arriba - abajo fue hecha con base en 500 secciones los resultados son extrapolados y dados en pies/millas.

Fisuras por fatiga de capas estabilizadas: Este tipo de fisuras reduce el soporte proporcionado a las capas superiores del pavimento y acelera las fallas especialmente de la capa asfáltica (fisuras por fatiga abajo - arriba y arriba - abajo), las cuales, llevarán a fallas estructurales y desfavorece la rugosidad.

El criterio de comportamiento de este tipo de falla está definido por el índice de daño.

Deformación permanente total: Este tipo de deformación (ahuellamiento) se manifiesta en la huella de la rueda y es la acumulación de la deformación presentada en todas y cada una de las capas de la estructura de pavimento. Este tipo de falla es la que más desfavorece la rugosidad y puede generar problemas funcionales como el hidroplaneo y al momento de hacer cambios de carril.

El criterio de comportamiento de este tipo de falla está definido por la máxima profundidad en la huella de la rueda.

Rugosidad: La funcionalidad de una carretera es medida con la rugosidad, la cual, maneja el confort del viaje, tiempos y costos de operación. La rugosidad está definida como “la variación de elevación de la superficie que induce vibración a los vehículos”. El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) es la forma

más usada para medir la rugosidad en los pavimentos. Aunque las fallas estructurales son importantes los usuarios relacionan la rugosidad con la necesidad de reparaciones en la carretera.

El criterio de comportamiento de este tipo de falla está definido por el IRI al final del periodo de diseño.

#### 2.6.3.4 Tránsito

Los datos del tránsito son uno de los principales elementos en el análisis y diseño de pavimentos. Este dato está especificado y resumido en el actual espectro de carga de los ejes simples, tandem y tridem (Ver Capítulo 2.5 - Tránsito). También se pueden manejar configuraciones de ejes especiales, que están sujetos a permisos especiales. Este es un punto importante ya que permite conocer el daño causado por el paso de 1 ó varios vehículos especiales por la estructura del pavimento.

Información básica: Tráfico promedio diario anual de camiones (TPDcamiones). Número total de vehículos pesados en el tránsito.

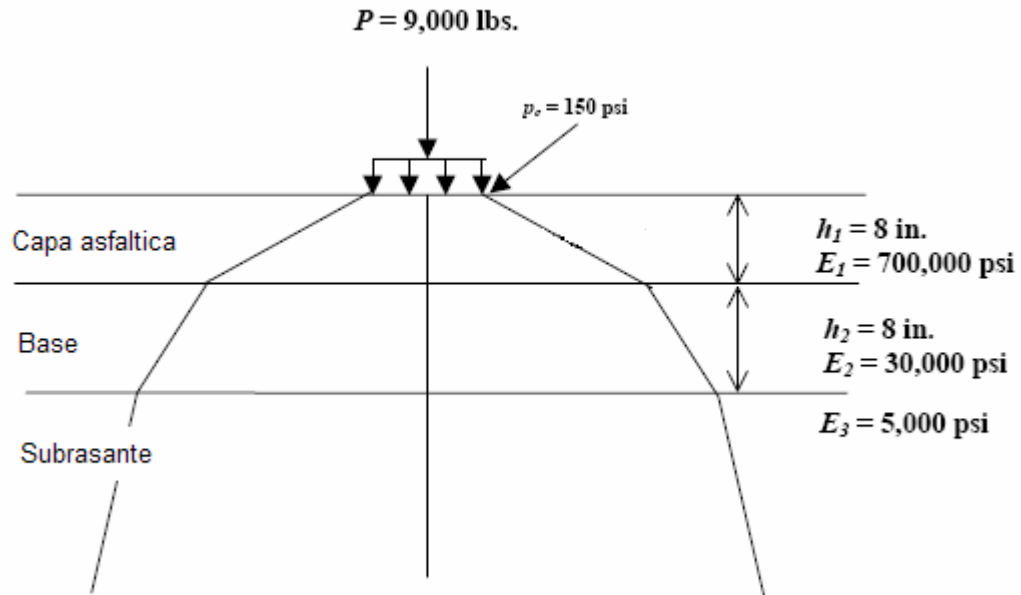
- Porcentaje de camiones en el sentido de diseño. Factor de distribución por sentido.
- Porcentaje de camiones en el carril de diseño. Factor de distribución por carril.
- Velocidad de operación. Usada para calcular el módulo de las capas asfálticas.

El Capítulo 2.5 - Tránsito, discute los procedimientos recomendados para encontrar esta información en los diferentes niveles de confianza.

Velocidad de operación: Es importante discutir el papel de la velocidad de operación en el diseño de pavimentos flexibles, ya que esta influye en la rigidez de las capas asfálticas de la estructura de pavimento. Cuando el tránsito circula por el pavimento genera un gran número de rápidos esfuerzos aplicados a cada capa en la estructura de pavimento. La duración de estos esfuerzos depende de la velocidad del vehículo, del tipo y geometría de la estructura de pavimento, y de la localización de la capa en la estructura de pavimento.

La siguiente figura muestra una estructura típica de pavimento y la distribución de esfuerzos en función de rigidez de la capa (entre más rígida distribuye los esfuerzos en una mayor área).

Figura 2.6.7. Distribución de esfuerzos bajo la llanta



Barksdale investigó los esfuerzos verticales en diferentes puntos de pavimentos flexibles y concluyó que una función triangular podría aproximar los esfuerzos bajo el vehículo en movimiento. Después de considerar el efecto estático y viscoso basado en las medidas de esfuerzos en el AASHTO Road Test, el tiempo de los esfuerzos puede ser relacionado a la velocidad y profundidad.

Para la Guía, la única propiedad que se verá afectada por la duración de los esfuerzos es la rigidez de las capas asfálticas. Desde que estas capas se encuentren cerca de la superficie el factor profundidad no será significativo, sin embargo, la velocidad del vehículo (frecuencia) si afectará el valor del módulo del asfalto en el análisis.

Tabla 2.6.1 Recomendación para la selección de la velocidad de operación

TIPO DE VIA	VELOCIDAD (K/h)	FRECUENCIA ESTIMADA EN LA MITAD DE LA CAPA (Hz)		
		CARPETA ASFALTICA (10-30 cm)	CARPETA ASFALTICA (2.5-7.5 cm)	BASE ASFALTICA (7.5-30 cm)
Primera	60	15-40	45-95	10-25
Secundaria	45	10-30	35-70	15-20
Urbana	15	5-10	10-25	5-10
Interseccion	0.5	0.1-0.5	0.5-1.0	0.1-0.25

### Ajustes del volumen del tránsito:

- Factor de ajuste mensual: El factor de distribución mensual de camiones es usado para determinar la variación mensual del tránsito de camiones en el año base y se refiere a la relación entre la cantidad de camiones mensual y la cantidad de camiones del año. Naturalmente, el promedio de la relación de los 12 meses es igual a 1. Este factor es discutido con mayor detalle en el Capítulo 2.5 - Tránsito.
- Distribución por clase de vehículo: La distribución por clase de vehículo representa el porcentaje de cada clase de camión en el Tráfico Promedio Diario Anual de Camiones (TPD) del año base. Naturalmente, la suma de los porcentajes de cada clase de camión es igual a 100. Este factor es discutido con mayor detalle en el Capítulo 2.5 - Tránsito.
- Distribución horaria de camiones: La distribución horaria de camiones representa el porcentaje de camiones que circula en cada hora del día. Este factor es más importante en el análisis de pavimentos rígidos. Este factor es discutido con mayor detalle en el Capítulo 2.5 - Tránsito.
- Factor de crecimiento del tránsito: La función de crecimiento del tránsito permite obtener el crecimiento del tránsito de camiones en el tiempo. Tres funciones son permitidas para estimar el volumen del tránsito futuro:
  - Sin crecimiento.
  - Lineal.
  - Crecimiento compuesto.

Basados en la función seleccionada, la fecha de apertura al tránsito y el período de diseño el tránsito es proyectado a futuro. Las funciones de crecimiento son presentadas en el Capítulo 2.5 - Tránsito.

- Factor de distribución de carga por eje: El factor de distribución de carga por eje representa el porcentaje de la carga total en cada tipo de eje y cada tipo de vehículo. Los intervalos de carga para cada tipo de eje son:

Ejes simples: de 3.000 a 41.000 lb, en intervalos de 1.000 lb.

Ejes tandem: de 6.000 a 82.000 lb, en intervalos de 2.000 lb.

Ejes tridem: de 12.000 a 102.000 lb, en intervalos de 3.000 lb.

El factor de distribución de carga por eje es presentado con mayor detalle en el Capítulo 2.5 - Tránsito.



Información general del tránsito: Esta información define la configuración de carga por eje y detalles de carga para calcular la respuesta del pavimento.

Localización media de la llanta: Esta hace referencia a la distancia entre el borde externo de la llanta hasta la marca del pavimento. Este dato es importante en el análisis de pavimentos rígidos pero no es utilizado en el análisis de pavimentos flexibles.

Desviación estándar del tránsito (efecto Wander): La desviación lateral del tránsito influye en el número de aplicaciones de carga en un punto del pavimento, el cual es utilizado a su vez para predecir el comportamiento del pavimento. Este parámetro afecta la predicción de fatiga y deformación permanente en la estructura del pavimento ya que el aumento en éste aumenta la vida por fatiga y por deformación del pavimento.

Generalmente, no se tiene la distribución lateral exacta, sin embargo, una buena aproximación es tomar una distribución normal. La desviación estándar de la distribución normal representa el efecto wander en pulgadas.

Aunque la distribución lateral del tránsito afecta directamente a la aparición de los diferentes daños, una aproximación es realizada para cada tipo. La estimación del daño por fatiga está basada en las Leyes de Miner, con la siguiente expresión:

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

Donde: D = Daño.  
T = Número total de periodos  
 $n_i$  = tráfico actual, del periodo i  
 $N_i$  = tráfico permitido, en el periodo i

Como la Ley de Miner es proporcional al tránsito, la distribución del daño con el efecto Wander puede ser calculado desde el perfil de daño por fatiga obtenido sin desplazamiento lateral (Wander = 0 pulgadas). Este no puede hacerse con la deformación permanente porque el ahuellamiento no tiene una relación proporcional al tránsito, el efecto wander es aplicado al daño y no a los esfuerzos.

En el Capítulo 2.5 - Tránsito, se presenta con mayor detalle este parámetro.

Ancho del carril: Distancia entre las marcas del carril de diseño. Este parámetro es utilizado principalmente en el análisis de pavimentos rígidos y muy poco utilizado en el análisis de pavimentos flexibles. El valor estándar utilizado es de 3.6 m.

Número de los tipos de ejes por clase de camión: Esté representa el número promedio de los tipos de ejes (simple, tandem y tridem) por cada clase de camión. En el Capítulo 2.5 - Tránsito, se presenta con mayor detalle este parámetro.

Configuración de eje: Una serie de elementos son necesarios para describir con detalle la llanta y las cargas de los ejes, usados para determinar la respuesta dl pavimento. A continuación se presenta algunos valores típicos, sin embargo, se recomienda usar los valores específicos de cada sitio:

- Ancho pormedio del eje: Es la distancia entre los dos extremos del eje. Un valor típico es de 2.5 m.
- Separación de las llantas de un sistema dual: Es la distancia entre los centros de las llantas del sistema dual. Un valor típico es de 30.5 cm.
- Presión de inflado: Es la presión de inflado o presión de contacto de una llanta o de un sistema dual. Un valor típico es de 120 psi.
- Separación de ejes: Es la separación entre deos ejes consecutivos de un tandem o un tridem. Un valor promedio es de 131 cm para tandem y 125 cm para tridem.

Procesamiento de los datos de entrada: Los datos de tránsito son procesados de la siguiente manera, en cada uno de los periodos de análisis:

- Número de ejes simples en cada rango de cargo.
- Número de ejes tandem en cada rango de cargo.
- Número de ejes tridem en cada rango de cargo.
- Número de tracto - camiones en cada rango de carga (para fisuras arriba - abajo).

El factor de distribución horario es utilizado en el procesamiento de la información de tránsito para obtener el tráfico horario en el momento de calcular los daños para cada esfuerzo.

#### 2.6.3.5 Clima

Las condiciones ambientales han tenido un efecto significativo en el comportamiento de los pavimentos flexibles. La interacción de los factores climáticos con los materiales de la estructura de pavimento y las cargas es complejo. Factores como la precipitación, temperatura y la profundidad de la tabla de agua afecta la temperatura y el contenido de humedad de la subrasante y del pavimento, afectando de esta manera la capacidad de carga de las capas y el comportamiento del pavimento.

Esta sección proporciona un resumen de la información climática necesaria para el análisis de pavimentos flexibles, para mayor información consultar el Capítulo 2.4 - Clima:

Datos de clima: La siguiente información de clima es requerida para el diseño de pavimentos flexibles nuevos:

- Temperatura del aire horaria durante el periodo de diseño.
- Precipitación horaria durante el periodo de diseño.
- Velocidad del viento horaria durante el periodo de diseño.
- Porcentaje de brillo horario durante el periodo de diseño.
- Valores de humedad relativa horarios.
- Profundidad de la tabla de agua horaria o por temporadas.

Los cinco primeros datos que se necesitan pueden ser obtenidos de las estaciones meteorológicas del sitio o cercano a éste. El software de la Guía incluye una extensa base de datos de 800 estaciones climáticas de los Estados Unidos y da la opción de interpolar información entre varias de ellas. Por lo menos se necesita la información climática de 24 meses para obtener un diseño razonable; las 800 estaciones poseen información de 60 a 66 meses.

Toda la información climática necesaria para el diseño de un pavimento en los Estados Unidos, con excepción de la profundidad de la tabla de agua, es obtenida dando simplemente los datos de latitud, longitud y elevación del sitio del proyecto.

El diseñador puede utilizar datos de una estación cercana o interpolar información de varias estaciones cercanas (crear una estación virtual). Se recomienda utilizar el último método ya que la información es más real y compensa información faltante de algunas estaciones.

Procesamiento de los datos de entrada: La información de clima es combinada con la información de los materiales, espesores de capas y propiedades de drenaje por el desempeño EICM, para generar la siguiente información usada en el análisis de pavimentos flexibles:

- Perfiles horarios de temperatura a través de las capas de asfalto.
- Perfiles horarios de humedad y temperatura a través de las otras capas del pavimento.
- Predicción mensual de los módulos del asfalto, de la base, la subbase y de la subrasante.
- Número promedio anual de días lluviosos.

En el Capítulo 2.4 - Clima, se describe con mayor detalle la predicción de la temperatura y humedad a través del perfil del pavimento, y los factores de ajuste para los módulos de las capas de materiales no conglomerados.

#### 2.6.3.6 Estructura del pavimento

La información de las propiedades de la estructura del pavimento se organiza en las siguientes categorías:

- Características de drenaje y superficie.
- Propiedades de las capas del pavimento.
- Fallas potenciales.
- Reglas de simulación.

Características de drenaje y superficie: Estas son propiedades generales del pavimento requeridas para el análisis, entre las cuales se encuentran:

- Absorción de onda corta del pavimento.
- Potencial de infiltración.
- Pendiente transversal del pavimento.
- Longitud de drenaje.

La primera propiedad es una propiedad del material que interactúa con el clima y que define el régimen de temperatura en las capas del pavimento. Las otras tres propiedades son relacionadas a la infiltración y al drenaje. Esta Guía no proporciona detalles de diseño de drenaje ni métodos de construcción. Sin embargo, las características que se van a discutir tienen gran impacto en la cantidad de humedad en la estructura de pavimento después de una precipitación y ayuda a definir algunos de los otros parámetros requeridos para los cálculos de drenaje.

- Absorción de onda corta del pavimento: La absorción de onda corta de la superficie del pavimento depende de la composición del pavimento, color y textura. Esta propiedad es la relación entre la cantidad de energía solar absorbida por la superficie del pavimento y la cantidad total de energía solar a la cual está expuesta la superficie del pavimento. El rango de este valor es de 0 a 1. Generalmente, entre más clara y más reflectiva sea la superficie, la absorción será menor.

Los valores típicos son de 0.8 a 0.9 para asfaltos sometidos a cargas climáticas, y de 0.9 a 0.98 para asfaltos frescos. El valor por defecto recomendado para diseño de pavimentos flexibles nuevos es de 0.85.

- **Infiltración:** Esta característica se refiere a la cantidad de agua infiltrada a la estructura de pavimento. La calibración de los modelos de fallas de pavimentos flexibles asumen que no hay infiltración de humedad durante el periodo de diseño, por lo que el procedimiento de diseño no permite al diseñador elegir ningún nivel de infiltración; sin embargo, consideraciones de subdrenaje deben ser tomadas en el diseño de pavimentos flexibles.

Propiedades de las capas del pavimento: Los procedimientos de diseño de pavimentos flexibles permiten una amplia variedad en las propiedades de los materiales y espesores de las capas del pavimento. Además, permite manejar una gran cantidad de capas (19) pero se recomienda no usar más de 10 capas en una estructura de pavimento para facilidad en los cálculos. Las capas que son muy grandes no necesitan ser divididas para el análisis ya que el software lo hace internamente.

La sección llamada “Reglas de simulación” proporciona detalles de las reglas y de las obligaciones que se necesitan sean satisfechas en la definición para el diseño de pavimentos flexibles. A continuación se presentan los requerimientos mínimos:

- La superficie siempre va a ser una capa de concreto asfáltico.
- El pavimento tipo Full Depth es la mínima estructura que puede ser analizada. Solamente una capa de material granular puede ser colocada entre dos capas estabilizadas.
- La dos últimas capas de la estructura del pavimento deben ser de materiales no conglomerados (para satisfacer este requerimiento el software de diseño divide la capa de subrasante en dos capas para el caso de pavimentos tipo Full Depth).

La definición de una estructura de prueba involucra la definición de todas las capas del pavimento y las propiedades de cada uno de los materiales de las capas, incluyendo la capa de subrasante.

*Capas de concreto asfáltico o estabilizadas con asfalto:*

La capa superficial de concreto asfáltico es dividida en subcapas para calcular los gradientes de temperatura. El software permite un máximo de tres capas asfálticas: superficie asfáltica, ligante asfáltico y base asfáltica para pavimentos nuevos, por lo que se requieren las propiedades de cada capa asfáltica por separado. El modelo de envejecimiento sólo sirve para la capa superficial ya que para las capas inferiores el envejecimiento no es significativo.

La información requerida para las capas asfálticas se agrupa en tres categorías: información general, información requerida para la elaboración de la curva maestra e información requerida para la predicción de fisuras térmicas.

La *información general* hace referencia a:

- Espesor de la capa.
- Relación de Poisson.
- Conductividad térmica. Es la cantidad de calor que fluye normalmente a través de la superficie por unidad de área, por unidad de tiempo y por gradiente de temperatura. El valor típico para materiales estabilizados con asfalto es 0.67 BTU/h\*ft\*°F.
- Capacidad de calor. Es el calor requerido para aumentar la temperatura de una unidad de masa en una unidad de temperatura. Un valor típico para materiales estabilizados con asfalto es 0.23 BTU/lb\*°F.
- Peso unitario total. Valores típicos de mezclas densas en caliente es de 134 a 148 lb/ft<sup>3</sup>.

La *información para elaborar la curva maestra*<sup>9</sup> hace referencia a la principal propiedad de los materiales asfálticos: el módulo dinámico (E). Esta propiedad puede ser medida en el laboratorio (Nivel 1) para diferentes frecuencias y magnitudes de carga, o utilizando la siguiente información:

- Propiedades de la mezcla:
  - Utilizar la ecuación propuesta por Witczak para determinar el módulo dinámico:
    - ✓ Porcentaje retenido en el tamiz  $\frac{3}{4}$ . Un valor típico es del 5 al 16% en mezclas densas y del 30% en mezclas abiertas.
    - ✓ Porcentaje retenido en el tamiz  $\frac{3}{8}$ . Un valor típico es del 27 al 49% en mezclas densas y del 70% en mezclas abiertas.
    - ✓ Porcentaje retenido en el tamiz #4. Un valor típico es del 38 al 61% en mezclas densas y del 95% en mezclas abiertas.
    - ✓ Porcentaje retenido en el tamiz #200. Un valor típico es del 3 al 8% en mezclas densas y del 1% en mezclas abiertas.
- Propiedades del ligante:
  - Grado PG o viscosidad (Nivel 2).
  - Grado PG, viscosidad o penetración (Nivel 3).
- General:
  - Porcentaje de asfalto efectivo.
  - Porcentaje de vacíos.
  - Temperatura referente par el desarrollo de la curva maestra (21°C).

---

<sup>9</sup> Mayor información se encuentra en el Capítulo 2.3 - Materiales, en la sección de materiales asfálticos.

La *información para fisuras térmicas*<sup>10</sup> es:

- Resistencia a la tensión a -10 °C.
- Información del creep. Este debe ser medido en el laboratorio a diferentes temperaturas (-20, -10 y 0 °C) (Nivel 1), sino debe ser medido a una sola temperatura (-10 °C) (Nivel 2), o sino se toma un valor por defecto teniendo en cuenta el comportamiento del ligante.
- El coeficiente de contracción térmico. Este puede ser especificado directamente o calculado por el software con base en los vacíos y el coeficiente de contracción térmico de los agregados.

*Capas estabilizadas químicamente:*

Las capas de base o subbase estabilizadas químicamente no son divididas para el análisis y se necesita la siguiente información:

- Máximo módulo resiliente para el diseño.
- Mínimo módulo resiliente (que la capa propaga después de que la capa se fatigue totalmente).
- Módulo de rotura.
- Peso unitario del material.
- Relación de Poisson.
- Conductividad térmica. La cantidad de calor que fluye normalmente a través de la superficie por unidad de área, por unidad de tiempo y por gradiente de temperatura. Un valor típico para bases estabilizadas químicamente es de 1.0 BTU/h\*ft\*°F.
- Capacidad de calor. El calor requerido para aumentar la temperatura por unidad de masa y por unidad de temperatura. Un valor típico para bases estabilizadas químicamente es 0.28 BTU/lb\*°F.

*Materiales no conglomerados (base, subbase y subrasante):*

Bases mayores a 15 cm. y subbases mayores a 20 cm. Son divididas internamente por el software para el análisis. Las bases son divididas en una capa de 5 cm. (parte superior) y las demás de 10 cm. (parte inferior). Para subrasantes naturales y compactas la división mínima es de 30 cm. (parte superior) y el resto se toma como una capa infinita. Si hay presencia de un lecho rocoso, la parte sobrante de la subrasante es tratada como una capa menor a 2.4 m. y el lecho rocoso no se divide y se toma como una capa infinita.

---

<sup>10</sup> Mayor información se encuentra en el Capítulo 2.3 - Materiales, en la sección de materiales asfálticos.

Los datos necesarios para capas de materiales no conglomerados son:

- Espesor de la capa (sólo para base y subbase). Si la subrasante es estabilizada o compactada ésta necesita ser separada de la subrasante natural, y se puede tratar como una capa más del pavimento.
- Módulo resiliente de la capa.
  - Medirlo en el laboratorio y determinar su dependencia con el estado de esfuerzos (K1, K2 y K3) (Nivel 1). Además, se requiere el uso de elementos finitos para predecir el comportamiento, el cual, es recomendado para investigación y análisis.
  - Especificar un valor de módulo directamente o hallarlo con base en correlaciones con otros índices (Nivel 2).
  - Especificar un valor de módulo con base en la clasificación de la AASHTO o USCS (Nivel 3).
- Relación de Poisson.
- Coeficiente de presión lateral del suelo ( $K_0$ ). Un valor típico es de 0.5 para materiales naturales y no compactos.

El diseñador debe escoger si incluye o no un análisis por temporadas climáticas de los materiales no conglomerados. Las siguientes opciones son permitidas para el análisis por temporadas climáticas de materiales no conglomerados en los Niveles 1 y 2:

- Entrar un módulo resiliente representativo para diseño con el contenido óptimo de humedad u otro parámetro de resistencia del suelo (CBR, R - valor, coeficiente estructural AASHTO de la capa o el IP y la gradación) y utilice el modelo EICM para estimar la variación basándose en el cambio de los perfiles de humedad y temperatura en la estructura del pavimento.
- Los valores mensuales del módulo resiliente, CBR, R - valor u otros valores pueden ser ingresados directamente en el desempeño EICM.
- La variación del módulo por temporadas climáticas puede ser ignorado, requiriendo solamente un valor representativo del módulo.

*Lecho rocoso:*

La presencia de un lecho rocoso en los 3.5 m. medidos desde la superficie del pavimento influye en el comportamiento estructural de las capas del pavimento. La información necesaria del lecho rocoso es:

- Espesor de la capa (infinito si éste es la última capa).
- Peso unitario.
- Relación de Poisson.
- Módulo elástico.



Los Niveles 1 y 2 no aplican para este material, por lo tanto se utilizan valores por defecto. Para mayor información sobre estas propiedades ver el Capítulo 2.3 Materiales.

### Fallas potenciales

Estas propiedades complementarias son necesarias para los modelos de predicción de la rugosidad (IRI), específicamente en la predicción del desarrollo de daños adicionales que afectan la rugosidad, que no son considerados por la Guía. Las dos fallas potenciales son:

- Fisuras en bloque (en todos los niveles de severidad). Definido como un porcentaje del área total.
- Grietas longitudinales fuera de la huella de la rueda (de mediana a alta severidad).

### Reglas de simulación

Las siguientes son unas reglas generales de simulación para la creación de la estructura del pavimento flexible para ser analizada por el software. Las reglas sólo son sugerencias ya que el diseñador tiene que escoger el uso de experiencias locales en los modelos de estructuras que se van a analizar.

Para iniciar, el diseñador debe simular la estructura de pavimento y subrasante tan detallada como sea posible, y luego iniciar a combinar capas si es necesario. Posteriormente el software toma las capas definidas y las divide para obtener un cálculo más exacto de la respuesta del pavimento, dependiendo del número de capas y de los espesores. El número de capas no debe exceder de 20 o el número de puntos de evaluación no debe exceder a 26 sino el funcionamiento no se ejecutará. A continuación, se da una guía para simular estructuras de manera tal que el número de capas no exceda a 20, teniendo en cuenta que entre más capas es mejor:

### *Notas generales*

- El diseñador debe tratar de combinar las capas inferiores y describir con más detalle las capas superiores (si es posible).
- Combinar las capas delgadas (<2.54 cm) y no estructurales con las capas inferiores. Por ejemplo una capa de mezcla asfáltica abierta puede ser combinada con la capa de mezcla asfáltica en caliente que está debajo.
- Materiales con respuesta estructural y con propiedades físicas similares, de capas adyacentes deben ser combinadas en una sola capa.

### *Capas de subrasante*

- El diseñador debe dividir la subrasante en dos capas especialmente cuando no son encontrados lechos rocosos o suelos más duros. La capa más baja será el suelo natural y la capa superior (cerca de los otros materiales) será la capa compacta. Si el diseñador no considera sino una sola capa, el EICM la dividirá para realizar sus cálculos.
- Lechos rocosos u otros suelos más duros que son encontrados a una profundidad mayor de 6 m no tienen un efecto significativo en la respuesta del pavimento; sin embargo, el uso de retrocálculo proporcionarán mejores resultados si son encontradas capas duras en los 15 m desde la superficie. Por lo anterior, la presencia de capas duras pueden ser ignoradas en el diseño de pavimentos pero no en el retro cálculo de los módulos de las capas.
- Filtros usados para el drenaje entre un suelo fino gradado y el agregado de la base no pueden ser simulados en la estructura de pavimento y debe ser ignorado en el diseño estructural de la sección analizada.

### *Materiales no conglomerados*

- En muchos casos, el número de capas de base y subbase no debe exceder a 2, especialmente cuando una de estas es grande (>45 cm), arena y otros agregados de suelo pueden ser simulados por separado como roca triturada o agregado triturado.
- Si se usan capas de agregados grandes (>45 cm), ésta puede ser tratada como la capa superior de una subrasante sin comprometer la calidad de la solución. Generalmente, son usadas como capas no susceptibles al congelamiento.
- Si la capa delgada de base es usada entre dos capas gruesas de materiales no conglomerados, ésta debe unirse a la capa más débil si excede el número de capas máximo (20); de lo contrario, el diseñador la puede tratar como una capa independiente.
- Las geomallas y otros materiales de refuerzo usados en materiales no conglomerados no pueden ser simulados en el funcionamiento estructural.
- Cuando capas no ligadas están presentes en la estructura de pavimento se debe tener cuidado para asegurar la relación modular de la capa adyacente.

### *Materiales estabilizados químicamente*

- Bases estabilizadas o tratadas con asfalto algunas veces referidas como “base negra” deben ser tratadas como una capa aparte y no combinada con mezclas densas en caliente. Típicamente, estas son material de base que tiene una pequeña cantidad de asfalto y/o emulsión que se puede producir en una planta o en el sitio. Sin embargo, materiales de base tratados con asfalto que son diseñados con el compactador giratorio y producido fácilmente debe ser

considerado como una mezcla asfáltica en caliente y combinada con ese tipo de capas.

- Estabilización con cemento o puzolanas que son usados como capa de base deben ser tratados por separado. En el caso de tratamiento con cemento, cal, escorias o puzolanas para mejorar la resistencia o disminuir el índice de plasticidad, éstos pueden considerarse como materiales no conglomerados y combinados con otras capas de materiales no conglomerados (si es necesario).
- Subrasantes estabilizadas con cal y/o escorias pueden ser consideradas como capas separadas. En el caso de tratamiento de subrasante con cal y/o escorias ésta puede considerarse como una subrasante normal y pueden ser combinadas con otras capas de materiales no conglomerados (si es necesario).

#### *Capas / materiales drenantes*

- Bases drenantes tratadas con asfalto pueden ser tratadas como una capa separada y no combinada con capas de mezcla densa en caliente.

#### *Materiales asfálticos y mezclas asfálticas en caliente*

- El número de capas con asfalto no debe exceder a 3 en ningún caso; sin embargo, éste puede ser limitado en 2 cuando se usan capas asfálticas y de materiales no conglomerados gruesas.
- Materiales asfálticos similares puede ser combinados en uno solo.
- Capas delgadas (< 3.75 cm) de materiales asfálticos pueden ser combinadas con capas asfálticas adyacentes.
- Capas asfálticas delgadas o en el caso de que su espesor varía mucho a lo largo del proyecto, éstas pueden ser ignoradas sin afectar la exactitud de los resultados.

#### 2.6.4 Procedimiento de diseño de pavimentos flexibles nuevos

Esta sección muestra detalladamente la metodología de la predicción del comportamiento utilizada en pavimentos flexibles nuevos. La metodología usada es basada en fundamentos mecánico - empíricos para predecir los diferentes tipos de fallas:

- Fisuras por fatiga en la capa asfáltica (arriba - abajo y abajo - arriba).
- Deformación permanente (capa asfáltica, no conglomerada, subrasante y total).
- Fisuras térmicas (inducidas por el medio ambiente).
- Fisuras por fatiga en capas estabilizadas químicamente.

La guía se enfoca en los daños más comunes de pavimentos flexibles aunque es importante reconocer que no todos los aspectos importantes relacionados con la durabilidad (ej: sensibilidad a la humedad, stripping, etc.) son considerados directamente en el proceso de diseño. Por lo tanto, el diseñador aún debe contar en la tecnología actual y con las especificaciones de materiales para manejar diferentes tipos de fallas que no son considerados en esta Guía. La Guía tampoco contiene ninguna metodología mecánico - empírico para manejar la reflectividad de las fisuras, la cual, afecta primordialmente a los pavimentos rehabilitados pero no hay que olvidar que ésta es un aspecto importante en la generación de capas asfálticas que están sobre capas estabilizadas.

La predicción de desarrollo de fallas desde el punto de vista mecánico - empírico también son ligados a la predicción del IRI, como un criterio de comportamiento funcional que puede ser empleado en el proceso de diseño.

#### 2.6.4.1 Parámetros de la estructura de prueba

Una gran gama de pavimentos flexibles<sup>11</sup> pueden ser diseñados usando el procedimiento de la Guía, entre los cuales se encuentran: pavimentos convencionales, pavimentos resistentes y profundos, pavimentos tipo full depth y semirígidos. Hay que anotar que las estructuras pueden ser configuradas de la manera convencional (la calidad de las capas disminuye con la profundidad) o de tipo invertido “sándwich” (una capa rígida colocada entre una capa granular y la subrasante).

El diseñador debe seleccionar una estructura de prueba teniendo en cuenta las observaciones de la sección 3.6.4 reglas de simulación, definiendo los espesores y los tipos de materiales de las diferentes capas para que la sección de pavimento pueda ser analizada.

Luego el diseñador debe seleccionar si hace el análisis por temporadas climáticas. Si no se realiza este análisis las capas que no son asfálticas tendrán valores constantes de módulo (E) y relación de Poisson ( $\mu$ ) durante todo el periodo de análisis; sin embargo, los efectos de la variación de temperatura y envejecimiento por las temporadas climáticas serán considerados en la rigidez de las capas asfálticas. Para el análisis de las temporadas climáticas se tienen dos opciones:

- Predicción del EICM. El software internamente genera los factores de ajuste climáticos para los módulos dados por el usuario, estimando de esta manera las variaciones por temporadas climáticas.

---

<sup>11</sup> Los diferentes tipos de pavimentos flexibles se ilustran en la Figura 2.6.2.

- Valores mensuales. El diseñador debe entrar valores de módulos y humedad de todos los meses del año, los cuales serán utilizados directamente en los modelos de respuesta del pavimento. Los valores introducidos para un año completo son repetidos para cada año del periodo de diseño.

La siguiente decisión es la selección del criterio del comportamiento para cada tipo de falla. La información requerida para los criterios de diseño depende si se escoge un análisis determinístico o un análisis de confiabilidad para el diseño propuesto. Si se elige un análisis determinístico se necesitan dos datos: el valor máximo de los daños o IRI, y el periodo de diseño (ej: el diseño no debe exceder un nivel de ahuellamiento de 0.4 pulgadas en un periodo de 25 años). Mientras que, si se elige un análisis de confiabilidad se necesitan tres datos: el valor máximo de los daños o el IRI, el periodo de diseño y nivel de confiabilidad deseado (ej: el diseño debe tener una probabilidad de 90% y no debe exceder un nivel de ahuellamiento de 0.4 pulgadas en un periodo de 25 años).

#### 2.6.4.2 Modelos de respuesta del pavimento

##### *Modelos de análisis.*

El propósito de los modelos de respuesta del pavimento es determinar la respuesta estructural del sistema de pavimento debido a las cargas del tráfico y la influencia del medio ambiente. La influencia del medio ambiente puede ser directa (ej: expansión y contracción) o indirecta (ej: cambios en el módulo por la temperatura o humedad) en las propiedades de los materiales.

Los datos de entrada a los modelos de respuesta de pavimentos flexibles, incluye:

- Geometría del pavimento:
  - Espesores de las capas.
- Clima:
  - Temperatura.
  - Humedad.
- Propiedades de los materiales:
  - Propiedades elásticas.
  - Propiedades no lineales (si es apropiado).
- Tránsito:
  - Espectro de carga - frecuencia de los tipos de vehículos y de cargas en cada tipo de vehículo.
  - Presión de contacto de las llantas y áreas.

Las salidas de los modelos de respuesta de pavimentos son los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en las capas del pavimento. De particular interés son las variables críticas de respuesta requeridas por los modelos de fallas del pavimento en los procedimientos mecánico - empíricos, entre las cuales se encuentran:

- Esfuerzo horizontal de tracción en el fondo de la capa asfáltica (para fisuras por fatiga).
- Esfuerzo vertical de compresión en la capa asfáltica (para ahuellamiento de la capa asfáltica).
- Esfuerzo vertical de compresión en las capas de base y subbase (para ahuellamiento de las capas no conglomeradas).
- Esfuerzo vertical de compresión en la parte superior de la subrasante (para ahuellamiento de la subrasante).

Muchas técnicas son permitidas para determinar los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en los pavimentos flexibles, de las cuales, dos han sido implementadas por esta Guía. En casos en los cuales todos los materiales de la estructura del pavimento puedan ser tratados como linealmente elásticos, la teoría elástica multicapa JULEA es usada para determinar la respuesta del pavimento, el cual proporciona una excelente combinación de análisis, teoría y velocidad de cálculo. En el caso que los materiales no conglomerados presenten comportamiento no lineal, el código de elementos finitos no lineal del DSC2D es usado para determinar los esfuerzos, las deformaciones y los desplazamientos.

Una gran ventaja de la teoría elástica multicapa es la rapidez en los tiempos de cálculo. Soluciones para múltiples cargas de llantas pueden ser construidas automáticamente con base en el análisis asimétrico de una simple rueda. La principal desventaja de la teoría elástica multicapa es la restricción del comportamiento lineal de los materiales ya que los materiales reales, especialmente los no conglomerados, a menudo presentan dependencia a los estados de esfuerzo, presentándose la no linealidad tanto con la profundidad como en el plano horizontal. Los materiales incluso pueden llegar a una condición de falla en algunas posiciones como en el fondo de la capa de base en algunas estructuras de pavimento. Algunos ensayos se han realizado para incorporar los efectos de no linealidad en ésta teoría pero la formulación asimétrica hace imposible la inclusión de la variación espacial de la rigidez en una forma real.

#### *Puntos de análisis.*

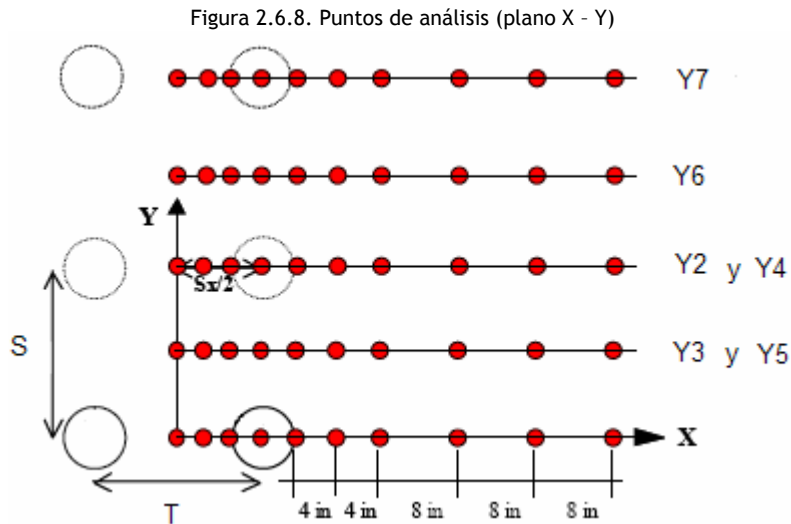
Cada variable de la respuesta del pavimento debe ser evaluada en un punto crítico de la capa, donde éste tome un valor extremo. Para una sola llanta el punto crítico se puede obtener por inspección, mientras que, para varias

llantas/ejes el punto crítico va a depender de la configuración de carga y de la estructura de pavimento. Condiciones de tráfico mixto complican aún más la localización del punto crítico ya que no será el mismo en todos los tipos de vehículos, caso en el cual, el modelo de respuesta del pavimento busca el punto crítico para cada parámetro.

Para la predicción del comportamiento es importante identificar la localización en la estructura de pavimento que generará mayor daño en todo el periodo de diseño. Para el caso de tráfico mixto no es posible especificar un punto específico, por lo que el software de la guía define éstos puntos con base en los sitios donde encuentra mayores niveles de daño. Para el caso de análisis lineal y no lineal, los sitios estudiados son:

- Eje X:  
 $X1 = 0$   
 $X2 = ((Ts/2) - Tr)/2$   
 $X3 = (Ts/2) - Tr$   
 $X4 = Ts/2$   
 $X5 = (Ts/2) + Tr$   
 $X6 = (Ts/2) + Tr + 4 \text{ pulg}$   
 $X7 = (Ts/2) + Tr + 8 \text{ pulg}$   
 $X8 = (Ts/2) + Tr + 16 \text{ pulg}$   
 $X9 = (Ts/2) + Tr + 24 \text{ pulg}$   
 $X10 = (Ts/2) + Tr + 32 \text{ pulg}$
  
- Eje Y:  
 $Y1 = 0$   
 $Y2 = Sta$   
 $Y3 = Sta/2$   
 $Y4 = Str$   
 $Y5 = Str/2$   
 $Y6 = Str*3/2$   
 $Y7 = Str*4/2$
  
- Eje Z:  
Para fatiga = En la superficie del pavimento ( $z = 0$ ).  
A 0.5 pulgadas de la superficie ( $z = 0.5''$ ).  
En el fondo de todas las capas.
  
- Para ahuellamiento = En el centro de cada capa.  
En la superficie de la subrasante.  
A 6 pulgadas de la superficie de la subrasante.

Donde: 0: centro de la llanta o del sistema dual.  
Ts: Espacio entre llantas.  
Tr: Radio de contacto de la llanta.  
Sta: Separación de ejes de un tandem.  
Str: Separación de ejes de un tridem.



El análisis para los diferentes tipos de ejes se realiza teniendo en cuenta las siguientes posiciones:

- Eje simple:
  - Respuesta 1 = Y1.
- Eje tandem:
  - Respuesta 1 = Y1 + Y2.
  - Respuesta 2 = 2 \* Y3.
- Eje tridem:
  - Respuesta 1 = Y1 + 2 \* Y4 + Y7.
  - Respuesta 2 = 2 \* Y5 + 2 \* Y6.

#### 2.6.4.3 Predicción del comportamiento

La metodología de diseño y de análisis de una estructura de pavimento en esta Guía, está basada en la acumulación de daños como función del tiempo y el tráfico. Los daños son calculados en periodos de tiempos cortos, por lo general cada mes, ya que los cambios de temperatura y humedad afectan directamente la respuesta del material y por ende el comportamiento del pavimento. Los daños considerados en la Guía de diseño de pavimentos flexibles, son:

- Deformación permanente (ahuellamiento).
- Fisuras por fatiga en capas asfálticas (arriba - abajo y abajo - arriba).



- Fisuras por fatiga en capas estabilizadas químicamente (arriba - abajo y abajo - arriba).
- Fisuras térmicas.

Adicionalmente, la rugosidad del pavimento (IRI) es predicho con base en los daños encontrados y otros parámetros.

#### *Modelo de deformación permanente.*

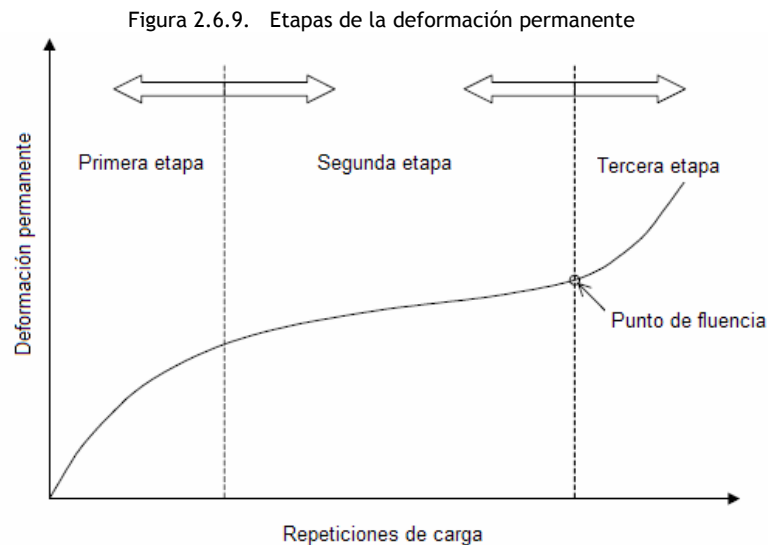
La deformación permanente es una de las fallas más importantes asociadas a las cargas que ocurre en pavimentos flexibles y está asociada al ahuellamiento en la huella de la llanta que se desarrolla gradualmente con la acumulación de repeticiones de carga. El ahuellamiento generalmente aparece como una depresión longitudinal en la huella de la llanta acompañada por pequeñas acumulaciones alrededor. El ancho y profundidad del ahuellamiento depende de la calidad de las capas del pavimento, la cantidad de tráfico y del medio ambiente.

El diseñador siempre está interesado en la deformación total del pavimento ya que ésta afecta el perfil longitudinal y lateral de la superficie, las características de drenaje y aspectos relacionados con la seguridad de los usuarios. El agua puede acumularse en los carriles generando hidroplaneo de los vehículos, reduciendo la resistencia al deslizamiento y reduciendo la seguridad de los vehículos.

Por mucho tiempo ha sido una práctica común de los métodos mecánico - empíricos asociar la deformación permanente a excesivos esfuerzos en la subrasante. Se asume que si el pavimento fue bien diseñado y los materiales que fueron colocados encima de la subrasante tienen un buen control el ahuellamiento puede ser reducido a niveles tolerables ya que se limitan los esfuerzos verticales en la subrasante. Dando un vistazo a las metodologías de diseño de pavimentos flexibles utilizadas anteriormente, se puede observar que estos asumían que el esfuerzo cortante decrecía con la profundidad y era controlado en la subrasante; sin embargo, con el tiempo, con las mejoras técnicas y con mayor conocimiento se entendió que la deformación permanente era un producto de la acumulación de deformación de todas las capas del pavimento.

Para la guía, un sistema de predicción de ahuellamiento es aprovechable para evaluar la deformación permanente en todas las capas del pavimento en el periodo de diseño. Sin considerar el tipo de material, hay tres etapas del comportamiento de la deformación permanente para las mismas condiciones de carga y condiciones de medio ambiente:

- Primera etapa: alto nivel de ahuellamiento con decrecimiento de la deformación plástica, asociado con cambios volumétricos.
- Segunda etapa: poco ahuellamiento a una rata constante, asociado a cambios volumétricos, sin embargo, la deformación cortante incrementa esta rata.
- Tercera etapa: alto nivel de ahuellamiento asociado a deformaciones plásticas sin cambio de volumen.



La guía de diseño utiliza un modelo para simular las dos primeras etapas, en la primera hace una extrapolación y en la segunda una tendencia. Los ensayos para estudiar la tercera etapa necesitan demasiado tiempo, complejo y faltan metodologías para implementar su predicción, además de estos problemas, se debe reconocer que la deformación permanente no es asumida en materiales estabilizados químicamente, lechos rocosos y materiales de concreto.

La guía estima el ahuellamiento en el punto medio de cada capa del pavimento, para lo cual el software verifica el tipo de capa, aplica el modelo a cada capa y calcula la deformación plástica acumulada al final de cada periodo analizado. La expresión matemática utilizada es:

$$RD = \sum_{i=1}^N \epsilon_p^i h^i$$

Donde: RD = Deformación permanente.  
N = Número de capas.  
 $\epsilon_p^i$  = Deformación plástica total de la capa i.  
 $h^i$  = Espesor de la capa i.

Este proceso es repetido para cada nivel de carga y mes del periodo de diseño.

### *Deformación permanente de mezclas asfálticas*

La deformación permanente de las mezclas asfálticas es una de las fallas más importante de los pavimentos flexibles. El modelo de deformación permanente de capas asfálticas usado en la Guía fue realizado con base en un análisis estadístico de un ensayo calibrado de repeticiones de carga, y su ecuación matemática es:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = a_i T^{a_i} N^{a_i}$$

Donde:

- $\varepsilon_p$  = Deformación plástica acumulada a las N repeticiones de carga (pulg/pulg).
- $\varepsilon_r$  = Deformación resiliente del material asfáltico en función de las propiedades de la mezcla, temperatura y tiempo de carga (pulg/pulg).
- N = Número de repeticiones de carga.
- T = Temperatura (°F).
- $a_i$  = Coeficiente de la regresión no lineal.

Mientras que las relaciones estadísticas fueron evaluadas se encontró que eran razonables, y los factores de calibración de campo ( $\beta_{ri}$ ) fueron necesarios de adicionar al modelo final, generándose de esta manera una nueva ecuación:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = \beta_{ri} a_i T^{a_i \beta_{ri}} N^{a_i \beta_{ri}}$$

Esta ecuación es relativamente una simple ecuación usada en la implementación de este proceso. La expresión final que fue utilizada para el proceso de calibración/validación de campo fue:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = 10^{-3.15552} T^{1.734} N^{0.39937}$$

La anterior expresión presentada fue obtenida por Leía, Ayers y Kaloush (NCHRP 9-19: Modelos Superpave) y posee las siguientes características:

- $R^2 = 0,644$ .
- Muestra de 3476 observaciones.
- $Se = 0.321$ .
- $Se/Sy = 0.597$ .

El modelo de campo calibrado usado en la Guía fue determinado por optimización numérica y otros modos de comparación para obtener factores de calibración de los Estados Unidos:

- Br1 = 0.509.
- Br2 = 0.9.
- Br3 = 1.2.

Lo cual conllevó al modelo final que se muestra a continuación:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = K1 * 10^{-3.4488} T^{1.5606} N^{0.479244}$$

En esta expresión el parámetro profundidad (K) ha sido introducido para proporcionar una mayor exactitud en la predicción del ahuellamiento. Este análisis fue completado por estudios realizados en el sitio de pruebas MnRoad.

$$\begin{aligned} K1 &= (C1+C2*prof)*0.328196^{prof} \\ C1 &= -0.1039*h_{ac}^2+2.4868*h_{ac}-17.342 \\ C2 &= 0.0172*h_{ac}^2-1.7331*h_{ac}+27.428 \end{aligned}$$

Donde: K1 = Función del espesor total de la capa asfáltica, hac (pulg) y la profundidad (pulg) del punto en estudio, para corregir la presión de confinamiento en las diferentes profundidades.

Esta última expresión presenta las siguientes características:

- R<sup>2</sup> = 0.648.
- Muestra de 387 observaciones.
- Se = 0.062 pulgadas.
- Se/Sy = 0.574.

El modelo de ahuellamiento para pavimentos nuevos ha sido parcialmente calibrado usando 88 secciones del Long Term Pavement Performance (LTPP) localizados en 28 estados, realizando 387 Observaciones.

#### *Deformación permanente en capas de materiales no conglomerados*

El modelo inicial utilizado para predecir la deformación permanente en las capas de materiales no conglomerados fue propuesto por Tseng y Lytton:

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

Donde:  $\delta_a$  = Deformación permanente de la capa (pulg).  
 $N$  = Número de repeticiones.  
 $\epsilon_0, B$  y  $p$  = Propiedades de los materiales.  
 $\epsilon_r$  = Deformaciones resilientes impuestas en el ensayo para obtener las propiedades de los materiales mencionadas anteriormente (pulg/pulg).  
 $\epsilon_v$  = Deformación vertical resiliente promedio en la capa obtenida del primer modelo de respuesta (pulg/pulg).  
 $h$  = Espesor de la capa (pulg).  
 $B_1$  = Factor de calibración de materiales no conglomerados.

Durante el proceso de calibración de campo numerosas modificaciones fueron realizadas para determinar el modelo final. Cambios conducidos a eliminar el término de esfuerzos del modelo, simplificaciones a  $B$  y  $p$ , y a una eventual combinación de las capas de materiales no conglomerados (granulares y subrasante). De esta manera surgió el siguiente modelo:

$$\text{Log } B = -0.61119 - 0.017638Wc$$

$$\log\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_r}\right) = \frac{\left(e^{(p)^\beta} * a_1 E_r^{b_1} + \left(e^{(p/10^9)^\beta} * a_0 E_r^{b_1}\right)\right)}{2}$$

$$Co = \ln\left[\frac{a_1 E_r^{b_1}}{a_0 E_r^{b_1}}\right]$$

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

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

Donde:  $Wc$  = Contenido de agua (%).  
 $E_r$  = Módulo resiliente de la capa (psi).  
 $GWT$  = profundidad de la tabla de agua (pie).  
 $a_1$  = 0.15  
 $b_1$  = 0  
 $a_0$  = 20  
 $b_0$  = 0

El modelo de calibración final para capas de materiales no conglomerados es:

$$\delta_a(N) = \beta_{GB} \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{p}{N}\right)^p} \epsilon_v h$$

La ecuación anterior presenta las siguientes características:

- $B_{GB}$  = 1.673 (factor de calibración de los Estados Unidos).
- $R^2$  = 0.677.
- Muestra de 387 observaciones.
- $Se$  = 0.023 pulgadas.
- $Se/Sy$  = 0.524

#### *Deformación permanente en capas de suelos de subrasante*

El modelo de calibración final para la deformación plástica en la superficie de los suelos de subrasante es:

$$\delta_a(N) = \beta_{SG} \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{p}{N}\right)^p} \epsilon_v h$$

Adicionalmente, se debe calcular la deformación plástica en 6 puntos por debajo de la superficie de la subrasante, para tal motivo se utiliza la siguiente expresión:

$$\epsilon_p(Z) = (\epsilon_{p,Z=0}) e^{-kz}$$

- Donde:
- $\epsilon_p(Z)$  = Deformación plástica vertical en la profundidad  $z$  medida desde la superficie de la subrasante.
  - $\epsilon_{p,Z=0}$  = Deformación plástica vertical en la superficie de la subrasante.
  - $z$  = Profundidad medida desde la superficie de la subrasante.
  - $k$  = Constante obtenida de la regresión.

La ecuación anterior presenta las siguientes características:

- $B_{SG}$  = 1.35 (factor de calibración Estados Unidos).
- $R^2$  = 0.136.
- Muestra de 387 observaciones.
- $Se$  = 0.045 pulgadas.
- $Se/Sy$  = 0.850.

Los modelos anteriores fueron calibrados usando 88 secciones del Long Term Pavement Performance (LTPP) localizados en 28 estados, realizando 387 Observaciones.

#### *Deformación permanente de la estructura de pavimento*

El ahuellamiento total de la estructura de pavimento es igual a la sumatoria de los ahuellamientos individuales de las capas del pavimento y puede ser expresado con la siguiente ecuación:

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

El resumen de la estadística de la comparación entre el ahuellamiento predicho y el ahuellamiento medido se presenta a continuación:

- $R^2 = 0.399$ .
- Muestra de 387 observaciones.
- $Se = 0.121$  pulgadas.
- $Se/Sy = 0.822$ .

El modelo anterior fue calibrado usando 88 secciones del Long Term Pavement Performance (LTPP) localizada en 28 estados, realizando 387 Observaciones.

#### *Factores que afectan la deformación permanente en los pavimentos flexibles.*

Muchos factores afectan la deformación permanente en este tipo de pavimentos, algunos de estos pueden ser controlados y modificados mientras que el resto son factores externos que no pueden ser controlados. Los siguientes factores afectan la cantidad de deformación permanente:

- Espesor de la capa asfáltica.
- Módulo dinámico de la capa asfáltica.
- Grado del ligante en la mezcla asfáltica.
- Contenido de vacíos en las capas asfálticas.
- Contenido efectivo de ligante en las capas asfálticas.
- Tipo de base
- Espesor de la base.
- Rigidez de la base.
- Cargas del tránsito, área de contacto y presión de inflado.
- Velocidad de operación de los vehículos.
- El desplazamiento lateral del tránsito (efecto wander).
- Temperatura y condiciones ambientales.

Mientras muchos de los anteriores factores se mantengan constantes a lo largo del periodo de diseño, otras varían con la temporada climática, el mes, la hora o la edad del pavimento. Para obtener resultados exactos todos los casos que producen diferentes esfuerzos deben ser evaluados por separado. La acumulación de este daño en la Guía fue determinada para tener en cuenta los siguientes casos:

- Edad del pavimento. Tiene en cuenta los cambios del módulo dinámico de la capa asfáltica y el endurecimiento del ligante asfáltico.
- Mes. Tiene en cuenta la variación de los cambios de temperatura en la superficie que afecta el módulo dinámico de la capa asfáltica, además tiene en cuenta los cambios de humedad en la subrasante y la capa de base.
- Velocidad de operación (frecuencia de carga). Afecta el módulo dinámico de las mezclas asfálticas.
- Configuración de carga. Eje simple, tandem y tridem.
- Nivel de carga.
  - Ejes simples: de 3.000 a 41.000 lb, en incrementos de 1.000 lb.
  - Ejes tandem: de 6.000 a 82.000 lb, en incrementos de 2.000 lb.
  - Ejes tridem: de 12.000 a 102.000 lb, en incrementos de 3.000 lb.
- Desplazamiento lateral del tránsito (efecto Wander). Disminuye el ahuellamiento del pavimento.
- Temperatura y condiciones ambientales.
  - La temperatura es un factor importante ya que afecta la rigidez del asfalto y por ende el módulo dinámico de las mezclas asfálticas. Esta es función del tiempo y la profundidad.
  - Las condiciones ambientales están representadas por el cambio de humedad en los suelos de subrasante y capas granulares. La humedad es el principal factor en el ahuellamiento de capas de materiales no conglomerados ya que ésta reduce el módulo resiliente de la capa.

#### *Procedimiento para la predicción de la deformación permanente*

Para predecir el ahuellamiento en pavimentos flexibles se necesitan los siguientes pasos:

1. Tabular la información de entrada. Resumir los datos necesarios para predecir el ahuellamiento (ver Capítulo 2.3 - materiales).
2. Procesar los datos de tránsito. La información del tránsito necesita ser procesada para determinar el número equivalente de ejes simples tandem y tridem producidos por el paso de cada eje simple, tandem y tridem (ver Capítulo 2.5 - tránsito).
3. Procesar la información del perfil de temperatura del pavimento. Los perfiles de temperatura horaria del pavimento generados por el EICM (no lineales)



necesitan ser convertidos en una distribución de temperatura equivalente lineal para cada mes de análisis.

4. Procesar las condiciones de humedad mensuales. Los cambios mensuales en las condiciones de humedad afectan el módulo de la base y subbase (ver Capítulo 2.3 - materiales).
5. Calcular los estados de esfuerzos y deformaciones. Calcular los esfuerzos correspondientes a cada configuración de carga, nivel de carga, posición de carga, edad del pavimento, mes y diferencia de temperatura para cada mes durante el periodo de diseño, en la mitad de cada capa. Usando los módulos y las relaciones de Poisson de los materiales se determinan las deformaciones elásticas en cada punto estudiado.

$$\varepsilon_{\eta} = \frac{1}{E^*} (\sigma_z - \mu\sigma_x - \mu\sigma_y)$$

Conociendo la deformación resiliente vertical se puede calcular la deformación plástica en cualquier punto de la capa asfáltica después de N repeticiones de carga.

6. Calcular la deformación permanente. Calcular el ahuellamiento en la mitad de cada capa (con excepción de la subrasante en la cual se determina el ahuellamiento en seis puntos) y los puntos que el diseñador crea convenientes usando las respuestas del pavimento calculadas, para cada periodo estudiado y posteriormente acumularlo para cada año, teniendo en cuenta que las condiciones al final de un periodo son las condiciones iniciales del siguiente periodo. Se utilizan las siguientes expresiones:

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = K1 * 10^{-3.4488} T^{1.5606} N^{0.479244}$$

- Donde:
- $\varepsilon_p$  = Deformación plástica acumulada a las N repeticiones de carga (pulg/pulg).
  - $\varepsilon_r$  = Deformación resiliente del material asfáltico en función de las propiedades de la mezcla, temperatura y tiempo de carga (pulg/pulg).
  - N = Número de repeticiones de carga.
  - T = Temperatura (°F).
  - $a_i$  = Coeficiente de la regresión no lineal.

#### *Confiabilidad de la deformación permanente calculada*

La confiabilidad del diseño es determinada por el nivel confiabilidad deseada del ahuellamiento predicho.

$$RD_P = \sum_i \overline{RD}_i + \left( \sqrt{Se_{RDAC}^2 + Se_{RDGB}^2 + Se_{RDSG}^2} \right) * Z_p$$

Donde: RD\_P = Ahuellamiento predicho con un nivel de confiabilidad P (pulg).  
RD<sub>i</sub> = Ahuellamiento predicho con los datos de entrada - confiabilidad del 50% (pulg).  
 $Se_{RDAC} = 0.1587 RD_{AC}^{0.4579}$   
 $Se_{RDGB} = 0.1169 RD_{GB}^{0.5303}$   
 $Se_{RDSG} = 0.1724 RDS_G^{0.5516}$   
Z<sub>p</sub> = Desviación estándar normal.  
i = Tipo de capa

### *Modificaciones del diseño de pavimento flexible para disminuir el ahuellamiento*

Si el ahuellamiento predicho es mayor al requerido, el diseño debe ser modificado para incrementar la capacidad estructural y la calidad de los materiales utilizados en las capas del pavimento. Los diferentes parámetros de diseño tienen un impacto diferente en las medidas del comportamiento. Lo primero que necesita el Ingeniero de diseño, es evaluar los valores de deformación de cada capa del diseño que no sirvió.

A continuación, se discutirá cual material de cada capa está proporcionando la mayor cantidad de ahuellamiento.

- Ahuellamiento de la capa asfáltica

Si la mayor cantidad de ahuellamiento es producida por la capa asfáltica, se debe pensar en colocar una capa asfáltica de mejor calidad. El factor que puede ser controlado es el módulo de la mezcla, acompañado de un ligante con mayor grado, usando menos asfalto y asegurando que las especificaciones de compactación sean totalmente cumplidas. Además, se deben tener en cuenta las otras medidas conocidas para mejorar la estabilidad de la mezcla como: partículas trituradas, tamaño máximo del agregado nominal, etc. Es muy importante asegurar que los otros tipos de falla como fisuras térmicas no se incrementen y excedan los criterios de diseño establecidos.

Otra consideración importante que el Ingeniero debe hacer es que el ahuellamiento de las capas asfálticas se produce en la superficie (3 a 5 pulgadas de la capa), por lo que si se cuenta con una mezcla de mala calidad incrementar su espesor no servirá de nada, por el contrario el ahuellamiento aumentará.

Finalmente, si el Ingeniero sabe que la mezcla es de buena calidad, se puede aumentar el espesor de la capa asfáltica hasta que asegure un nivel adecuado de ahuellamiento. Por lo general la reducción de ahuellamiento no es significativo, pero aumentar el espesor de la capa asfáltica ayuda a reducir el ahuellamiento de las capas de base y subbase, especialmente, y el ahuellamiento de la subrasante.

- Ahuellamiento de las capas de base y subbase

Como una regla general, la predicción del ahuellamiento en las capas de base y subbase no será un problema cuando las actuales especificaciones de materiales y de construcción son tenidas en cuenta en el diseño. Si estas capas presentan problemas de ahuellamiento, el Ingeniero debe mejorar la calidad de los materiales (CBR o R - valor). El uso de materiales estabilizados químicamente tiende a eliminar el problema de ahuellamiento en este tipo de capas y ayuda a disminuir el ahuellamiento potencial de las capas inferiores (subrasante). Además, si la capa es de mala calidad incrementar su espesor no disminuirá el ahuellamiento, por el contrario lo aumentará.

Finalmente, la presencia de exceso de humedad en éstas capas disminuye el valor del módulo, aumentando significativamente la deformación resiliente y a su vez el ahuellamiento; por lo tanto, se debe contar con un buen sistema de drenaje en el diseño.

- Ahuellamiento de la subrasante

Para casos prácticos, puede ser razonable anticipar que el análisis de la estructura de prueba tenderá a altos niveles de ahuellamiento en esta capa. Por lo tanto, el Ingeniero deberá entender y reconocer que todos los factores que tienden a incrementar la rigidez de toda la estructura de pavimento, que está sobre la subrasante, reducirá el ahuellamiento de la subrasante.

En general, el uso de sobrecapas asfálticas incrementará el módulo de la capa asfáltica, el cual, reducirá el estado de esfuerzos y deformaciones en la subrasante, conllevando a la reducción del ahuellamiento. Como se mencionó anteriormente, el uso de capas estabilizadas químicamente tendrá el mismo impacto que aumentar el espesor de la capa asfáltica. Otra manera efectiva de reducir el ahuellamiento de la subrasante es aumentar el espesor de la subbase.

Finalmente y teniendo en cuenta las anteriores consideraciones de diseño encaminadas a reducir el ahuellamiento de la subrasante, la última consideración que debe tener el Ingeniero son las actividades encaminadas a mejorar el módulo resiliente de la subrasante. La consideración más importante es proteger la subrasante de los efectos de la humedad ya que

ésta puede cambiar la resistencia. Algunas opciones de diseño son: tratar la subrasante con cal, cemento, etc.; utilizar eficientes sistemas de drenaje; utilizar barreras que impidan la penetración de humedad, incluso considerar elevar el nivel de la carretera para separar la estructura del nivel freático.

#### *Modelo de predicción de fisuras por fatiga en capas asfálticas*

Las fisuras por fatiga asociadas a las cargas del tránsito es una de las fallas que más ocurren en los pavimentos flexibles, ya que la acción repetida de cargas induce esfuerzos cortantes y de tracción en las capas asfálticas. Estas fisuras se inician en los puntos donde ocurren los esfuerzos críticos de tensión; los cuales, dependen de muchos factores pero los principales son la rigidez de la capa y la configuración de la carga. Hay que tener en cuenta que el máximo esfuerzo de tensión no siempre genera el máximo daño ya que éste depende de la rigidez de la mezcla, y si la rigidez varía con la profundidad afectará la localización del punto donde se genera el mayor daño. Una vez el daño se inicie en el punto crítico, la acción continua del tránsito hace que la fisura se propague por toda la capa.

La propagación de las fisuras a través de toda la capa permitirá el paso del agua a las capas inferiores debilitando la estructura de pavimento y desfavoreciendo su comportamiento, lo que afectará la rugosidad y el confort de la vía. La aparición de fisuras y su posterior propagación no solo afecta las capas asfálticas sino las capas estabilizadas que se encuentran debajo.

En las últimas 3 ó 4 décadas, la tecnología de pavimentos ha asumido que las fisuras por fatiga inician en la parte inferior de las capas asfálticas y se propagan hasta la superficie de rodadura (abajo - arriba) ya que los esfuerzos de tracción son producidos en esta zona; sin embargo, algunos estudios actuales han demostrado que las fisuras por fatiga pueden iniciarse desde la parte superior de las capas asfálticas y propagarse hacia la parte inferior (arriba - abajo). Las fisuras arriba - abajo no están muy bien definidas desde el punto de vista mecanicista ya que son probablemente debidas a los esfuerzos críticos de tensión y/o cortantes desarrollados en la superficie de la capa y producidos por la presión de contacto de las llantas.

La Guía de diseño utiliza modelos para predecir los dos tipos de fisuras por fatiga arriba - abajo y abajo - arriba, basados en el cálculo del daño por fatiga en la superficie de la capa asfáltica (fisuras arriba - abajo) y en el fondo de la capa asfáltica (abajo - arriba).

La estimación del daño por fatiga está basada en las Leyes de Miner, utilizando la siguiente expresión:

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

Donde: D = Daño.  
T = Número total de periodos analizados.  
n<sub>i</sub> = Tráfico actual, en el periodo i.  
N<sub>i</sub> = Tráfico permitido bajo las condiciones del periodo i.

#### *Modelo de fisuras por fatiga en capas asfálticas*

Para caracterizar el daño por fatiga en las capas asfálticas existen numerosos modelos. El modelo más común para predecir el número de repeticiones de carga para iniciar las fisuras por fatiga está en función del esfuerzo a tracción y módulo dinámico.

$$Nf = Ck_1 \left( \frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \left( \frac{1}{E} \right)^{k_3} \quad \text{o} \quad Nf = \beta_{f1} k_1 (\varepsilon_t)^{-\beta_{f2} k_2} (E)^{-\beta_{f3} k_3}$$

Donde: Nf = Número de repeticiones para iniciar las fisuras por fatiga.  
ε<sub>t</sub> = Esfuerzo de tensión en el punto crítico.  
E = Rigidez del material.  
k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub> = Coeficientes de regresión.  
β<sub>f1</sub>, β<sub>f2</sub>, β<sub>f3</sub> = Parámetros de calibración.  
C = factor de ajuste laboratorio - campo.

La última relación usada para la predicción del número de repeticiones para iniciar las fisuras por fatiga es la del Instituto del Asfalto, la cual, está basada en criterios de esfuerzos:

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

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 \left( \frac{Vb}{Va + Vb} - 0.69 \right)$$

Donde: Vb = Volumen efectivo de ligante (%).  
Va = Volumen de aire (%).

De modelo la calibración de los Estados Unidos, se obtuvo los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} B_{f1} &= k1' * B_{f1}' \\ B_{f1}' &= 1.0 \\ B_{f2} &= 1.2 \\ B_{f3} &= 1.5 \end{aligned}$$

Obteniéndose de esta manera la siguiente ecuación:

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

En esta ecuación se ha introducido el parámetro  $k1'$  para proporcionar una corrección de los efectos de las diferentes alturas de las capas asfálticas.

- Para fisuras abajo - arriba:

$$k1' = \frac{1}{0.000398 + \frac{12}{1 + e^{(11.02 - 3.49 * hac)}}$$

- Para fisuras arriba - abajo:

$$k1' = \frac{1}{0.01 + \frac{12}{1 + e^{(15.676 - 2.8186 * hac)}}$$

La función para calcular las fisuras por fatiga son:

- Para fisuras abajo - arriba (%del área total):

$$FC_{abajo-arriba} = \left( \frac{6000}{1 + e^{(c1 * c1' + c2 * c2' * \log 10(D * 100))}} \right) * \left( \frac{1}{60} \right)$$

Donde:

$FC_{abajo-arriba}$	=	Fisuras por fatiga abajo - arriba (% del área total).
$D$	=	Daño por fatiga abajo - arriba.
$C1$	=	1
$C1'$	=	$-2 * C2'$
$C2$	=	1
$C2'$	=	$-2.40874 - 39.748 * (1 + hac)^{-2.856}$

Esta función fue obtenida con la observación de 461 secciones y presenta las siguientes características:  $Se = 6.2\%$  y  $Se/Sy = 0.947$ .

- Para fisuras arriba - abajo (pies/milla):

$$FC_{\text{arriba-abajo}} = \left( \frac{1000}{1 + e^{(7-3.5*\log_{10}(D*100))}} \right) * 10.56$$

Donde:  $FC_{\text{arriba-abajo}}$  = Fisuras por fatiga arriba - abajo (pie/milla).  
D = Daño por fatiga arriba - abajo.

Esta función fue obtenida con la observación de 414 secciones y presenta las siguientes características:  $Se = 1242.25$  pie/milla y  $Se/Sy = 0.977$ .

El modelo de fisuras por fatiga en mezclas de concreto asfáltico fue calibrado con base en 82 secciones del Long Term Pavement Performance (LTPP), localizadas en 24 estados; en las cuales, se realizaron 441 observaciones para piel de cocodrilo y 408 para fisuras longitudinales.

#### *Factores que afectan las fisuras por fatiga en los pavimentos flexibles*

Muchos factores afectan las fisuras por fatiga en las capas del pavimento, algunas de las cuales pueden ser controladas o modificadas, mientras que el resto de los factores externos no se puede controlar. Los siguientes factores afectan la cantidad de fisuras por fatiga en las capas asfálticas:

- Espesor de la capa asfáltica.
- Módulo dinámico de la capa asfáltica.
- Grado del ligante de la mezcla asfáltica.
- Volumen de aire en las capas asfálticas.
- Volumen de ligante efectivo en las capas asfálticas.
- Espesor de la base.
- Módulo resiliente de la subrasante.
- Configuración de carga.
- Nivel de carga, área de contacto y presión de inflado.
- Repeticiones de carga.
- Condiciones ambientales y temperatura.

Mientras muchos de estos parámetros se mantienen constantes a través del periodo de diseño, otros pueden variar en cada periodo analizado o con la edad del pavimento. Para obtener resultados exactos, todas las variables que producen efectos significativos en la repuesta del pavimento deben ser evaluados por separado. La acumulación de fisuras por fatiga, definido en esta guía, fue determinado teniendo en cuenta:

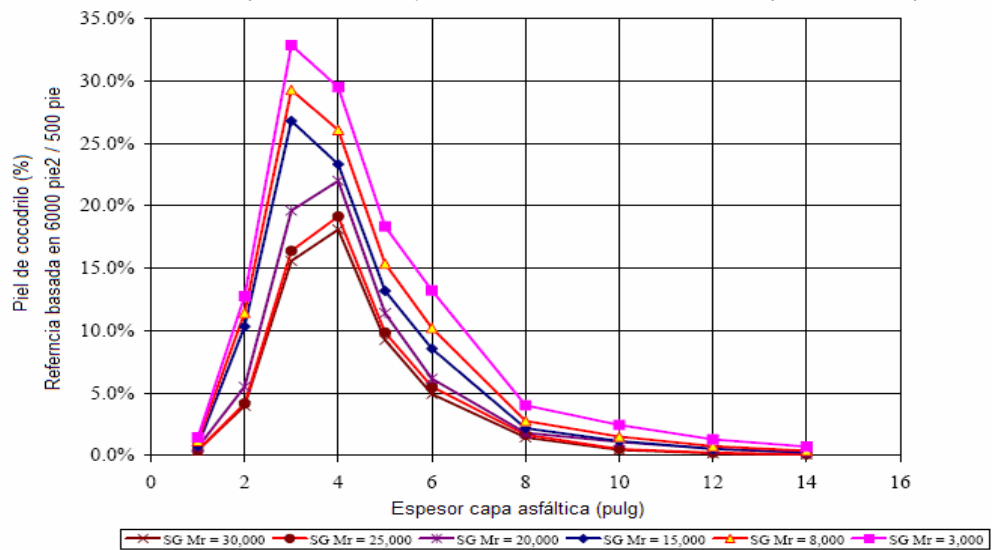
- Edad del pavimento: Tiene en cuenta los cambios en el módulo dinámico de las capas asfálticas y el endurecimiento del ligante asfáltico.

- Mes: Tiene en cuenta las variaciones de la temperatura superficial del pavimento, la cual afecta el módulo dinámico; además, la variación de humedad en las capas de base y subrasante.
- Velocidad de operación (frecuencia de carga): Afecta el módulo dinámico de la mezcla asfáltica.
- Configuración de carga:
  - Ejes simples: de 3.000 a 41.000 lb, en incrementos de 1.000 lb.
  - Ejes tandem: de 6.000 a 82.000 lb, en incrementos de 2.000 lb.
  - Ejes tridem: de 12.000 a 102.000 lb, en incrementos de 3.000 lb.
- Temperatura y condiciones ambientales:
  - La temperatura es un factor importante que afecta la rigidez del asfalto, por lo tanto afecta el módulo dinámico de la mezcla asfáltica, en función de la profundidad y del tiempo.
  - Las condiciones ambientales son representadas por los cambios de humedad en las capas de materiales no conglomerados ya que este afecta el módulo resiliente de estas capas, conllevando además a aumentar la relación modular entre capas sucesivas, a aumentar el esfuerzo de tracción de las capas asfálticas y a aumentar el nivel de daño por fatiga.

*El espesor de las capas asfálticas y el módulo resiliente en la piel de cocodrilo (abajo - arriba)*

Para todos los diferentes espesores de las capas asfálticas, se observa que la piel de cocodrilo aumenta cuando el soporte de la subrasante decrece. Además, se ha observado que el impacto del soporte de la subrasante, en la generación de piel de cocodrilo, es directo al espesor de la capa asfáltica.

Figura 2.6.10 Variación del daño piel de cocodrilo y el módulo de la subrasante en el espesor de la carpeta asfáltica.





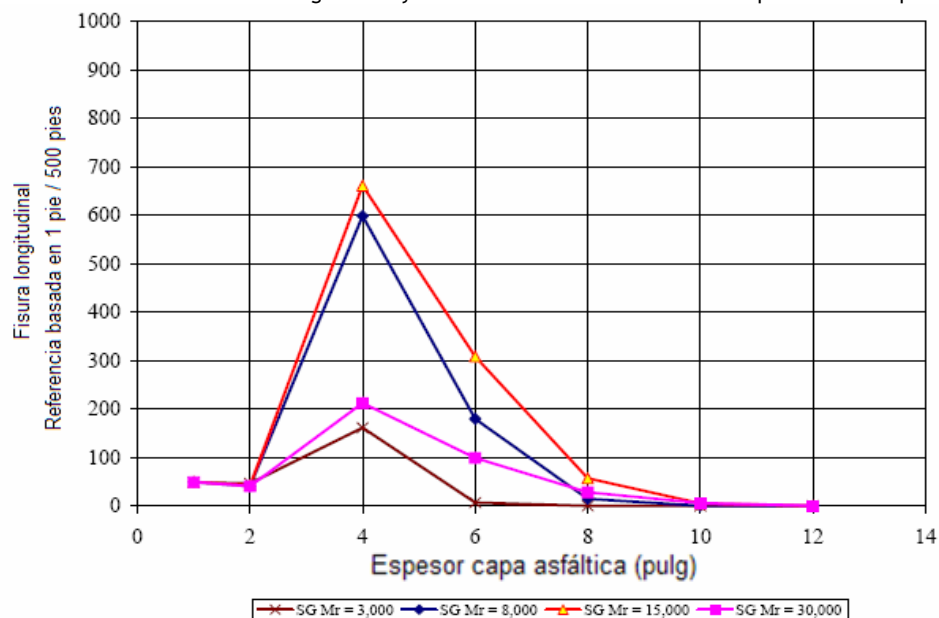
Con base en la figura anterior, la principal conclusión es que para un buen comportamiento se debe escoger el menor espesor posible de capa asfáltica y que el mayor potencial de fisura por fatiga la tienen las capas asfálticas que tienen un espesor entre 3" y 4". El punto importante, es reconocer que la magnitud del esfuerzo de tensión no necesariamente aumenta con el decrecimiento de la capa asfáltica, de hecho, cuando el espesor de la capa asfáltica es reducido por debajo del "máximo nivel de fisuración 3" y 4"., el esfuerzo de tensión realmente comienza a decrecer y puede convertirse en un esfuerzo de compresión; esto, claramente explica que el comportamiento a fatiga puede mejorar reduciendo el espesor de la capa asfáltica.

Según este orden de ideas, las capas delgadas de materiales asfálticos no deben tener problemas significativos de fatiga, convirtiéndose el ahuellamiento de esta manera en el principal criterio de diseño en este tipo de pavimentos. Una de las desventajas de este tipo de pavimentos es que el estado de esfuerzos en las capas de materiales no conglomerados aumenta, incrementando de esta manera el ahuellamiento de estas capas. Por lo tanto, estos aspectos deben de tenerse en cuenta cuando se vayan a usar capas delgadas de material asfáltico.

*El espesor de las capas asfálticas y el módulo de la subrasante en las fisuras longitudinales (arriba - abajo)*

Un estudio similar al de la piel de cocodrilo indica la influencia del espesor de las capas asfálticas y el módulo de la subrasante en las fisuras longitudinales. En general, el daño de fatiga es máximo en las capas asfálticas de 3" y 4".

Figura 2.6.11 Variación del daño fisura longitudinal y el módulo de la subrasante en el espesor de la carpeta asfáltica.



Sin embargo, se debe observar que la influencia del módulo de la subrasante es totalmente opuesta a la tendencia del daño mostrada en la piel de cocodrilo, en donde si el módulo aumenta las fisuras longitudinales decrecen. Por lo tanto, alguna variable que tienda a mejorar el soporte de la fundación tenderá a disminuir las fisuras longitudinales (rigidizar la subrasante, estabilizar las capas de base o subbase, separar la profundidad de la tabla de agua, presencia de un lecho rocoso cerca de la superficie).

### *Procedimiento para la predicción de fisuras por fatiga en capas asfálticas*

La predicción de fisuras por fatiga asociadas a las cargas en los pavimentos flexibles, se realiza de la siguiente manera:

1. Tabular la información de entrada. Resumir las entradas necesarias para la predicción de fisuras (ver Capítulo 2.3 - materiales).
2. Procesar la información de tránsito. El procesamiento de la información de tránsito es necesaria para la determinación del número equivalente de ejes simples, tandem y tridem producidos en todo el espectro de carga (ver Capítulo 2.5 - tránsito).
3. Procesar la información de los perfiles de temperatura del pavimento. Los perfiles horarios de temperatura generados con el EICM (distribución no lineal) necesitan convertirse en una distribución lineal equivalente, en cada mes del periodo de análisis.
4. Procesar la información mensual de la humedad. Los efectos del cambio de humedad en los módulos de las capas no conglomeradas debe ser determinado (ver Capítulo 2.4 - clima).
5. Calcular el estado de esfuerzos y deformaciones. Calcular los esfuerzos de tensión correspondientes a cada configuración de carga, nivel de carga, posición de la carga, edad del pavimento, mes analizado y diferencia de temperatura en cada mes del periodo de diseño tanto en la parte superior como en la parte inferior de las capas asfálticas. Usando módulos y relación de Poisson de los materiales determine la deformación elástica en cada punto de interés, luego calcule el daño en cada periodo analizado y súmelos para determinar el daño acumulado en cada capa asfáltica. La deformación elástica se determina con la siguiente expresión matemática:

$$\varepsilon_{rx,y} = \frac{1}{E^*} (\sigma_{x,y} - \mu\sigma_{y,x} - \mu\sigma_z)$$

El daño de cada capa se calcula usando la siguiente expresión matemática:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i}$$

Donde:  $D_i$  = Daño, en el periodo i.  
 $n_i$  = Tráfico actual, en el Periodo i.  
 $N_i$  = Tráfico permitido bajo las condiciones del periodo i.

6. Calcular las fisuras por fatiga. Calcular las fisuras de cada capa asfáltica usando el daño calculado. Las fisuras arriba - abajo son calculadas utilizando el daño acumulado en la superficie de la capa asfáltica y las fisuras abajo - arriba son calculadas usando el máximo daño acumulado en el fondo de la capa asfáltica.

*Confiabilidad del modelo de predicción de fisuras por fatiga en capas asfálticas*

La confiabilidad del diseño es obtenida por el nivel de confiabilidad deseado en la predicción de las fisuras por fatiga.

$$FC\_P = (FC_i + Se_{FC_i} * Z_p)$$

Donde:  $FC\_P$  = Confiabilidad de las fisuras predichas en n nivel P (% o pie/milla)  
 $FC_i$  = Fisuras predichas con la información suministrada - 50% de confiabilidad (% o pie/milla).  
 $Se_{FC_i}$  = Error estándar de fisuración en el nivel de predicción.  
 $Se_{FC_{\text{abajo-arriba}}} = 0.5 + 12 / (1 + e^{1.308 - 2.949 * \log D})$   
 $Se_{FC_{\text{arriba-abajo}}} = 200 + 2300 / (1 + e^{1.072 - 2.1654 * \log D})$   
 $Z_p$  = Desviación normal.

*Modificaciones del diseño de pavimento flexible para disminuir el fisuramiento por fatiga en capas asfálticas*

- Piel de cocodrilo (fisuras abajo - arriba)

De la información obtenida del Long Term Pavement Performance (LTPP), se nota que el mayor grado de fallas piel de cocodrilo se presenta en capas asfálticas entre 3" y 4", por lo tanto aumentar el espesor de la capa asfáltica es una simple forma de reducir este tipo de falla. El uso de capas asfálticas pequeñas debe hacerse con mucho cuidado especialmente con la rigidez de ésta (debe ser baja), aunque este tipo de capas ayudan a incrementar el ahuellamiento de las capas de materiales no conglomerados que se encuentran por debajo. Mientras que el uso de capas asfálticas grandes el Ingeniero debe tratar de usar una rigidez alta, tendiente a disminuir el esfuerzo de tensión en el fondo de la capa y a aumentar la resistencia a la piel de cocodrilo. Además hay que tener en cuenta que entre más sea el volumen efectivo de ligante ( $V_{beff}$ ) y menor sea el volumen de vacíos ( $V_a$ ), la vida de fatiga aumentará significativamente.

El Ingeniero también debe tener en cuenta que los daños por fatiga no sólo son ligados a las propiedades de las capas asfálticas sino a la relación modular de capas consecutivas, por lo tanto, cualquier medida para disminuir la relación modular indirectamente reducirá los daños por fatiga (estabilización química de capas, uso de capas de mejor calidad/rigidez, incrementar el espesor de la base o subbase).

Finalmente, la presencia de humedad puede tener un impacto significativo en las capas de materiales no conglomerados, por lo tanto el diseño de subdrenajes o la elevación del nivel de la carretera con respecto al nivel freático proporcionará beneficios positivos para reducir/eliminar la piel de cocodrilo en los pavimentos flexibles.

- Fisuras longitudinales (fisuras arriba - abajo).

La influencia del espesor de la capa asfáltica en la piel de cocodrilo tiene la misma influencia en las fisuras longitudinales. En forma general los dos tipos de fisuras por fatiga aparecen en capas asfálticas entre 3" y 4". Entre mayor sea el volumen de ligante efectivo ( $V_{beff}$ ) y menor el volumen de aire ( $V_a$ ) en las capas asfálticas la vida a fatiga será mayor. Como principio fundamental, las fisuras longitudinales se incrementarán con el uso de mezclas asfálticas de baja rigidez, debido a que ocurrirán esfuerzos de tracción superficiales más grandes.

La diferencia entre el soporte de la subrasante en la piel de cocodrilo y las fisuras longitudinales es el principal aspecto que el Ingeniero debe apreciar y entender. En general, la presencia de capas grandes y/o rígidas en la estructura del pavimento tenderá a aumentar el esfuerzo de tensión en la superficie generando fisuras longitudinales, mientras que sucede todo lo contrario con la piel de cocodrilo.

Si la formación de fisuras longitudinales es factible el Ingeniero debe evaluar cuidadosamente las propiedades de las capas asfálticas y asegurar que todos los tipos de daños posibles son minimizados lo mejor posible.

Finalmente, el Ingeniero debe reconocer que de la elección entre fisuras longitudinales y piel de cocodrilo, las primeras son más ventajosas ya que la presencia de éstas, como de deformaciones en la superficie pueden ser tratadas en futuras estrategias de rehabilitación; mientras que, la presencia de piel de cocodrilo requiere el cambio de toda la capa o el uso de sobrecapas.

### *Modelo de fisuración por fatiga en capas estabilizadas químicamente*

La caracterización precisa del comportamiento de las capas estabilizadas químicamente es un tema técnico muy complejo ya que las fisuras por fatiga de estas capas no son observadas directamente en la superficie del pavimento. Las fisuras por fatiga de capas estabilizadas químicamente pueden ser resultado de las siguientes consideraciones:

- Si la capa estabilizada químicamente está directamente debajo de la capa asfáltica, la fisura por fatiga de la capa estabilizada químicamente será una fracción de la fisura reflejada en la superficie de la capa asfáltica.
- Si es colocada una capa de materiales no conglomerados entre la capa estabilizada químicamente y la capa asfáltica, la fisura de la capa estabilizada químicamente puede ser reducida o eliminada en la superficie de la capa asfáltica.
- Si la capa estabilizada químicamente está sujeta a daños por fatiga, el módulo puede ser reducido significativamente y causará aumento en los esfuerzos de tensión en la capa asfáltica superior.

Mientras muchos modelos pueden ser utilizados para caracterizar el comportamiento de las capas estabilizadas químicamente, la relación utilizada por la Guía es:

$$\log CTB_{\text{Daño}} = \frac{\left(0.972\beta_{c1} - \left(\frac{\sigma_t}{MR}\right)\right)}{0.0825 * \beta_{c2}}$$

Donde:  $\beta_{c1}, \beta_{c2}$  = Factores de calibración de campo.  
 $\sigma_t$  = Máximo esfuerzo de tensión inducido por el tráfico en el fondo de la capa estabilizada químicamente (PSI).  
 MR = Módulo de rotura a los 28 días (PSI).  
 Nf = Número de repeticiones para fisurar la capa estabilizada químicamente.

El análisis de fisuras por fatiga de capas estabilizadas químicamente es llevado a cabo en periodos de 2 - 4 semanas, obteniendo como resultado el daño incremental. La siguiente relación es usada para convertir el daño en el módulo del siguiente periodo de análisis:

$$E_{CSM}(t) = E_{CSM}(\text{min}) + \frac{(E_{CSM}(\text{max}) - E_{CSM}(\text{min}))}{(1 + e^{(-4+4*D)})}$$

Donde:  $E_{CSM}(t)$  = Nuevo módulo de la capa en el nivel de daño D (PSI).

- E<sub>csm</sub> (max) = Máximo módulo de la capa cuando está intacta (PSI).  
E<sub>csm</sub> (min) = Mínimo módulo de la capa cuando está totalmente destruida (PSI).  
D = Nivel de daño en la capa (Decimal, ej: 0.60).

La relación empírica usada para relacionar el daño en capas estabilizadas químicamente y las fisuras en estas mismas capas está definida por:

$$C = \frac{1000}{(1 + e^{(1-D)})}$$

- Donde: C = Fisuras de la capa (pie / 500 pies).  
D = nivel de daño en la capa (Decimal, ej: 0.60).

Actualmente, las fisuras por fatiga en capas estabilizadas químicamente y su posterior reflexión a capas superiores no han sido calibradas en campo debido a la complejidad, a los datos requeridos en el diseño y los datos de comportamiento. Como un resultado los factores de calibración de campo para la expresión de vida de fatiga, se tienen:

$$B_{c1} = 1.0$$
$$B_{c2} = 1.0$$

Finalmente, como la información de la calibración - validación no existe, ninguna solución confiable es disponible. Los datos que son usados simplemente son la desviación estándar (varianza) asociada con las fisuras normales por fatiga de capas estabilizadas químicamente.

#### *Procedimiento para la predicción de fisuras por fatiga en capas estabilizadas químicamente*

Para predecir cargas asociadas al daño de fisuras por fatiga en capas estabilizadas químicamente en sistemas de pavimentos semirígidos, se necesita seguir los siguientes pasos:

- Organizar la información de entrada. Resumir todos los datos necesarios para predecir los efectos del daño en capas estabilizadas químicamente (ver Capítulo 2.3 - Materiales).
- Procesar la información de tránsito. El procesamiento de la información de tránsito necesita ser llevado a cabo para determinar el número equivalente de ejes simples, tandem y tridem producidos por el espectro de carga (ver Capítulo 2.5 - Tránsito).

- Procesar la información del perfil de temperatura del pavimento. El perfil de temperatura horario generado por el EICM (distribución no lineal) necesita ser convertido en una distribución de temperatura lineal equivalente para cada mes de análisis, la cual en conjunto con el espectro y la velocidad de operación establecen el valor del módulo de la capa para el periodo de análisis.
- Procesar la información mensual de humedad. El efecto del cambio de humedad en el módulo de las capas de materiales no conglomerados debe ser determinada (ver Capítulo 2.4 - Clima).
- Calcular el estado de esfuerzos. Calcular los esfuerzos de tensión críticos correspondientes a cada tipo de carga, nivel de carga, posición de carga, edad del pavimento y diferencia de temperatura en cada mes durante el periodo de diseño, en el fondo de la capa estabilizada químicamente. Calcular el daño en cada periodo y acumularlo a lo largo del periodo de diseño, el cual sirve como base para determinar el módulo corregido de la capa estabilizada químicamente y a su vez para calcular el daño del siguiente periodo de análisis.
- Calcular las fisuras por fatiga de la capa estabilizada químicamente (si no se presentan fisuras en la superficie). Use el estado de esfuerzos de la capa estabilizada químicamente para calcular la cantidad de fisuras reflejadas en las capas asfálticas. Si la capa no presenta fisuras, use el daño acumulado para ajustar (reducir) el módulo de la capa estabilizada químicamente en el siguiente periodo de análisis para predecir el incremento en el estado de esfuerzos de tensión en la capa asfáltica.

#### *Modificaciones del diseño para reducir las fisuras por fatiga en las capas estabilizadas químicamente*

Existen muchas consideraciones importantes que deben ser hechas por el Ingeniero cuando utiliza capas estabilizadas químicamente. Las capas estabilizadas químicamente proporcionan muchas ventajas en el comportamiento de un pavimento: reduce la relación modular con las capas asfálticas, reduce el esfuerzo/deformación por tensión en el fondo de las capas asfálticas, reduciendo a su vez la probabilidad de que ocurra la piel de cocodrilo y tiende a reducir el estado de esfuerzos en las capas inferiores, reduciendo a su vez la deformación permanente (ahuellamiento) de las capas inferiores incluyendo la subrasante.

Mientras los atributos mencionados anteriormente sean teóricamente posibles, la falla más común que se presentará, especialmente en capas muy rígidas, será la fisura por fatiga y generalmente se reflejará a las capas asfálticas. Capas antirreflejo (3" o 4" mínimo) han sido usadas satisfactoriamente en muchas partes del mundo, sin embargo la clave del éxito está 100% asociada con la habilidad del diseñador de mantener aislada la humedad de esta capa, ya que si ésta se satura la estructura de pavimento fallará por cortante.

Otro aspecto significativo está relacionado con la necesidad de mantener la rigidez inicial, de la capa estabilizada químicamente, durante el mayor tiempo posible durante el periodo de diseño. La clave está en que el Ingeniero debe reconocer que cualquier cambio que reduzca el daño en esta capa tenderá a alargar su longevidad: minimizar los factores que aumentan los esfuerzos de tensión en la capa y aumentar los factores que incrementan la resistencia a flexión de la capa.

#### *Modelo de fisuras térmicas (fisuras transversales)*

El modelo de fisuras térmicas de la Guía es una versión mejorada del modelo desarrollado en la investigación SHRP A-005. Recientemente, el estudio NCHRP 9-19 “modelos superpave” facilitó la incorporación del modelo de fisuras térmicas (TCMODEL) al software de diseño. Muchas actualizaciones fueron realizadas al TCMODEL y al software: incorporación de una mejor técnica de análisis para convertir la información del ensayo de tracción indirecta Superpave (IDT) en propiedades viscoelásticas fundamentales de las mezclas asfálticas, recalibración del TCMODEL para reflejar procedimientos de análisis actuales y adicionar nuevos datos de campo, y el desarrollo de información comprensiva en el TCMODEL.

La cantidad de fisuras transversales esperadas en el pavimento es predicha relacionando la profundidad de la fisura con la cantidad de fisuras (frecuencia), con la siguiente expresión:

$$C_f = \beta_1 * N\left(\frac{\log C / hac}{\sigma}\right)$$

Donde:

- $C_f$  = Cantidad de fisuras térmicas observadas.
- $B_1$  = Coeficiente de regresión determinado con la calibración de campo.
- $N$  = Distribución normal evaluado a la profundidad  $z$ .
- $\sigma$  = Desviación estándar del log de la profundidad de las fisuras en el pavimento.
- $C$  = Profundidad de la fisura.
- $hac$  = espesor de la capa asfáltica.

#### *Modelo de respuesta estructural para fisuras térmicas*

Los siguientes factores afectan la magnitud de las fisuras térmicas predichas en las capas asfálticas:

- Perfil de temperatura de la capa asfáltica.
- Creep desarrollado.
- Temperatura del ensayo de creep.



- Resistencia a la tracción.
- Volumen de vacíos en el agregado mineral (VAM).
- Coeficiente de contracción térmico del agregado.
- Coeficiente de contracción térmico de la mezcla asfáltica.
- Espesor de la capa asfáltica.
- Volumen de vacíos.
- Vacíos llenos de asfalto.
- Penetración a 25°C.

Mientras la mayoría de los parámetros, anteriormente mencionados, permanezcan constantes a lo largo del periodo de diseño otros variarán dependiendo del mes analizado. Para mayor exactitud en el análisis todos los casos que generen cambios significativos en los esfuerzos deben ser evaluados por separado. El incremento de las fisuras térmicas definido en la Guía fue determinado para cada mes teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Perfil de temperatura en la capa asfáltica. La metodología usada en el modelo de predicción de fisuras térmicas utiliza el algoritmo del EICM para determinar el perfil de temperatura en la capa asfáltica durante todo el periodo de diseño, lo que permite la predicción de esfuerzos térmicos en una profundidad de la capa asfáltica determinada y en un tiempo determinado.
- Creep desarrollado. Evaluaciones a 0, -10 y -20 °C se realizan para calcular las propiedades visco - elásticas en las cuales está basado el análisis de fisuras térmicas basándose en la Ley de Hooke. Esto permite obtener los parámetros de fractura usados para calcular el crecimiento de la longitud de las fisuras térmicas.
- Resistencia a tracción. Medida indirecta que también pueden calcular las propiedades visco - elásticas en las cuales está basado el análisis de fisuras térmicas. Esto permite obtener los parámetros de fractura usados para calcular el crecimiento de la longitud de las fisuras térmicas.

#### *Procedimiento para la predicción de fisuras térmicas*

Para determinar la cantidad de fisuras térmicas es necesario seguir el siguiente procedimiento:

- Reunir los datos de entrada. Resumir los datos necesarios para predecir las fisuras térmicas: características de la mezcla asfáltica - resistencia a la tracción indirecta, volumen de vacíos, volumen de vacíos llenos de asfalto, vacíos del agregado mineral, penetración y creep (ver Capítulo 2.3 - Materiales).
- Desarrollar la curva maestra del creep. Una técnica mejorada de análisis de datos es proporcionada en el Performancea MASTER.

- Predecir esfuerzos térmicos. Usando la teoría de transformación visco - elástica, la predicción puede ser relacionada a la relajación del módulo de la mezcla asfáltica. Conocimiento acerca de este parámetro unido a la información de temperatura obtenida del Performancea EICM permite la predicción de esfuerzos a cualquier profundidad de la capa y tiempo. Esto es realizado por el modelo TCMODEL.
- Calcular el crecimiento de la longitud de las fisuras térmicas. Las Leyes de Paris son usadas para calcular el crecimiento de la longitud de las fisuras térmicas en la capa asfáltica.
- Calcular la longitud de las fisuras térmicas. Usando la formula presentada al inicio de esta sección.

#### *Suposiciones del modelo de fisuras térmicas*

La máxima cantidad de fisuras térmicas asumida es:

$$Cf_{max} = 400 \text{ pie}/500 \text{ pies}$$

Esto quiere decir que hay una fisura a lo largo de todo el ancho del carril (12") cada 15". Además el modelo no puede predecir más del 50% del valor máximo, porque la falla ocurre cuando la profundidad promedio de la fisura es igual al espesor de la capa asfáltica.

#### *Confiabilidad del modelo de fisuras térmicas*

La calibración del modelo de fisuras térmicas fue realizada en los tres niveles de análisis. 42 secciones fueron usadas para la calibración: 22 secciones del Long Term Pavement Performance (LTPP), 14 secciones del programa canadiense C-SHRP, 1 sección de Peoria - Illinois y 5 del Minesota DOT.

La confiabilidad del modelo fue evaluado de dos maneras diferentes: usando las temperaturas históricas reales de los pavimentos durante el periodo de diseño y usando temperaturas estimadas basadas en los datos de promedios históricos. Las fisuras térmicas fueron comparadas a las fisuras medidas y se encontraron los errores de predicción (-9" y 16.2" respectivamente).

Basados en la información obtenida para cada nivel de análisis, las siguientes relaciones fueron desarrolladas para el error estándar de la confiabilidad de las fisuras térmicas:

- Nivel 1 =  $Se_{TC\_1} = 0.2474 * THERMAL + 10.619$
- Nivel 2 =  $Se_{TC\_2} = 0.3371 * THERMAL + 14.468$
- Nivel 3 =  $Se_{TC\_3} = 0.6803 * THERMAL + 29.197$

Donde:  $Se_{TC_i}$  = Error estándar de las fisuras térmicas estimadas (pie/500pies), en el nivel de análisis i.  
THERMAL = fisuras térmicas predichas (pie/500pies).

### *Modificaciones del diseño para reducir las fisuras térmicas*

El factor más importante que afecta las fisuras térmicas es la rigidez de la mezcla asfáltica, por lo tanto la modificación necesaria es reducir la rigidez de la capa de la mezcla asfáltica en la estructura de pavimento; por lo general, se logra usando menores grados PG y usando menores espesores en las capas asfálticas (con base en la metodología mecanicista usada en la predicción de fisuras térmicas, entre mayor el espesor, la longitud de la fisura tenderá a propagarse con la profundidad).

### *Modelo de rugosidad (IRI)*

Muchos estudios han modelado satisfactoriamente la rugosidad usando los principales tipos de fallas del pavimento. Estos estudios han encontrado que la rugosidad de los pavimentos flexibles puede ser afectada significativamente por el ahuellamiento, la variabilidad de la profundidad del ahuellamiento y las fisuras por fatiga.

Muchas de esas fallas han sido correlacionadas a la rugosidad producidas por las cargas y el clima, y son predichas con técnicas de modelación mecánico - empíricas, como las expuestas en las secciones 4.2.3.1 - 4.2.3.5. Otras fallas como fisuras en bloque y fisuras longitudinales también afectan la rugosidad, sin embargo, las prácticas actuales no permiten modelar este tipo de fallas usando principios mecánico - empíricos en esta Guía. El aumento de la rugosidad debido a movimientos del suelo y otros factores climáticos son considerados en la predicción de la rugosidad mediante el uso de “factores de sitio”.

Los modelos de predicción del IRI usados en el diseño de pavimentos flexibles nuevos están en función del tipo de base, como se muestra a continuación:

- Base y subbase de agregados sin conglomerar

$$IRI = IRI_o + 0.0463 \left[ SF \left( e^{\frac{edad}{20}} - 1 \right) \right] + 0.00119 (TC_L)_T + 0.1834 (COV_{RD}) + 0.00384 (FC)_T + 0.00736 (BC_T + 0.00115 (LC_{SNWP})_{MH}$$

Donde: IRI = IRI en un tiempo determinado (m/km).  
IRI<sub>o</sub> = IRI inicial (m/km).  
 $e^{edad/20} - 1$  = Termino de edad (edad en años).

$COV_{RD}$	= Coeficiente de variación de la profundidad del ahuellamiento. Se asume el 20%.
$(TC_L)_T$	= Longitud total de fisuras transversales (m/km).
$(FC)_T$	= Fisuras por fatiga en la huella de la llanta (% del área total).
$(BC)_T$	= Fisuras de bloque (% del área total - dado por el usuario).
$(LC_{SNWP})_{MH}$	= Longitud de fisuras longitudinales de moderada y alta severidad fuera de la huella de la llanta (m/km - dado por el usuario).
SF	= Factor de sitio.

$$SF = \left( \frac{r_{SD} * (P_{0.075} + 1) * IP}{2E4} \right) + \left( \frac{\ln(FI + 1)(P_{02} + 1)[LN(R_m + 1)]}{10} \right)$$

Donde:	Rsd	= Desviación estándar de la lluvia mensual (mm).
	$P_{0.075}$	= % que pasa el tamiz 0.0075 mm.
	IP	= Índice de plasticidad del suelo.
	FI	= Índice de congelamiento promedio anual (°C - días).
	$P_{02}$	= % que pasa el tamiz 0.02 mm.
	Rm	= Pluviosidad promedio anual (mm).

La formula de IRI presenta las siguientes características estadísticas:

N	= 353 observaciones.
$R^2$	= 0.620.
RMSE	= 0.387 m/km.
Se/Sy	= 0.747.

El IRI predicho en pavimentos flexibles con un nivel deseado de confiabilidad es obtenido con la siguiente expresión:

$$IRI\_P = IRI + STD_{IRI} * Z_p$$

$$IRI\_P < 100\%$$

Donde:	IRI_P	= IRI predicho con el nivel de confianza de P (m/km).
	IRI	= IRI predicho basado en los datos de entrada (50% de confiabilidad)
	$STD_{IRI}$	= desviación estándar del IRI.
	$Z_p$	= desviación estándar normal.

La desviación estándar del IRI para pavimentos flexibles con bases y subbases granulares es derivada de la expresión de varianza que se da a continuación:

$$\text{Var (IRI)} = \text{Var (IRI}_0) + \{(0.0367 (e^{\text{edad}/20}) - 0.0367)\}^2 * \text{Var (SF)} + 1.05625\text{E-}5 * \text{Var} [(FC)_T] + 1.67445\text{E-}5 * \text{Var} [COV_{RD}] + 1.1236\text{E-}6 * \text{Var} [(TC_L)_T] + 4.9562\text{E-}5 \text{Var} [(BC)_T] + 2.4336\text{E-}6 * \text{Var} [(LC_{SNWP})_{MH}] + Se^2$$

Donde:	Var (IRI)	= Varianza del IRI en el nivel de predicción.
	Var (IRI <sub>0</sub> )	= Varianza del IRI inicial.
	Var (SF)	= Varianza del factor de sitio (estimado usando valores típicos).
	Var [(FC) <sub>T</sub> ]	= Varianza de las fisuras por fatiga en la huella de la llanta (estimado del modelo de desviación estándar de fisuras por fatiga).
	Var [COV <sub>RD</sub> ]	= Varianza del coeficiente de variación de la profundidad del ahuellamiento (estimado usando valores típicos).
	Var [(TC <sub>L</sub> ) <sub>T</sub> ]	= Varianza de la longitud total de fisuras transversales (en todos los niveles de severidad).
	Var [(BC) <sub>T</sub> ]	= Varianza de las fisuras en bloque (estimado).
	Var [(LC <sub>SNWP</sub> ) <sub>MH</sub> ]	= Varianza de la longitud de fisuras longitudinales de moderada y alta severidad fuera de la huella de la llanta (estimada usando valores típicos).
	Se <sup>2</sup>	= 0.15 (m/km) <sup>2</sup>

- Bases tratadas con asfalto

$$IRI = IRI_0 + 0.0099947(\text{edad}) + 0.0005183(FI) + 0.00235(FC)_T + 18.36 \left[ \frac{1}{(TC_S)_H} \right] + 0.9694(P)_H$$

Donde: (TC<sub>S</sub>)<sub>H</sub> = Espaciamiento promedio de fisuras de alta severidad (m).  
(P)<sub>H</sub> = Area de parche de alta severidad (% del área total).

La formula de IRI presenta las siguientes características estadísticas:

N = 428 observaciones  
R<sup>2</sup> = 0.499  
RMSE = 0.292 m/km  
Se/Sy = 0.775

La predicción del IRI de pavimentos flexibles con bases tratadas con asfalto en un nivel deseado de confiabilidad es obtenida acorde con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{IRI}_P &= \text{IRI} + \text{STD}_{\text{IRI}} * Z_p \\ \text{IRI}_P &< 100\% \end{aligned}$$

Donde:  $\text{IRI}_P$  = IRI predicho con el nivel de confianza de P (m/km).  
 $\text{IRI}$  = IRI predicho basado en los datos de entrada (50% de confiabilidad)  
 $\text{STD}_{\text{IRI}}$  = desviación estándar del IRI.  
 $Z_p$  = desviación estándar normal.

La desviación estándar del IRI para pavimentos flexibles con bases tratadas con asfalto es derivada de la expresión de varianza que se presenta a continuación:

$$\text{Var}(\text{IRI}) = \text{Var}(\text{IRIo}) + 3.047E - 5 * \text{Var}[(\text{FC})_T] + \left[ \frac{-33.59}{((\text{TC}_s)_H + 1)^2} \right]^2 * \text{Var}[(\text{TC}_s)_H] + 0.90802 * \text{Var}[P_H] + \text{Se}^2$$

Donde:  $\text{Var}[(\text{TC}_s)_H]$  = Varianza del espaciamiento promedio de las fisuras de alta severidad (estimada del modelo de fisuras térmicas).  
 $\text{Var}[(P)_H]$  = Varianza del área de los parches de alta severidad (estimada de valores típicos).

Todos los otros parámetros fueron explicados previamente.

- Bases estabilizadas químicamente

$$\text{IRI} = \text{IRIo} + 0.00732(\text{FC})_T + 0.07647(\text{SD}_{\text{RD}}) + 0.0001449(\text{TC}_L)_T + 0.00842(\text{BC})_T + 0.0002115(\text{LC}_{\text{NWP}})_{\text{MH}}$$

La formula de IRI presenta las siguientes características estadísticas:

$N$  = 50 observaciones  
 $R^2$  = 0.83  
 $\text{RMSE}$  = 0.229 m/km  
 $\text{Se/Sy}$  = 0.436

La predicción del IRI en pavimentos flexibles con bases estabilizadas químicamente con el nivel de confianza deseado es obtenido de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{IRI}_P &= \text{IRI} + \text{STD}_{\text{IRI}} * Z_p \\ \text{IRI}_P &< 100\% \end{aligned}$$

Donde:  $IRI_P$  = IRI predicho con el nivel de confianza de P (m/km).  
 $IRI$  = IRI predicho basado en los datos de entrada (50% de confiabilidad)  
 $STD_{IRI}$  = Desviación estándar del IRI.  
 $Z_p$  = Desviación estándar normal.

La desviación estándar del IRI en pavimentos flexibles con bases estabilizadas químicamente es derivada de la expresión de varianza que se presenta a continuación:

$$SD_{RD} = 0.665 + 0.2126 (RD)$$

Donde:  $SD_{RD}$  = Desviación estándar de la profundidad del ahuellamiento (mm).  
 $RD$  = Profundidad media del ahuellamiento (mm).

La formula de IRI presenta las siguientes características estadísticas:

$N$  = 824 observaciones  
 $R^2$  = 0.404  
 $RMSE$  = 0.404 m/km

#### *Procedimiento para predecir el IRI*

La predicción del IRI es simplemente uno de los daños potenciales y se predice de la siguiente manera:

- Predecir los esfuerzos del pavimento.
- Seleccionar el IRI inicial y estimar los daños potenciales (media y alta severidad en grietas longitudinales fuera de la huella de la llanta, alta severidad en parches, y deterioro en las juntas).

El deterioro de juntas se determina usando el siguiente modelo que fue determinado de observaciones del Long Term Pavement Performance (LTPP) y de otros sitios:

$$SPALL = \left[ \frac{edad}{edad + 0.01} \right] * \left[ \frac{100}{1 + 1.005^{(-12 * edad + SC)}} \right]$$

Donde:  $SPALL$  = Porcentaje de juntas deterioradas.  
 $Edad$  = Edad del pavimento desde que fue construido (años).  
 $SCF$  = Factor de escala basado en el sitio, diseño y clima.

El factor de escala (SCF) es calculado con la siguiente expresión:

$$SCF = -1400 + 350*\%AIRE*(0.5+PERF) + 3.4*f'c*0.4 - 0.2(FTCYC*edad) + 43*hpcc - 536*WC\_RATIO$$

Donde:	%AIRE	= Porcentaje de aire de la mezcla.
	Edad	= Edad del concreto desde que fue construido (años).
	PERF	= 1 con presencia de sellante y 0 sin sellante.
	f'c	= Resistencia a compresión del concreto (PSI).
	FTCYC	= Número promedio de ciclos de hielo - deshielo. Use 0
	hpcc	= Espesor de la capa asfáltica (pulg).
	WC_RATIO	= Relación agua/cemento de la mezcla.

La anterior formula tiene las siguientes características estadísticas:

$$R^2 = 0.78.$$
$$SEE = 6.8 \%$$

- Predecir el IRI.

#### 2.6.5 Consideraciones especiales de carga

Adicional al análisis del tránsito general (ejes simple, tandem y tridem), el procedimiento de diseño de pavimentos flexibles tiene un procedimiento alternativo para analizar configuraciones de ejes especiales. La primera función es el análisis estructural del comportamiento del pavimento debido a vehículos especiales, pesados y no convencionales que a menudo están sujetos a requerimientos especiales. La consideración especial de carga es una contribución importante de la Guía porque proporciona al diseñador información de la cantidad de daño que puede causar una o varias pasadas de vehículos especiales por la estructura de pavimento. Los vehículos especiales no pueden ser analizados conjuntamente con el tránsito general.

Las características del vehículo que son necesarias para el análisis son:

##### *Designación del vehículo*

Nombre del vehículo de diseño, usado solo para propósito de información.

##### *Carga por llanta*

Representa la carga en solo una llanta y se asume que las demás llantas tienen la misma carga. Solo se debe especificar una carga.



### *Presión de inflado*

Sólo se usa una presión de inflado para todas las llantas, lo cual conlleva a una misma área de contacto.

### *Tráfico promedio anual*

Número promedio anual de repeticiones. El periodo de análisis y la rata de crecimiento son usados para obtener el número total de repeticiones. El número total de repeticiones en un periodo de tiempo es usado para estimar el daño en función del tiempo. Si el usuario intenta estudiar el efecto de solo una repetición, 12 repeticiones necesitan ser entradas las cuales resultaran en una repetición por mes.; además, el usuario necesita definir el periodo de diseño como un mes.

### *Localización de la llanta*

Para el análisis del tránsito general el diseñador no tiene mucha flexibilidad en términos de la localización de las llantas, pero para condiciones especiales de carga el diseñador puede especificar más de 10 ruedas en el plano x - y.

### *Localización del análisis*

Para el análisis del tránsito general los puntos de análisis son determinados internamente por el software y el diseñador no tiene la flexibilidad de modificar los puntos de análisis. En el caso de condiciones especiales de carga el diseñador puede especificar más de 10 puntos de análisis ya que el programa requiere mínimo de 1 punto de análisis.

La localización de los puntos de análisis depende del tipo de falla. Para ahuellamiento el diseñador solo puede estar interesado en el cálculo debajo y en medio de las llantas (no se necesitan puntos por fuera de la configuración especial). Las posiciones anteriores también son utilizadas para fisuras por fatiga abajo - arriba, sin embargo, en el caso de las fisuras por fatiga arriba - abajo el diseñador puede estar interesado en observar los esfuerzos de tensión generados fuera de la configuración especial.

## 2.6.6 Calibración a condiciones locales

Una agencia interesada en adoptar el procedimiento de diseño descrito en esta Guía debe preparar un práctico plan de implementación. El plan debe incluir entrenamiento de personal, adquisición del equipo necesario, adquirir el hardware necesario y calibrar / validar a las condiciones locales.

El procedimiento de diseño mecánico - empírico en esta Guía representa un mayor mejoramiento y cambio de paradigmas del existente procedimiento de diseño empírico (ej: AASHTO 93). El uso de principios mecánico empíricos en los modelos estructurales y climáticos (temperatura y humedad) requiere mucha más información de entrada para el diseño, incluyendo distribución de cargas, mejor caracterización de materiales, factores de construcción datos horarios de clima, etc.); por lo tanto, un esfuerzo significativo se requerirá para evaluar y adoptar el procedimiento a las Agencias de vías de los diferentes países. Esto hará que el nuevo procedimiento de diseño se capaz de producir diseños más confiables y económicos incluso en condiciones críticas para otros métodos (ej: mucho tráfico pesado).

Es importante realzar que incluso el procedimiento original AASHTO de 1962 y sus múltiples actualizaciones a través del tiempo requieren muchos años de implementación por parte de las Agencias. Las agencias se enfocaron en obtener datos de entrada apropiados, aplicando valores de calibración para parámetros como el “regional” o factores climáticos, apoyo de subrasante y sus correlaciones con los ensayos comunes de laboratorio, entradas de tránsito para calcular ejes de carga equivalente, y muchos otros factores; adicionalmente, crearon secciones de prueba que fueron monitoreadas 10 o más años para calibrar los procedimientos de diseño a las condiciones locales, incluso algunos procedimientos sencillos para los estándares de hoy en día, muchos años fueron requeridos para una implementación exitosa por parte de muchas Agencias de vías.

#### *Necesidad de calibrar a las condiciones locales*

Claramente el procedimiento mecánico - empírico de la Guía requerirá un gran esfuerzo para implementar satisfactoriamente el uso del procedimiento de diseño. Sin calibración los resultados de los cálculos mecanicistas (daños) no pueden ser utilizados para predecir ahuellamiento, fisuras por fatiga ni fisuras térmicas con ningún grado de confianza. Para fisuras por fatiga ninguna de las respuestas directas del pavimento (esfuerzos, deformación o desplazamiento) pueden ser usados directamente para predecir la rata de desarrollo de fisuras desarrolladas porque un algoritmo complejo se requiere para modelar el mecanismo de fisuración que produce “daño”; este daño puede ser correlacionado con el actual fisuramiento de campo. Estos mecanismos de falla complejos pueden ser prácticamente modelados, por lo tanto, el uso de factores empíricos y la calibración es necesaria para obtener predicciones de comportamiento reales.

El procedimiento de diseño descrito en la Guía es altamente basado en principios ingenieriles mecanicistas que proporcionan una base fundamental para el diseño estructural de pavimentos. El procedimiento de diseño de pavimentos flexibles

ha sido calibrado usando información y comportamiento del Long Term Pavement Performance (LTPP), la cual incluye secciones localizadas en diferentes partes de Norte América. Los modelos de daños especialmente calibrados incluyen:

- Ahuellamiento (en capas asfálticas y no conglomeradas).
- Fisuras por fatiga (arriba - abajo y abajo - arriba).
- Fisuras térmicas.

El esfuerzo de calibración fue un gran trabajo de iteración que dió como resultado modelos de predicción de fallas con constantes nacionales. Las curvas de calibración generalmente representa el comportamiento “nacional” de pavimentos flexibles del Long Term Pavement Performance (LTPP). La calibración inicial fue basada en el 80% de la información, por lo tanto los modelos fueron “validados” con el 20% restante de la información. Desde que los modelos mostraran una validación razonable, todos los datos fueron combinados para obtener los modelos nacionales finales de calibración; sin embargo, la calibración nacional no fue enteramente adecuada para regiones específicas del país y más de una calibración local o regional es necesaria.

#### *Aproximación a la calibración*

Ya que el procedimiento de diseño está basado en principios mecanicistas los procedimientos deben trabajar razonablemente en la interfase del espacio del procedimiento analítico y la información de comportamiento de la cual el procedimiento fue calibrado; sin embargo, este es un procedimiento de diseño muy complejo y debe ser evaluado cuidadosamente por las Agencias que desean implementarlo. Las siguientes son unas recomendaciones para la validación/calibración requeridas para implementar la guía de diseño de pavimentos flexibles nuevos:

- Revisar toda la información de entrada.
- Conducir un análisis de sensibilidad.
- Conducir estudios comparativos.
- Conducir estudios de validación / calibración.
- Modificar valores por defecto y coeficientes de calibración si es necesario.

#### *Revisar toda la información de entrada*

Todas las entradas del diseño deben ser revisadas con 5 objetivos en mente:

- Determinar el nivel deseado para obtener cada uno de los datos de entrada en varios tipos de proyectos (de bajos volúmenes, altos volúmenes). La guía

permite 3 niveles para los datos de entrada y cada nivel tiene diferente procedimiento:

- Nivel 1: datos de ensayos en el sitio específico como ensayos de laboratorio de suelos y materiales, ensayos con deflectómetro de impacto y retrocálculo, y muestras de pesos y clases de vehículos del sitio.
- Nivel 2: factores regionales y propiedades de materiales de procedimientos de ensayos aceptables o ecuaciones de correlación.
- Nivel 3: valores típicos del sitio o valores por defecto.

Note que la información del Long Term Pavement Performance (LTPP) para la calibración fue una mezcla de todos los niveles. Muchos datos de entrada son muy críticos pero no son bien definidos y hay unos que las Agencias deben conducir análisis de sensibilidad como se describe a continuación.

- Determine si los valores por defecto dados en la Guía son apropiados o si necesitan ser modificados.
- Seleccionar rangos aceptables para las entradas de varios tipos de proyectos en el área geográfica de la Agencia.
- Seleccione procedimientos para obtener esas entradas para proyectos regulares. Determine el efecto de la exactitud de los valores de entrada en el resultado del diseño.
- Conduzca los ensayos necesarios para establecer los datos específicos que se necesitan para el diseño y adquiera el equipo necesario para los ensayos requeridos.

#### *Análisis de sensibilidad*

Cada agencia debe conducir análisis de sensibilidad del nuevo procedimiento de diseño, acompañado por la selección de una situación típica de diseño con todos sus datos de entrada. Se debe correr el software y predecir los daños y el IRI al final del periodo de diseño y posteriormente variar cada entrada, normalmente una a la vez, y observar el cambio producido. Tablas y gráficos deben ser preparados y evaluados. Las entradas pueden dividirse en tres grandes grupos:

- Las que tienen un efecto significativo en una o más respuestas.
- Las que tienen un efecto moderado en una o más respuestas.
- Las que tienen un efecto menor en una o más respuestas.

Las entradas que pertenecen al grupo 1 deben ser seleccionadas más cuidadosamente que las del grupo 3 ya que tienen un significativo efecto en el diseño. La sensibilidad debe ser repetida para proyectos de bajos, medios y altos volúmenes de tránsito con el fin de observar si estos tienen un efecto en las entradas.

### *Estudios comparativos*

Conducir comparaciones de los procedimientos de diseño de la Guía con los métodos existentes, seleccionando situaciones de diseño típicas (diseños previos es ideal) y obtener los datos de entrada para el diseño, correr el software y determinar los daños y el IRI en el periodo de análisis. Finalmente, evalúe veracidad el diseño con base en los resultados y la experiencia de comportamiento de la Agencia. Si existen deficiencias en la predicción de la Guía, determine las posibles razones.

### *Calibración/validación a condiciones locales*

El proceso de validación/calibración nacional ha sido completado satisfactoriamente aunque el esfuerzo ha sido grande, además los estudios de validación es altamente recomendados como un paso prudente en la implementación de los nuevos procedimientos de diseño que son bastante diferentes de los procedimientos actuales. Una base de datos de validación debe ser desarrollada para confirmar que los factores de calibración nacional o funciones, son adecuados y apropiados para los sistemas de construcción, materiales, clima, tránsito y otras condiciones que son manejadas por cada Agencias.

Prepare una base de datos de comportamiento de la Agencia y compare los resultados obtenidos con el nuevo procedimiento de diseño con el comportamiento de esas secciones locales. Estas secciones locales necesitarán la selección de por lo menos 20 secciones de pavimentos flexibles alrededor de todo el estado o departamento. Si el estado o departamento tiene diferentes climas las secciones deben ser construidas en cada clima.

El objetivo del proceso de validación/calibración es confirmar la exactitud de los modelos para predecir fallas en los pavimentos y la calidad en el desplazamiento por este. Para un área geográfica específica ajustes a los modelos nacionales pueden ser necesarios para obtener diseños de pavimentos confiables.

### *Modificaciones de los valores por defecto y coeficientes de calibración*

Si diferencias significativas son encontradas entre las fallas y el IRI predicho y medido por las agencias, ajustes deben ser realizados a los modelos de comportamiento. Estos estudios también establecen el nivel de exactitud deseado para los principales parámetros de entrada y valores por defecto. Realizar modificaciones al nuevo procedimiento de diseño son necesarios basados en todos los resultados y hallazgos de los pasos anteriores.

# **CAPITULO 3**

**SOFTWARE AASHTO 2002 PARA EL DISEÑO DEL  
PAVIMENTO**

### 3. SOFTWARE AASHTO 2002 PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO

#### 3.1 INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE AASHTO 2002

Este capítulo presenta una introducción al software AASHTO 2002 para el diseño de pavimentos donde se describen los rasgos generales del software.

La guía de diseño AASHTO 2002 está basada en un procedimiento de diseño mecánico - empírico. El procedimiento de diseño mecanicista calcula respuestas del pavimento tales como esfuerzos, deformaciones, deflexiones y desviaciones que permiten que el diseñador acumule los daños con el tiempo de diseño. Luego el procedimiento empírico relaciona el daño causado con el tiempo con los deterioros en el pavimento determinados por el diseñador. Este procedimiento se muestra a continuación en el organigrama de la Figura No 3.1. El procedimiento está integrado dentro del software de diseño.

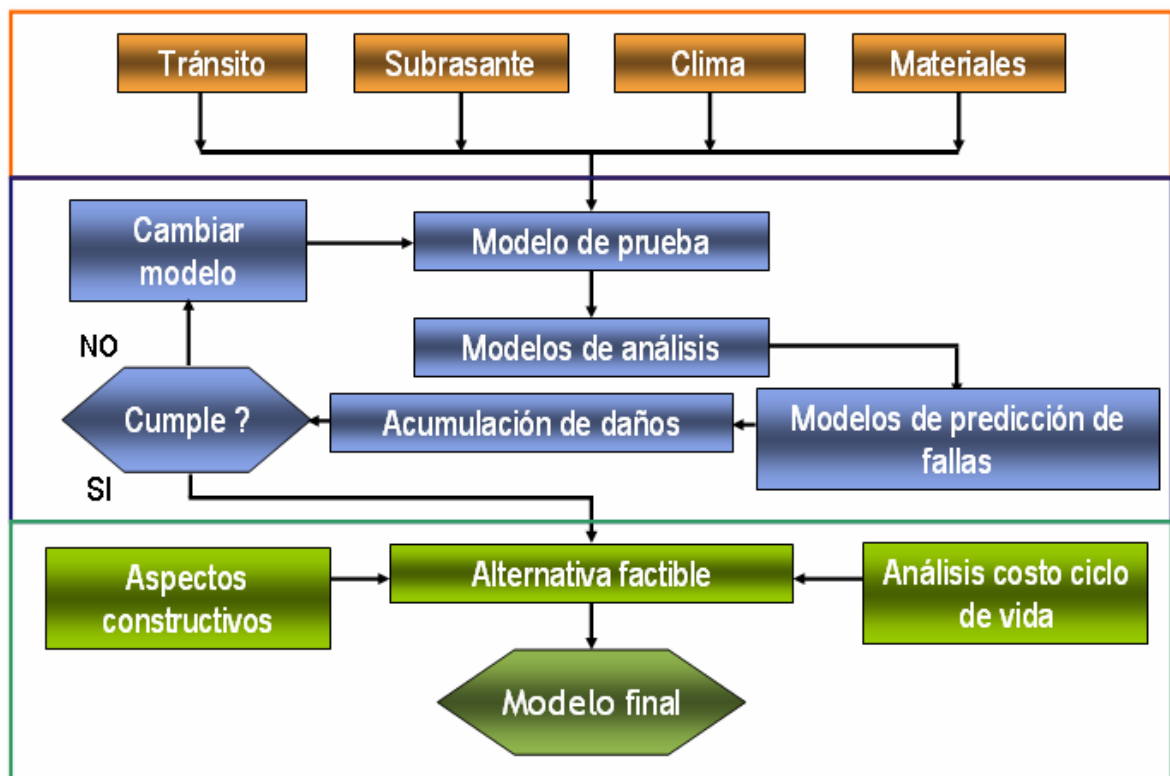


Figura 3.1 procedimiento del software de diseño aashto 2002.

El diseño de pavimentos usado en la guía AASHTO 2002, es un proceso iterativo que incluye los siguientes pasos:

- El diseñador introduce un proceso de diseño.
- El software calcula daños sobre el periodo de diseño.
- El diseño se verifica con los criterios del nivel de confiabilidad considerado. El diseño puede ser modificado como sea necesario hasta cumplir con las exigencias del nivel de confiabilidad.

El software provee:

- Entradas de las variables de diseño.
- Cálculos computacionales para la predicción de daños y
- Resultados y salidas de los análisis en formatos para uso como documentos electrónicos o copias de impresiones.

### 3.2 INSTALACIÓN DEL SOFTWARE

El CD de instalación del software se encuentra bajo el ambiente Windows. Para instalar el software se procede a lo siguiente:

- Iniciar Windows.
- Cerrar cualquier aplicación que se esté ejecutando.
- Inserte el CD de la guía de diseño en el CD - ROM.

Si la instalación no comienza dentro de unos segundos, haga lo siguiente:

- Doble click en el icono de mi PC.
- Doble click en el icono del CD - ROM de la guía de diseño.
- Correr el setup.exe.

Simplemente siga las direcciones de la pantalla para instalar la guía de diseño.

El directorio por defecto para instalar el programa es el archivo C:\DG2002. Este proporciona la posibilidad de cambiar el archivo de instalación. El programa de instalación copia varios archivos dentro del directorio del programa DG2002. El programa DG2002 contiene el programa principal y varias librerías (DLL) que son necesarias para la operación del programa. Otros directorios son copiados por la instalación del programa:

**Projects** = Este directorio contiene todos los archivos creados por este directorio. Todos los archivos creados tienen la extensión ".dgp."  
**Bin** = Este directorio contiene archivos necesarios para la operación del programa. No quite ni borre los archivos de este directorio.



- Defaults = Este directorio contiene la información de los archivos de información por defecto, que son usados para generar las entradas de los valores por defecto.
- HTML Help = Este directorio contiene los archivos de ayuda.

### 3.3 DESINTALACIÓN DEL SOFTWARE

Para desinstalar el software haga lo siguiente:

- Seleccionar el inicio de Windows
- Seleccionar panel de control
- Seleccionar agregar o quitar programas
- Desinstalar o quitar el software.

### 3.4 INICIO DEL SOFTWARE

Durante la instalación el software de la guía de diseño AASHTO 2002 será colocado en el escritorio. Seleccionar o dar doble clic en el icono de la guía de diseño. El software se abre en una pantalla que se muestra a continuación en la Figura No 3.2.

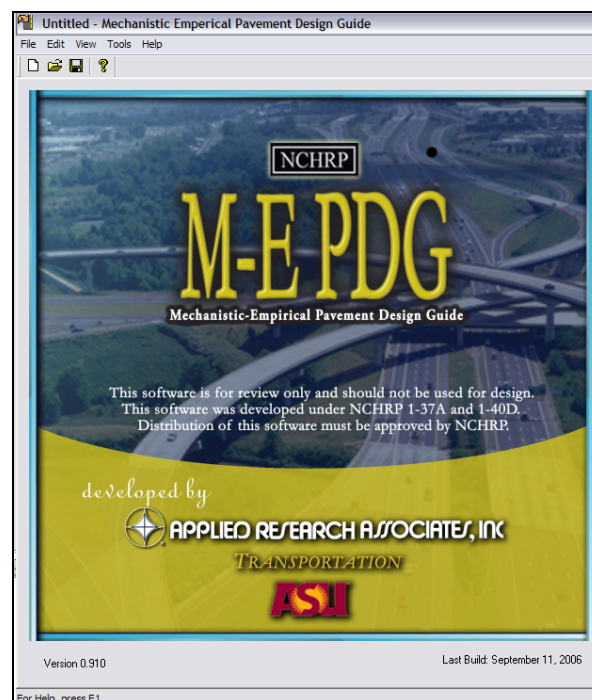


Figura 3.2 software guía de diseño aashto 2002.

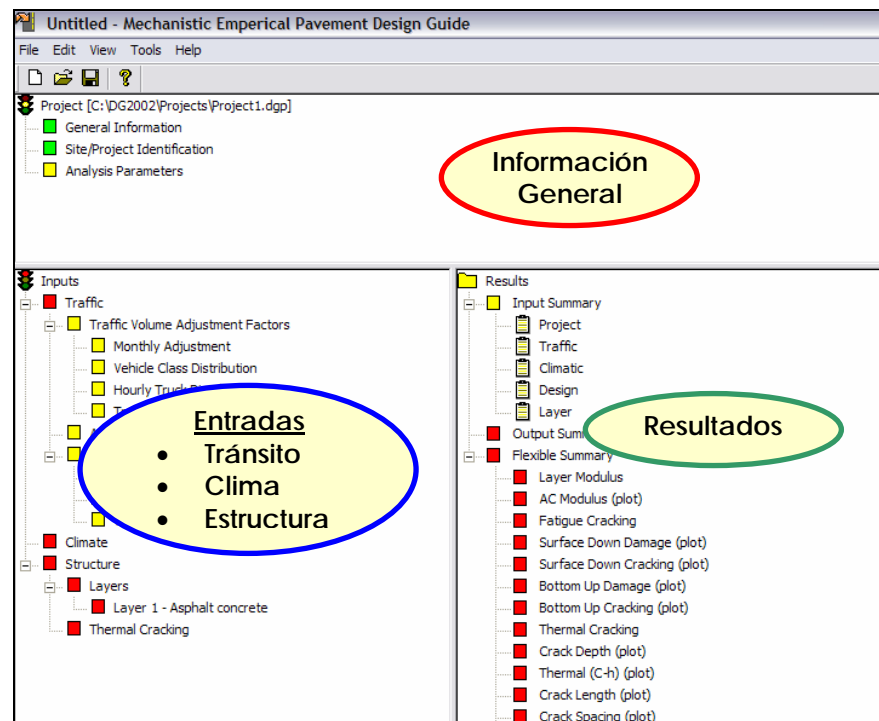


Figura 3.3 Entradas generales del software

En los iconos de las entradas aparecen los colores (ver figura 3.4): verde, amarillo y rojo que significan lo siguiente:

Verde: Quiere decir que están completas las entradas

Amarillo: Quiere decir que están valores por defecto

Rojo: Quiere decir que faltan los datos de entrada

Luego que todas las entradas son asignadas para el proceso de diseño, se debe correr el programa. El software ejecuta una análisis de daño y predicción de deterioros, entonces se pueden observar los resumen de salidas del software que se encuentran formatos de excell en datos calculados y graficas de comportamiento con el tiempo de diseño.

El software de la guía de diseño ofrece ayudas al usuario en tres niveles:

- La ayuda HTML help, la cual se puede obtener haciendo click en "?" (ver figura 3.3).
- Documentos de la guía de diseño o presione F1 para que automáticamente se dirija al documento de ayuda.
- Colocando el cursor cerca de la entrada de datos, aparece un rango de valores de ayuda.

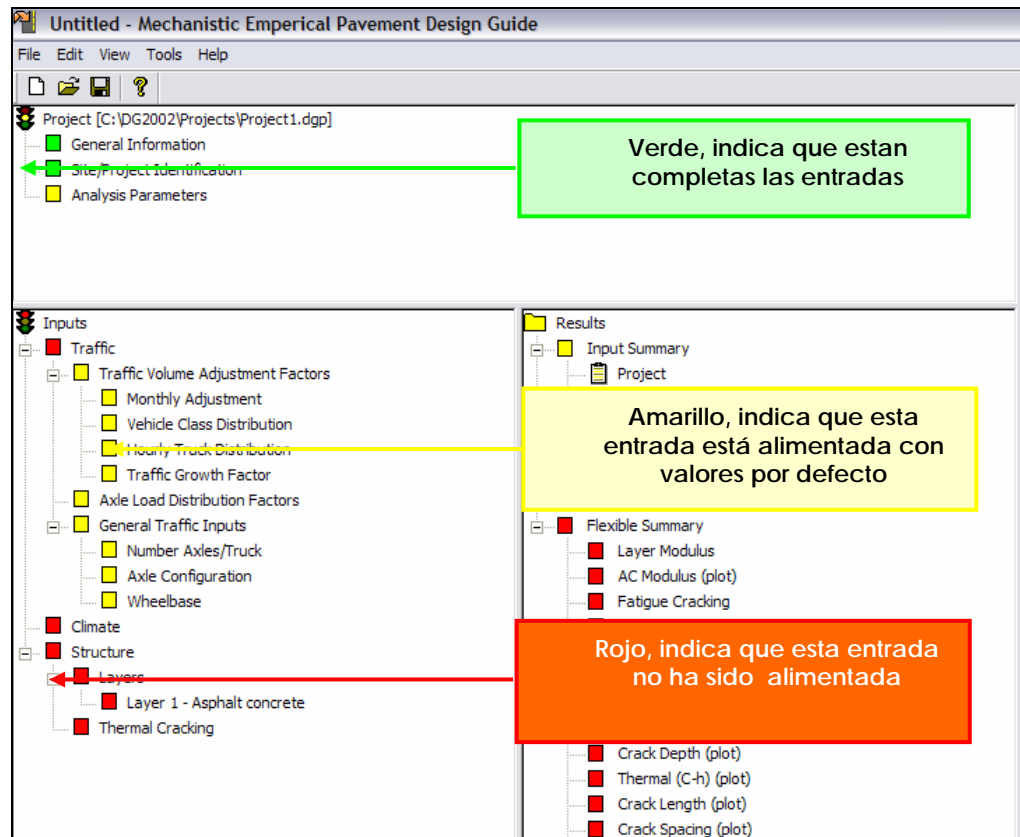


Figura 3.4 Colores de ayuda

## 4. GUÍA DE ALIMENTACIÓN DEL SOFTWARE AASHTO 2002

En este capítulo, se presenta una guía de alimentación para el software de diseño de pavimentos AASHTO 2002, a través de pantallas propias del programa, en donde se explica el significado de cada entrada y los parámetros que recomienda la nueva guía de diseño.

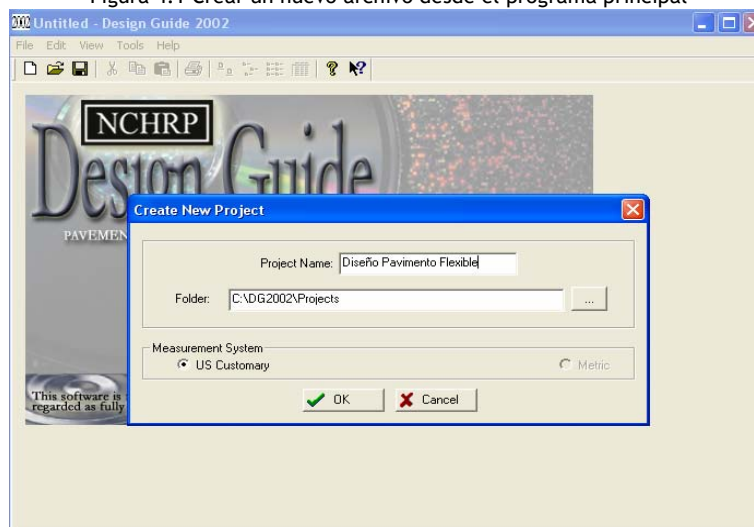
A continuación se mostrará el orden o pasos que deben seguirse en el software, para obtener una correcta ejecución del programa.

### 4.1 CREAR UN PROYECTO

En la figura No 4.1 se muestra la pantalla general del software, en el cual se debe hacer lo siguiente:

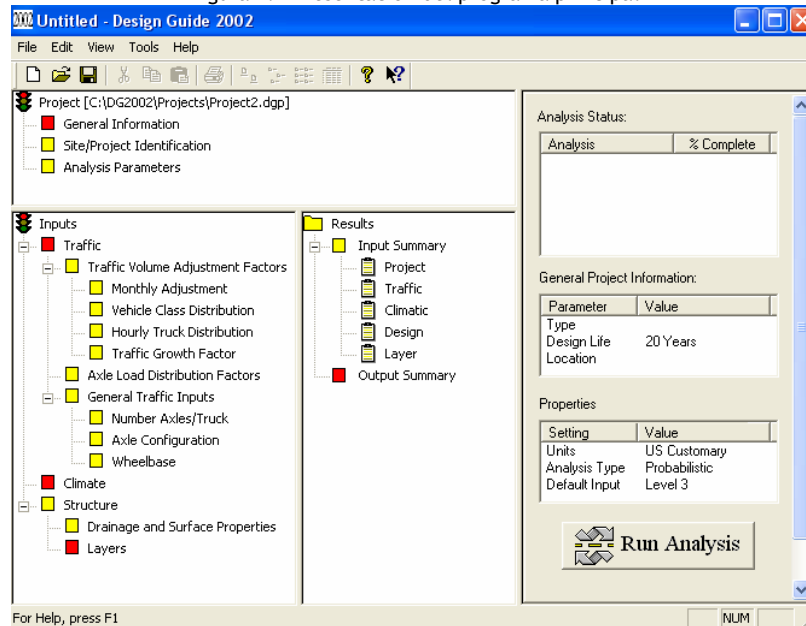
Inicialmente se debe crear un proyecto de la siguiente manera: haga click en [file] y luego en [new], y le aparecerá una pantalla nueva que deberá alimentar; en el espacio llamado [Project Name] coloque el nombre del proyecto y en el espacio llamado [Folder] asigne el archivo donde desea guardar el proyecto; por defecto el software guardará el proyecto en el archivo C:\DG2002\Projects, pero este se puede modificar dando click en el boton [...]. El sistema de unidades por defecto del software es el de unidades inglesas, no se tiene la opción de utilizar el software con las unidades metricas. Luego debe dar click en [OK] para continuar.

Figura 4.1 Crear un nuevo archivo desde el programa principal



En este momento se tiene creado el archivo de trabajo, y se procede a realizar las entradas o parámetros del diseño de pavimento, como se puede observar en la Figura No 4.2

Figura 4.2 Presentación del programa principal



Las entradas del software son las siguientes: Información general, tránsito, clima y estructura del pavimento, cada una de estas entradas tiene sus exigencias según el nivel de importancia o tipo de información con que se cuente en un proyecto. A continuación se explicará como debe hacerse para introducir los datos que se requieren como información general [General Information].

## 4.2 INFORMACIÓN GENERAL

Para iniciar con la información general se debe hacer doble click en [General Information] y le aparecerá la pantalla que se muestra en la figura No 4.3.

*Design Life (years):* Es el periodo de diseño o años del pavimento puesto en servicio a partir del mes en que el tránsito empieza a circular por el pavimento.

*Base/Subgrade construction month:* Esta entrada es requerida sólo para la construcción de pavimentos flexibles nuevos. Para alimentar esta parte debe darse el mes y el año cuando la base granular, subbase granular y subrasante se encuentran listas para construir la carpeta asfáltica.

Figura 4.3 Información general

*Pavement construction month:* Se refiere al mes y año cuando se encuentra terminada la carpeta asfáltica. Los cambios en las propiedades del material asfáltico al paso del tiempo bajo condiciones ambientales son considerados a partir del mes de la construcción del pavimento.

*Traffic open month:* Se refiere al mes y el año cuando se espera que el tránsito comience a operar sobre el pavimento. El software predice el comportamiento del pavimento a partir de este mes, pero los cambios en las propiedades de los materiales son considerados a partir de los meses de construcción del pavimento.

*Type of design (New Pavement):* Para el caso del diseño de un pavimento flexible nuevo, debe darse click en el icono “Flexible Pavement”.

Para continuar debe dar click en OK, y note que el icono de color rojo de las entradas generales ha cambiado a color verde, esto indica que esta entrada ya ha sido alimentada.

Para iniciar con la identificación del sitio del proyecto se debe hacer doble click en “Site/Projects Identification” y aparecerá la pantalla de la figura No 4.4.

*Location:* Es la localización del proyecto.

*Project ID:* Identificación del proyecto, (ejemplo, el número del contrato).

*Section ID:* Identificación del tramo del proyecto.

*Date:* Fecha de ejecución del software.

*Station/milepost format:* Es el formato de identificación de la carretera. El software presenta tres opciones:

Feet 00+00: Formato en pies.

Miles 0.000: Formato en millas.

Latitude/Longitude: Latitud y longitud del proyecto.

*Station/milepost begin:* Identificación de donde inicia del proyecto.

*Station/milepost end:* Identificación de donde termina el proyecto.

*Traffic direction:* Es la Dirección del tránsito. El software presenta las siguientes: East Bound (hacia el este), North Bound (hacia el norte), South Bound (hacia el sur), West Bound (Hacia el oeste).

Para continuar haga click en OK

Figura 4.4 Información del sitio del proyecto

Para iniciar con los parámetros de análisis se debe hacer doble click en “Analysis Parameters” como se muestra en la figura No 4.5.

*Initial IRI (in/mi):* Es el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) esperado en el pavimento después de construido, expresado en pulgadas/millas. El software presenta un rango de ayuda de 0 a 200 in/mi (para tener estas ayudas coloque el puntero o cursor en el espacio de entrada de cada parámetro), por defecto presenta un IRI de 63 in/mi equivalentes a 1.0 m/km.

Figura 4.5 Parámetros de análisis

	Limit	Reliability
<input checked="" type="checkbox"/> Terminal IRI (in/mile)	172	90
<input checked="" type="checkbox"/> AC Surface Down Cracking Long Cracking (ft/mi)	1000	90
<input checked="" type="checkbox"/> AC Bottom Up Cracking Alligator Cracking (%)	25	90
<input checked="" type="checkbox"/> AC Thermal Fracture (ft/mi)	1000	90
<input checked="" type="checkbox"/> Chemically Stabilized Layer Fatigue Fracture(%)	25	90
<input checked="" type="checkbox"/> Permanent Deformation - Total Pavement (in)	0.75	90
<input checked="" type="checkbox"/> Permanent Deformation - AC Only (in)	0.25	90

*Performance criteria:* El software automáticamente activa las entradas por defecto para pavimentos flexibles, y muestra siete (7) criterios de análisis para el diseño, que son los siguientes:

*Terminal IRI (in/mi):* Es el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) esperado en el pavimento al terminar el periodo de diseño, expresado en pulgadas/millas. El software presenta un rango de ayuda de 63 a 1260 in/mi y por defecto presenta un IRI de 172 in/mi equivalentes a 2.8 m/km.

*AC surface down cracking. Long Cracking (ft/mi):* La mayoría de las grietas por fatiga comienzan o se inician en parte inferior de la capa asfáltica y se propagan hacia la superficie del pavimento. Sin embargo, hay pruebas de grietas que se inician en la superficie y se propagan hacia abajo. Existen algunos teorías que explican este fenomeno pero no hay ningun soporte para sugerir que uno sea más aplicable que el otro. Las teorías que existen son las siguinetes:

- Altas presiones de inflado en la superficie cerca de los bordes del pavimento transmiten altas tensiones que ocasionan agrietamientos desde la superficie.
- Mezclas afálticas envejidadas en la superficie aumentan la rigidez del asfalto y combinado con las altas presiones de inflado hacen que se inicien las grietas en la superficie.

El software presenta un rango de ayuda de 500 a 2000 ft/mi y por defecto presenta un valor de 1000 ft/mi equivalente a 190 m/km.

*AC Bottom up cracking. Alligator Cracking (%):* Este tipo de fatiga se inicia primero como pequeñas grietas longitudinales en la huella de la llanta que



rápidamente se extienden y hacen conexiones entre ellas formandose la conocida piel de cocodrilo. Estas grietas se inician en el fondo de la carpeta asfáltica y se propagan hasta la superficie bajo aplicaciones repetidas de carga.

Este tipo de agrietamiento es el resultado de la flexión repetida de la carpeta asfáltica por efectos del tránsito. A continuación se indican algunas razones de altas tensiones en la parte inferior de la carpeta asfáltica:

- Espesores pequeños o débiles para la magnitud y repeticiones de carga.
- Altas cargas y presiones de inflado en las llantas.
- Materiales de mala calidad o características mecánicas insuficientes.
- Compactación inadecuada o cambios bruscos de humedad (niveles freáticos).

El software presenta un rango de ayuda de 0 a 100 % y por defecto recomienda un valor de 25%.

*AC Thermal fracture (ft/mi)*: Es debido a los cambios bruscos de temperaturas, aparecen típicamente como grietas transversales al pavimento. Estas grietas pueden ser causadas por compresiones en la superficie de la carpeta asfáltica debido a bajas temperaturas, rigidez del asfalto y/o ciclos permanentes (diarios) de cambios de temperatura.

Hay dos tipos de agrietamientos térmicos: agrietamiento transversal y agrietamiento en bloque. Por lo general las grietas transversales ocurren primero y después aparecen las de bloque cuando se envejece el asfalto y se hace más frágil con el tiempo. El agrietamiento transversal es predicho por modelos internos del software, mientras que el agrietamiento en bloque es manejado por variables de materiales y aspectos constructivos.

El software presenta un rango de ayuda de 0 a 10000 ft/mi y por defecto recomienda un valor de 1000 ft/mi equivalente a 190 m/km.

*Chemically stabilized layer. Fatigue fracture (%)*: Un deterioro adicional que se tiene que considerar en pavimentos semirígidos es la fatiga en las capas estabilizadas químicamente. Estabilizantes tales como el cemento portland, flyash o cal forman microgrietas por efectos del tránsito que reducen el módulo de estas capas hasta la fatiga o rotura de estas. Este proceso tiene un impacto significativo en la propagación hacia la carpeta asfáltica.

Es importante notar que para las subrasantes estabilizadas químicamente no se consideran efectos de fatiga en el diseño, pero las características de resistencia si se consideran en los cálculos de respuesta o predicción estructural.

El software presenta un rango de ayuda de 0 a 100 % y por defecto presenta un valor de 25 %.

*Permanent deformation - Total pavement (in):* Esta es la deformación permanente o ahuellamiento de toda la estructura del pavimento. El software presenta un rango de ayuda de 0 a 3.0 in y por defecto presenta un valor de 0.75 in equivalentes a 1.9 cm.

*Permanent deformation- AC only (in):* Esta es la deformación permanente o ahuellamiento solamente en la carpeta asfáltica. El software presenta un rango de ayuda de 0 a 3.0 in y por defecto presenta un valor de 0.25 in equivalentes a 0.6 cm.

Para todos los parámetros de análisis se debe colocar la confiabilidad de las entradas. El software de diseño presenta por defecto 90% (ver tabla No 4.1).

Tabla No 4.1 Recomendaciones de confiabilidad del diseño

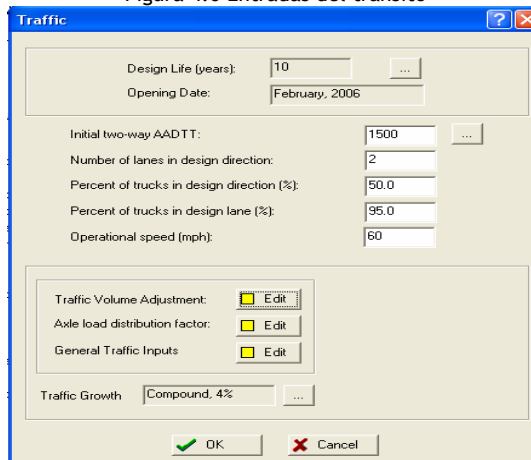
TIPO DE CARRETERA	CONFIABILIDAD RECOMENDADA	
	URBANA	RURAL
Autopista	85-97	80-95
Arteria principal	80-95	75-90
Colectora	75-85	70-80
Local	50-75	50-75

Para continuar haga click en OK,

### 4.3 TRÁNSITO

Para iniciar con esta información se debe hacer doble click en “Traffic” como se muestra en la figura 4.6.

Figura 4.6 Entradas del tránsito



Los datos de tránsito (número y peso de camiones) son datos importantes para el análisis y diseño de estructuras de pavimento. Esta es una de las entradas que no puede ser cambiada o modificada durante el proceso iterativo de diseño. Las entradas de tránsito al igual que todas las otras entradas tienen 3 niveles de jerarquía según el grado de información disponible para el proyecto. El software de la guía de diseño crea la distribución de cargas por ejes o espectro de cargas (simples rueda simple, simples rueda doble, tandem y tridem) que serán aplicadas al pavimento para el proceso de acumulación de daños. Para crear este espectro de cargas el software necesita de lo siguiente: volúmenes de tránsito, cargas para cada tipo de eje, distribución horaria y rata de crecimiento estimado sobre el período de diseño.

*Initial two-way AADTT:* Este es el tránsito promedio diario inicial (TPD) de vehículos pesados según la clasificación de la FHWA (clase 4 a clase 13).

*Number of lanes in design direction:* Este es el número de carriles en la dirección de diseño. El software de guía de diseño usa el número de carriles para estimar la distribución del tránsito en cada carril, y por defecto utiliza 2 carriles en cada dirección.

*Percent of trucks in design direction (%):* Este es el porcentaje de vehículos pesados esperado en la dirección de diseño. El software de la guía de diseño por defecto presenta el 50%.

*Percent trucks in design lane (%):* Este es el porcentaje de camiones, del total de camiones en una dirección del carril de diseño. Este porcentaje es usado para determinar el número total de camiones en el carril de diseño. El software por defecto utiliza el 95%.

*Operational Speed (mph):* Esta es la velocidad esperada del tránsito en la dirección de diseño. El software por defecto utiliza 60 millas /hora equivalentes a 96 km/h.

*Traffic volume adjustment:* Esta pantalla permite que el usuario proporcione las entradas para calcular el volumen de camiones pesados esperados en la carril de diseño, permite que el usuario introduzca la distribución del tránsito horario, factores de ajustes mensual del TPD, distribución de los vehículos pesados y rata de crecimiento promedio anual. Al hacer click en el botón amarillo [Edit] de la figura No 4.6 aparecen cuatro entradas como se puede ver en la Figura 4.7.

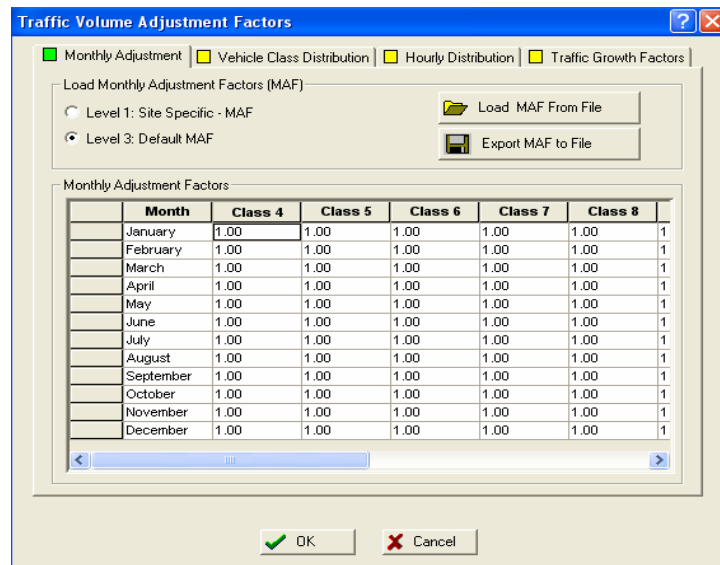
*Monthly adjustment factors:* El factor de ajuste mensual (MAF) es la proporción del TPD para una clase de camión específica durante 24 horas, de un día promedio en un mes del año. Es simplemente un ajuste al TPD de los camiones para cada mes del año. Los factores de ajuste mensuales son importantes para

los modelos de predicción de deterioros, sobre todo si existen cambios en el tránsito por algunas temporadas del año.

Estos factores de ajuste mensuales son determinados a partir de datos o archivos de volúmenes de camiones para cada mes del año. Los valores por defecto para los factores de ajuste mensuales para todas las clases de camión es 1.0, o sea cuando no existan variaciones del TPD en el año (ver figura 4.7). La mayoría de las carreteras urbanas y nacionales no tienen variaciones significativas, para estos tipos de carreteras, el valor de ajuste mensual de 1.0 para cada mes y clase de camión son adecuados. Sin embargo, hay carreteras y áreas donde estos factores de ajuste mensuales son diferentes de 1.0, como por ejemplo carreteras rurales en áreas donde hay producciones agrícolas.

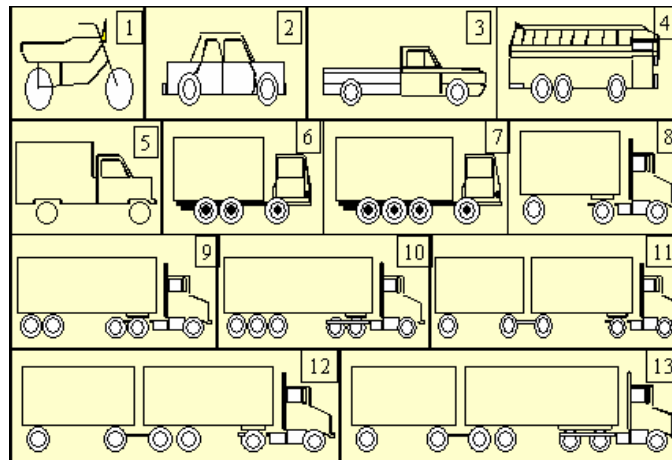
El software de guía de diseño permite generar un archivo (.maf) particular de factores de ajuste mensuales para futuros diseños. Igualmente, el software ofrece la opción de cargar un archivo guardado, de factores de ajuste mensual.

Figura 4.7 Factores de ajustes mensual



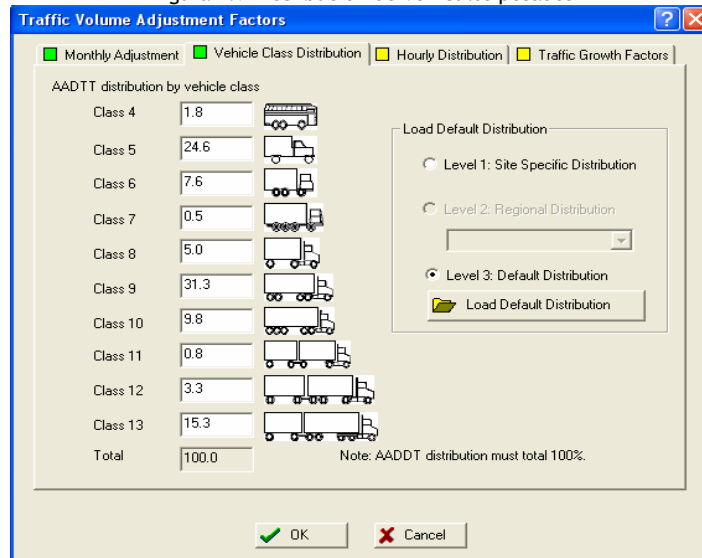
*Vehicle class distribution:* Esta pantalla requiere la distribución de los tipos de camiones. El software de guía de diseño ofrece la opción de 13 clases de camiones para definir la distribución del tránsito. Las clases de camiones según la FHWA se muestra en la Figura 4.8.

Figura 4.8 Clasificación de los vehículos según el FHWA



La distribución de los vehículos puede ser para el nivel 1 o nivel 3. El nivel 1 es para el sitio específico del proyecto, mientras el nivel 3 está basado en la datos por defectos, ver la Figura 4.9, distribución de los vehículos pesados.

Figura 4.9 Distribución de vehículos pesados



*Hourly distribution:* Los factores de distribución por hora, describen el porcentaje del tránsito por hora para un periodo de 24 horas (1 día). Se calcula, dividiendo el numero de camiones de una clase entre numero total de camiones para 24 horas de un día. La suma de los factores de distribución para 24 horas debe ser igual a 100, ver Figura 4.10.

Figura 4.10 Distribución horaria de los vehículos pesados

Hourly truck traffic distribution by period beginning:			
Midnight	2.3	Noon	5.9
1:00 am	2.3	1:00 pm	5.9
2:00 am	2.3	2:00 pm	5.9
3:00 am	2.3	3:00 pm	5.9
4:00 am	2.3	4:00 pm	4.6
5:00 am	2.3	5:00 pm	4.6
6:00 am	5.0	6:00 pm	4.6
7:00 am	5.0	7:00 pm	4.6
8:00 am	5.0	8:00 pm	3.1
9:00 am	5.0	9:00 pm	3.1
10:00 am	5.9	10:00 pm	3.1
11:00 am	5.9	11:00 pm	3.1

Note: The hourly distribution must total 100%

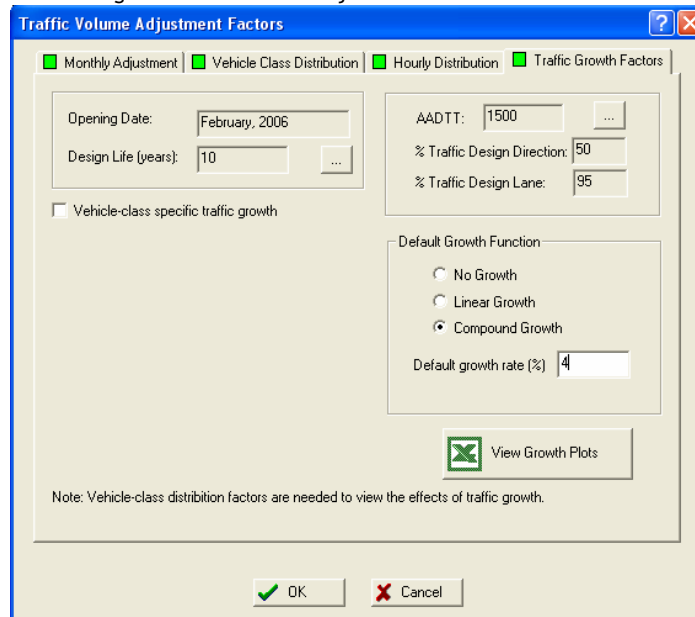
Total: 100.0

*Traffic growth factors:* Esta pantalla indica el crecimiento del tránsito anual expresado en porcentaje. El software de guía de diseño considera el crecimiento para cada tipo de camión independientemente, pero tiene la opción de elegir tres tipos de crecimiento:

- [No Growth]: El volumen del tránsito permanece igual en el periodo de diseño, osea que no tiene crecimiento del tránsito.
- [Linear Growth]: El volumen de tránsito aumenta de manera constante a partir del año base para cada tipo de camión, osea un crecimiento lineal.
- [Compound Growth]: El volumen de tránsito aumenta constante a partir del tránsito del año precedente, a través de cada tipo de camión, osea un crecimiento compuesto.

También se tiene la opción de seleccionar una tasa de crecimiento diferente y el tipo de crecimiento para cada clase de camión haciendo click en el botón "vehicle-class specific traffic growth", (ver Figura 4.11 factores de ajustes de volumen del tránsito). El software por defecto presenta un 4% de crecimiento compuesto. Para continuar, debe dar click en OK.

Figura 4.11 Factores de ajuste de volumen del tránsito



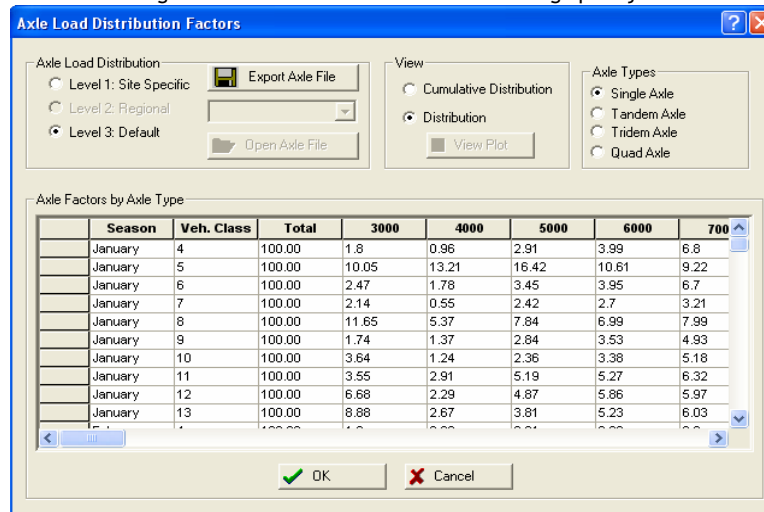
Luego se debe dar click en [Axe load distribution factor].

*Axe load distribution factor*: Esta pantalla permite que el usuario especifique la distribución de cargas por eje. El factor de distribución de carga por eje es el porcentaje de ejes en cada intervalo de carga para ejes simples, tandem y tridem de cada tipo de vehiculos. Es calculado usando datos de pesajes para hacer un promedio diario del número de ejes en cada intervalo de carga de un tipo de eje y un tipo de camión, dividida entre el número total de ejes para todos los intervalos de carga.

Los factores de distribución de carga por eje deben ser para cada 100 vehiculos, o porcentajes de cada tipo de vehiculos, para cada mes del año en cada rango de carga. El software de la guía de diseño asume que los factores de distribución de carga por eje para cada tipo de eje y tipo de camión son la constante con el tiempo. La distribución de tipos de vehículo puede ser para nivel 1 o nivel 3. En el nivel 1, son datos del sitio específico, mientras que el nivel 3 está basado en distribuciones normalizadas. El software permite guardar factores de distribución de carga por eje en un archivo de extensión (.alf) para el uso en futuros diseños. Igualmente, ofrece la opción de cargar un archivo antes guardado (ver Figura 4.12).

Para continuar, debe dar click en OK.

Figura 4.12 Factores de distribución de carga por eje



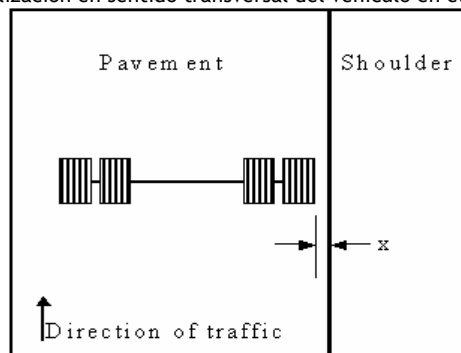
*General traffic inputs:* Esta pantalla permite definir la localización en sentido transversal del vehículo durante el avance, número de ejes/camion, configuración de los ejes, distancia entre ejes (ver Figura 4.14).

*Mean wheel location (inches from the land marking):* Esta es la distancia desde el borde externo de la llanta a la línea de demarcación que limita el ancho del carril (ver Figura No 4.13). El software presenta un rango de ayuda de 0 a 36 pulgadas y por defecto tiene 18 pulgadas, equivalentes a 45 cm.

*Traffic Wander Standard Deviation (in):* Esta es la desviación estándar del tránsito en el sentido lateral durante el avance, usado para estimar el número de repeticiones de carga por eje sobre un punto de manera probabilística para predecir el deterioro del pavimento. El software presenta un rango de ayuda de 7 a 13 pulgadas y por defecto tiene 10 pulgadas, equivalentes a 25 cm.

*Design Lane Width:* Esta es el ancho del carril, definido por la distancia entre las marcas a ambos lados del carril de diseño. El software presenta un rango de ayuda de 10 a 13 pies y por defecto tiene 12 pies, equivalentes a 3.65 m.

Figura 4.13 Localización en sentido transversal del vehículo en el sentido de avance





*Number axes/truck:* Esta pagina permite especificar el promedio de ejes para cada tipo de camión (clases 4 -13 según el FHWA) y tipo de eje (simples, tandem y tridem). Se calcula a partir de datos de pesajes dividiendo el número total de ejes para un tipo de camión por el número total de camiones en esa clase, (ver Figura 4.14a Entradas generales del tránsito).

Figura 4.14a Entradas generales del tránsito

**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

	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

OK Cancel

Para continuar con la siguiente página debe darse click en [Axe configuration].

*Axle configuration:* Esta página permite realizar las entradas en cuanto a las configuraciones del eje típico. Una serie de datos necesarios para describir las configuraciones de los vehículos para calcular las respuestas no sólo a los niveles de carga sino también a las diferentes posiciones para un eje. (ver figura 4.14b)

*Average axle width (edge-to-edge) (ft):* Esta es la distancia entre los bordes exteriores de un eje. El software presenta un rango de ayuda de 8 a 10 pies y por defecto tiene 8.5 pies equivalentes a 2.60 m.

*Dual tire spacing (in):* Distancia transversal centro a centro entre llantas duales y es calculado a partir de datos de pesajes tomando un promedio de la distancia medida entre los llantas duales de un tándem o tridem. El software presenta un rango de ayuda de 0 a 24 pulgadas y por defecto tiene 12 pulgadas equivalentes a 30 cm.

*Tire pressure (psi):* Es la presión de inflado de la llanta en caliente. Es asumido que la presión de inflado de llanta en caliente es igual a la presión de contacto y que está un 10 % por encima de la presión de inflado de llanta fría. La presión de inflado de las llantas tiene que ser introducida, tanto para llantas individuales como para duales.

*Axle spacing (in)*: Distancia longitudinal centro a centro entre ejes y se calcula usando datos de pesajes tomando un promedio de las distancia medidas entre ejes tandem y tridem para cada tipo de camión. El software presenta un rango de ayuda de 24 a 144 pulgadas y por defecto tiene para tandem 51.6 pulgadas equivalentes a 130 cm y para tridem 49.2 pulgadas equivalentes a 125 cm. (ver figura 4.14b).

Figura 4.14b Entradas generales del tránsito

Para continuar con la página siguiente debe darse click en [Wheelbase], (ver figura 4.14c).

*Wheelbase*: Esta página permite que el usuario introduzca las distancias promedios de los ejes cortos, medios y largos. También hay que especificar el porcentaje de camiones que tiene esas distancias promedios de ejes cortos, medios y largos. Esta información es usada por el software para calcular las respuestas del pavimento a lo largo del período de diseño.

*Average Axle Spacing*: Es la distancia media longitudinal entre dos ejes consecutivos para ejes cortos, medios y largos.

*Percentage of Trucks*: Es el porcentaje de camiones que tiene esas distancias promedios de ejes cortos, medios y largos.

Para continuar con las entradas de clima, debe dar click en OK.

Figura 4.14c Entradas generales del tránsito

#### 4.4 CLIMA

Para iniciar con estas entradas debe dar doble clic en [Climate]

*Environment/climatic:* La guía de diseño AASHTO 2002 considera los efectos climáticos para calcular las respuestas del pavimento. La humedad y los perfiles de temperaturas son predichos por el modelo climático EICM (*Enhanced Integrated Climatic Model*) que se encuentra integrado en el software de la guía de diseño. El modelo clima requiere que se especifique un archivo climático de extensión .icm (*Input Climatic Model*) para la ubicación del proyecto. (ver figura 5.15)

El software de Guía de Diseño ofrece dos opciones para especificar este archivo de clima:

1. Importe un archivo (.icm), haciendo click en "Import" en la posición del archivo del proyecto.
2. Genere el archivo (.icm) usando los datos meteorológicos disponibles en el modelo EICM, haciendo click en "Generate".

Si seleccionó la opción 2 para generar un archivo climático para la posición de proyecto, se tienen dos opciones para crear el archivo climático:

2.1 Cargue los datos meteorológicos de una estación meteorológica, haciendo click en [Climatic data for a specific weather station]. Crear una estación meteorológica virtual interpolando datos climáticos disponibles con las 6 estaciones meteorológicas más cercanas, haciendo click en [Interpolate climatic data for given location]. Se debe entrar la latitud, longitud, elevación, y la profundidad del nivel freático. El programa pone las 6 estaciones meteorológicas más cercanas, en una lista en los alrededores del proyecto en las estaciones meteorológicas que pueden ser usadas. El EICM interpola los datos meteorológicos de las posiciones seleccionadas inversamente ponderadas por la distancia de la posición.

*Latitude:* La latitud es una medida de la excentricidad de una posición del ecuador en las direcciones del norte o del sur. Es la distancia angular del norte o el sur del ecuador medida a 90 grados.

*Longitude:* La longitud es una medida de la excentricidad de una posición del primer meridiano de Greenwich. Es la parte del ecuador entre el meridiano de un lugar dado y el primer meridiano.

*Elevation:* La elevación es la altura de una posición con respecto al nivel del mar.

*Depth of Water Table:* Es la profundidad del nivel de agua subterránea, desde la superficie superior de la subrasante.

Como puede notarse el archivo climatico que presenta el software se refiere a ciudades o estados que se encuentran en los EEUU, pero se tiene la opción de poder generar un archivo climatico para las condiciones de nuestro país.

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

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

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

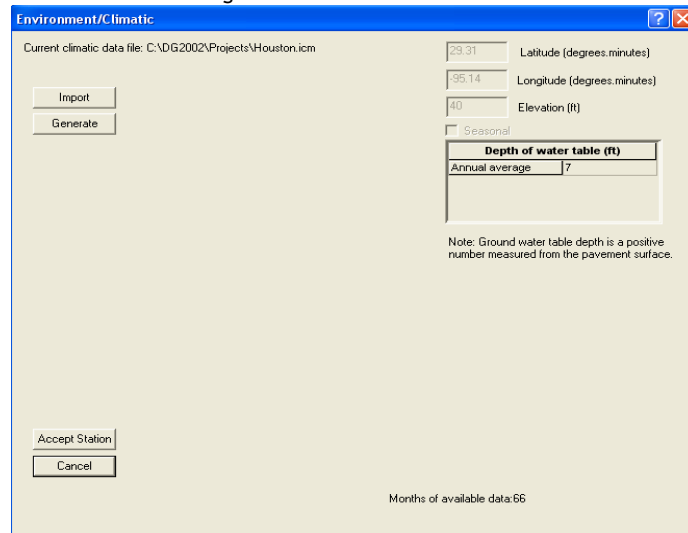
Como puede apreciarse del párrafo anterior, la creación de una estación climática requiere de la recolección de datos cada una hora, por un periodo de tiempo no inferior a dos años, de los siguientes datos: temperatura, velocidad del viento, nubosidad, precipitación y humedad relativa.

Este trabajo presenta un ejemplo de cómo se armó el archivo climático para la Ciudad de Popayán (Colombia).

1. Se solicitó a través del IDEAM, el diario de observación meteorológica de los años 2003 y 2004, de la estación climática que se encuentra en el Aeropuerto Guillermo León Valencia de la Ciudad de Popayán.
2. Estos registros son tomados diariamente a las 7,13 y 19 horas, por lo que se adoptó interpolar linealmente entre estos datos para encontrar los valores horarios de cada fenómeno climático.
3. Para que el programa reconozca esta información climática de Popayán, se debe modificar una estación existente en la lista de estaciones climáticas del *software*; debido a que no se puede ingresar una nueva estación. Se debe elegir alguna que sea similar en cuanto a latitud, de modo que los cálculos de balance de energía realizados internamente por el EICM sean representativos. Además en lo posible seleccionar una estación que mejor represente la Ciudad de Popayán. Este archivo se modifica cambiando los datos que contiene, por los recolectados para la estación climática de Popayán.
4. A través del software se escoge entre las dos opciones que existen para especificar este tipo de archivos: importar un archivo de tipo climático previamente generado (.icm) o a través de la formación de un archivo con extensión .icm, el cual emplea los datos de tiempo disponibles en el EICM para varias estaciones climáticas de Estados Unidos.
5. A partir de la primera opción y luego de ingresar el valor del nivel freático en pulgadas para Popayán, se escoge la estación climática de Popayán (cuyos datos se encuentran cambiados, como se mencionó anteriormente), generándose un archivo nuevo, al cual se le da el nombre de *Popayán.icm*. Este archivo puede ser empleado directamente, previa elección, en cualquier otro proyecto que se emplace en la Ciudad de Popayán.

Dar click en “accept station” para continuar con la entrada de la estructura.

Figura 4.15 Entradas climáticas



#### 4.5 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Para iniciar con esta información, debe darse doble click [Structure] para alimentar la información de las capas del pavimento.

El software automáticamente presenta la capa asfáltica debido a que se encuentra dentro de un diseño de un pavimento asfáltico, esta orden se dió en el software en la información general anteriormente explicada. Esta capa debe editarse haciendo click en [Edit] para modificar las propiedades de la carpeta asfáltica.

Para colocar las otras capas de la estructura del pavimento se debe dar click en el icono [Insert] (ver figura 4.16a)

*Material type:* Seleccione el tipo de material haciendo click en desprendible en donde se encuentran materiales de tipo: PCC (concreto hidráulico), Asphalt (asfáltico), Stabilized base (base estabilizada), Granular base (base granular), Subgrade (subrasante) y Bedrock (roca madre).

*Material:* Colocar el tipo de material haciendo click en desprendible en donde se encuentran materiales: Crushed stone (Piedra triturada), Crushed gravel (Grava triturada), River-run gravel (Grava de rio), Permeable aggregate (Agregados permeables), Cold recycled asphalt pavement (Asfalto reciclado en frio), A1a, A1b, A2-4, A2-5, A2-6, A2-7, A-3.

*Layer thickness (in):* Este es el espesor de la capa en pulgadas. El icono [Last layer] es para indicar que esta capa es de espesor infinito (subrasante) ver figura 4.16b, y así se insertan las capas que se quieren.

Figura 4.16a Entradas de la estructura del pavimento

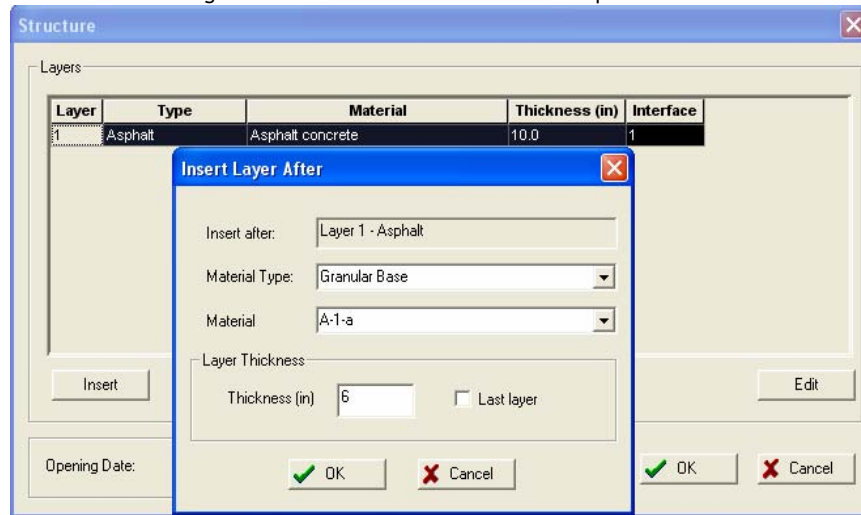
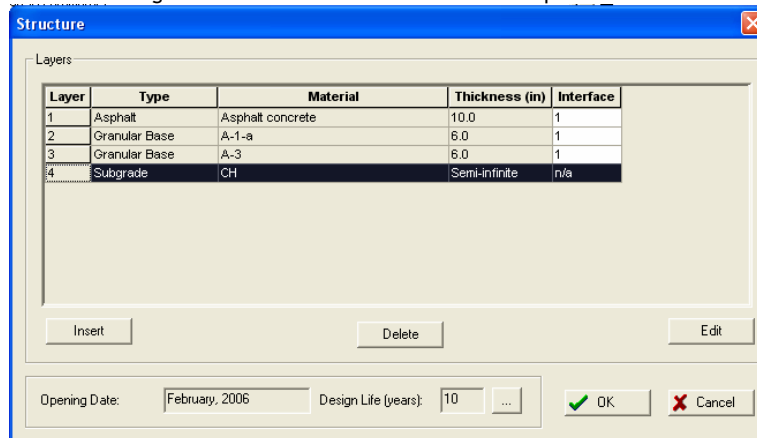


Figura 4.16b Entradas de la estructura del pavimento



Al terminar de insertar toda la estructura del pavimento (ver Figura 4.16b) debe dar click en OK para continuar con las entradas de drenaje.

*Drainage and surface properties:* Para iniciar con esta página debe dar click en el icono [Drainage and surface properties] (ver Figura 4.17)

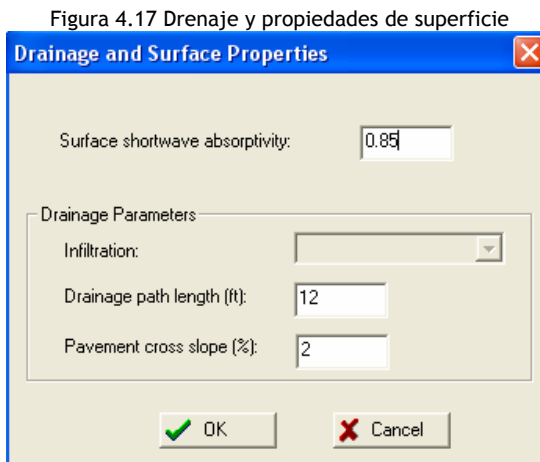
*Surface Shortwave Absorptivity:* Este parámetro de entrada es tanto para pavimentos asfáltico como rígidos. Este parámetro significa la cantidad de la energía solar absorbida por la superficie del pavimento. A continuación se muestran valores recomendados por la guía de diseño.

- Concreto de cemento portland: 0.70-0.90
- Asfalto procesado (Gris): 0.80-0.90
- Crudo asfáltico (Negro): 0.90-0.98

*Infiltration:* Este parámetro define el potencial de infiltración del pavimento sobre el período de diseño. Se considera, bajo si el 10 % de la precipitación entra en el pavimento, moderado si el 50 % de la precipitación entra en el pavimento, y alto si el 100 % de la precipitación entra en el pavimento. Con esta información el modelo EICM determina la cantidad del agua disponible en la carpeta asfáltica.

*Drainage Path Length:* Es distancia desde el punto más alto del pavimento hasta donde se encuentra la obra de drenaje. El software presenta un rango de ayuda de 5 a 25 pies y por defecto tiene 12 pies equivalentes a 3.65 m.

*Pavement Cross Slope:* Es el porcentaje del pavimento transversal (bombeo), necesario para calcular el tiempo requerido para drenar la capa superficial del pavimento o la capa de subbase. El software presenta un rango de ayuda de 0 a 5 % y por defecto tiene 2%.



Para continuar con las entradas de los materiales debe dar click en OK.

*Layer 1-Asphalt concrete:* Para iniciar con esta página debe dar doble click en el icono [Layer 1-Asphalt concrete] (ver figura 4.18 (A1))

Inicialmente debe alimentarse la información para la página [Asphalt Mix]:

En esta página se describen las propiedades de la mezcla asfáltica, en función de la temperatura, niveles de carga, envejecimiento, rigidez de carpeta, granulometría, contenido de bitumen y vacíos de aire. El módulo de la carpeta para todos los niveles de jerarquía se encuentran para una curva maestra construida a una temperatura de referencia de 70 °F equivalentes a 21 °C

Para las mezclas asfálticas o capas estabilizadas con asfalto la nueva guía de diseño AASHTO 2002 considera el módulo dinámico  $E^*$ , en función de la



frecuencia de carga y temperatura, y puede determinarse para los tres niveles jerárquicos como se muestra a continuación:

*Nivel 1:* En este nivel se necesitan los ensayos de laboratorio para construir la curva maestra. Los ensayos de laboratorio requeridos se encuentran en la tabla No 4.2.

Tabla No 4.2. Resumen de ensayos para construir la curva maestra en el nivel 1.

TEMPERATURA, °F	MODULO E*			
	0.1 HZ	1 HZ	10 HZ	25 HZ
10	X	X	X	X
40	X	X	X	X
70	X	X	X	X
100	X	X	X	X
130	X	X	X	X

Los ensayos son necesarios tanto para el bitumen como para la mezcla asfáltica. Para determinar el envejecimiento de la mezcla durante el proceso de mezclado y compactación, se debe realizar el ensayo de envejecimiento al horno según la norma AASHTO PP2.

El ensayo de laboratorio para encontrar el modulo dinámico se realiza a las muestras para cinco (5) temperaturas diferentes y cuatro (4) niveles de carga, según el ensayo ASTM D3497. Las muestras deben tener un diámetro de 100 mm y una relación de altura a diámetro de 1.5. Las deformaciones axiales deben medirse en el centro y en tres posiciones diferentes alrededor de la muestra y deben tener un tamaño que se puedan montar en el compactador giratorio. Con esta información se obtiene una curva maestra de E\* con diferentes tiempos de carga para definir el comportamiento de la carpeta asfáltica solicitada a cargas de tránsito y condiciones climaticas.

*Number of Temperatures:* Es el número de temperaturas para el ensayo del modulo dinámico E\*. El número recomendado de ensayos se encuentra en la tabla No 4.2

*Number of Frequencies:* Es el número de frecuencias para el ensayo del modulo dinámico E\*. El número recomendado de ensayos se encuentra en la tabla No 4.2

Figura 4.18a Propiedades de la mezcla asfáltica

Asphalt Material Properties

Level: 1 | Asphalt material type: Asphalt concrete | Layer thickness (in): 10

Asphalt Mix |  Asphalt Binder |  Asphalt General

Dynamic Modulus Table

Number of temperatures: 5 | Number of frequencies: 4

Temperature (°F)	Mixture E* (psi)			
	0.1	1	10	25
10				
40				
70				
100				
130				

Import | Export

OK | Cancel

*Niveles 2 y 3:* En estos niveles se utilizan los modelos recomendados por la guía AASHTO 2002 para la estimación de los módulos dinámicos (ver capítulo 2.3 de materiales) para construir la curva maestra con entradas de las propiedades del bitumen y la mezcla asfáltica (Ver figura 4.18b):

- % acumulado retenido en el tamiz No 3/4.
- % acumulado retenido en el tamiz No 3/8.
- % acumulado retenido en el tamiz No 4.
- % acumulado retenido en el tamiz No 200.

Figura 4.18b Propiedades de la mezcla asfáltica

Asphalt Material Properties

Level: 2 | Asphalt material type: Asphalt concrete | Layer thickness (in): 10

Asphalt Mix |  Asphalt Binder |  Asphalt General

Aggregate Gradation

Cumulative % Retained 3/4 inch sieve:

Cumulative % Retained 3/8 inch sieve:

Cumulative % Retained #4 sieve:

% Passing #200 sieve:

OK | Cancel

Luego debe hacerse click en la página siguiente [Asphalt binder]:

En esta página se consideran las propiedades de la carpeta asfáltica, para determinar el módulo dinámico en la curva maestra, el módulo de complejo y los ángulos de fase de la carpeta asfáltica. Las entradas pueden ser para los tres niveles de jerarquía.

*Nivel 1 y 2:*

*Superpave binder test data:* El módulo complejo dinámico de la carpeta ( $G^*$ ) y ángulos de fases se determinan según el ensayo AASHTO TP5. Los ensayos de la carpeta deberían ser realizados después del ensayo de película delgada de acuerdo a la norma AASHTO T240. Los resultados de los ensayos son necesarios para un rango de temperaturas con incrementos de cargas de 1.59 Hz (10 rad/seg). El módulo dinámico y el de ángulo de fase son requeridos para 40, 55, 70, 85, 100, 115, y 130 °F (ver tabla No 4.2).

*Number of Temperatures:* Es el número de temperaturas del ensayo para el módulo complejo dinámico  $G^*$  y el ángulo de fase  $\theta$ . (ver la tabla No 4.2).

*Conventional binder test:* En lugar de usar el ensayo superpave, pueden usarse propiedades convencionales de la carpeta asfáltica para caracterizar el material asfáltico, estas propiedades son las siguientes:

*Softening Point:* Es el punto de ablandamiento del cemento asfáltico, que se define como la temperatura en la cual un cemento asfáltico no puede soportar cierto peso de una pelota de acero y comienza a fluir. Su objetivo es establecer la temperatura en la cual ocurre este fenómeno. Es determinado de acuerdo al ensayo ASTM D 36.

*Absolute Viscosity:* Es la viscosidad absoluta del cemento asfáltico, que se define como la resistencia al flujo de un fluido. Es determinado de acuerdo al ensayo AASHTO T 202 a 140 °F equivalentes a 60 °C. La viscosidad absoluta se expresa en poises.

*Kinematic Viscosity:* Es la viscosidad cinemática del cemento asfáltico, determinado de acuerdo al ensayo AASHTO T 201 a 275 °F equivalentes a 135 °C. La viscosidad cinemática se expresa en centistokes.

*Specific Gravity:* Es la gravedad específica del material a una temperatura dada. El método del picnómetro es usado para determinar la gravedad específica de cemento asfáltico según la norma ASTM D 70.

*Penetration:* Es un ensayo empírico usado para medir la consistencia del cemento asfáltico, según el ensayo de la norma ASTM D 5.

*Brookfield (Rotational) Viscosity:* Este ensayo se realiza de acuerdo a la norma ASTM D 4402 para determinar la viscosidad aparente de la carpeta asfáltica desde temperaturas de 100 a 500 °F equivalentes a 38 a 260 °C

Figura 4.19a Propiedades de la mezcla asfáltica

Test	Temperature (°F)	Binder property
Softening point (P)	0	13000
Absolute viscosity (P)	140	0
Kinematic viscosity (CS)	275	0
Specific gravity	77	0
Penetration		
Brookfield viscosity		

*Nivel 3:*

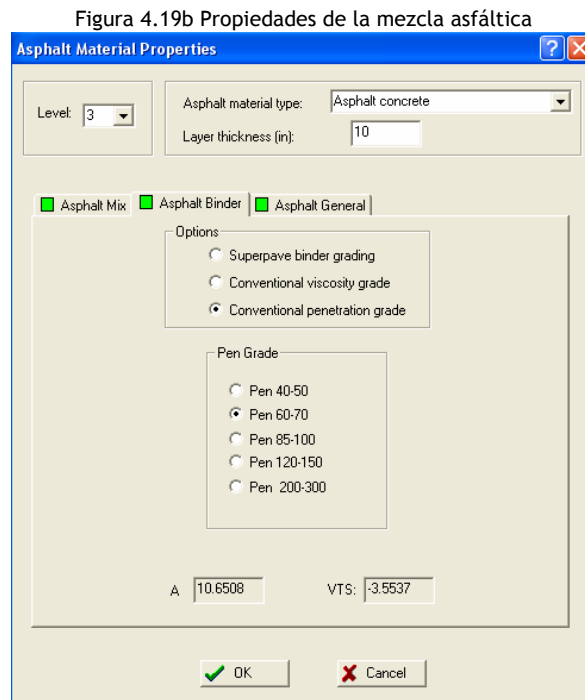
Para el nivel 3 se debe caracterizar la mezcla asfáltica según los siguientes parámetros.

*Superpave Binder Grading:* Grado superpave de la carpeta asfáltica, determinada de acuerdo con la norma AASHTO MP1.

*Conventional Viscosity Grade:* Grado de viscosidad del cemento asfáltico determinado de acuerdo con la norma ASTM D3381.

*Conventional Penetration Grade:* Grado de penetración del cemento asfáltico determinado de acuerdo con la norma ASTM D3381.

Las relaciones de temperatura y viscosidad son calculadas internamente por el software de la guía de diseño, basado en los grados del asfalto.



Luego debe hacerse click en la página siguiente [Asphalt general]:

En esta página se consideran las propiedades de la carpeta asfáltica, para determinar el módulo dinámico en la curva maestra, el módulo complejo y los ángulos de fase de la carpeta asfáltica. Las entradas pueden ser para los tres niveles de jerarquía. (ver figura 4.19c).

*Nivel 1:*

*Reference temperature (°F):* Es la temperatura usada como referencia para determinar el módulo dinámico.

*Effective Binder Content (%):* Es el contenido del bitumen asfáltico total de la mezcla menos el contenido de asfalto absorbido entre las partículas del agregado.

*Air Voids (%):* Es el volumen total de vacíos de aire entre las partículas de agregados de la mezcla, expresado en porcentaje.

*Total Unit Weight:* Es el peso por unidad de volumen, de la mezcla asfáltica.

*Thermal Conductivity:* Es la cantidad de calor que fluye a través de un área por unidad del tiempo. El valor típico para el bitumen asfáltico es 0.67 BTU/hr-ft-° F.

*Heat Capacity:* Es la cantidad de calor requerido para aumentar la temperatura de material por unidad de temperatura. Un valor típico para el material asfáltico es 0.23 BTU/lb-° F.

*Poisson's Ratio:* Es la relación de Poisson, para materiales bituminosos se encuentra entre 0.15 y 0.50.

Figura 4.19b Propiedades de la mezcla asfáltica

Dar click en OK para continuar con las propiedades de las otras capas del pavimento. A continuación se debe dar doble click en la capa de base granular de color amarillo [Layer 2]. (ver figura 5.2), luego se debe abrir la página [Strength properties], (ver figura 5.20a)

*Strength properties:* Los parámetros de resistencia para las capas granulares pueden ser realizados para los tres (3) niveles jerárquicos. Las propiedades del modelo climático ICM son indispensables en esta página para realizar los ajustes climáticos, también se tiene la opción de no utilizar el modelo ICM y colocar los datos para cada mes, o especificar un valor representativo. (ver figura 5.20a).

*Nivel 1:* Para este nivel se debe realizar el ensayo triaxial cíclico. Se recomienda la norma NCHRP 1-28 o AASHTO T 307.

El modelo constitutivo generalizado para el módulo resistente usado en la guía de diseño AASHTO 2002, es el siguiente:

$$M_r = k_1 \left( \frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_3}$$

$M_r$  = modulo resiliente, psi

$\theta$  = Invariante de tensiones =  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

$\sigma_1$  = Esfuerzo principal mayor.

$\sigma_2$  = Esfuerzo principal intermedio

$\sigma_3$  = Esfuerzo principal menor

$\tau_{oct}$  = Esfuerzos octohedrales

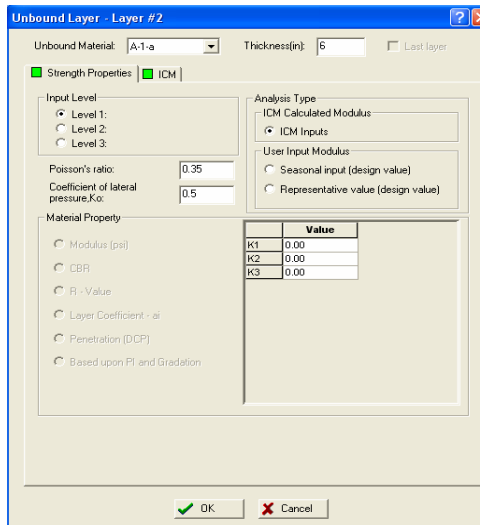
$$\tau_{oct} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$$

$P_a$  = presión atmosférica

$k_1, k_2, k_3$  = Constantes de regresión (ensayo de modulo resiliente)

Las entradas requeridas por el software de la guía de diseño son las constantes de regresión  $k_1, k_2, k_3$  necesarias para que el modelo EICM pueda hacer los ajustes climaticos. Estos valores pueden ser para cada mes haciendo click en [Seasonal input] o para un valor representativo haciendo click en [Representative value]. (ver figura 4.20a).

Figura 4.20a Propiedades de la capas granulares



El procedimiento del nivel 1 es aplicable para diseño de pavimentos nuevos y rehabilitados. Ya que para rehabilitación las muestras de material pueden ser obtenidas por pruebas destructivas pruebas no destructivas usando el deflectometro de impacto (Falling Weight Deflectometer).

*Nivel 2:* Para este nivel se requiere el uso del módulo resiliente utilizando correlaciones internas de la guía de diseño AASHTO 2002. Estas correlaciones

están en función de parámetros más fáciles y económicos de determinar como los son:

- CBR
- Valor de R
- Aportes estructurales ( $a_i$ ).
- Penetrómetro dinámico de cono (PDC).
- Índice de plasticidad (IP) y granulometría, con datos del ICM.

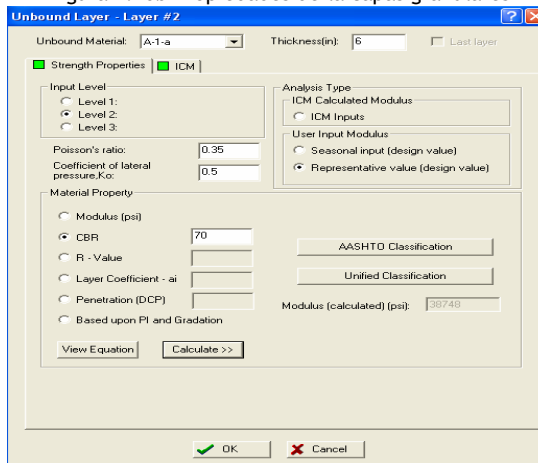
Cuando introduzca los valores de CBR, R,  $a_i$ , PDC o IP, debe dar click en el icono [Calculate], y si desea observar las ecuaciones de la guía debe dar click en el icono de [View equation] (ver figura 4.20b).

El software permite dos (2) opciones:

- Introduzca un valor representativo de  $M_r$  u otro índice de suelo y use EICM para ajustarlo a las condiciones climáticas.
- Introduzca el  $M_r$  u otro índice de suelo para cada mes del año.

El procedimiento para el nivel 2 es usado para diseño de pavimentos nuevos y rehabilitados.

Figura 4.20b Propiedades de la capas granulares



*Nivel 3:* Para este nivel simplemente requiere el valor del módulo resiliente por defecto para las condiciones óptimas de humedad. La guía tiene una ayuda de valores recomendados basados en la calibraciones de Estados Unidos (ver tabla No 4.3).



Tabla 4.3 Valores típicos de modulo resiliente para materiales granulares y finos.

CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL	RANGOS DE $M_R$ (PSI)	VALOR TÍPICO $M_R$ (PSI)
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

Luego se debe abrir la página siguiente de esta pantalla, haciendo clic en [ICM] (ver figura 5.21a).

Se deben introducir los siguientes parámetros: Índice de plasticidad (IP), el porcentaje que pasa el tamiz No 200 (P200), Porcentaje que pasa el tamiz No 4 (P#4), y el diámetro del tamiz en mm, con que pasa el 60% del material (D60).

Figura 4.21 Propiedades de la capas granulares

Unbound Layer - Layer #2

Unbound Material: A-1-a Thickness(in): 6  Last layer

Strength Properties:  ICM

Gradation and Plasticity Index:

Plasticity Index, PI: 1

Passing #200 sieve (%): 3

Passing #4 sieve (%): 20

D60 (mm): 8

Compacted unbound material

Uncompacted/natural unbound material

Calculated/Derived Parameters

Update

Maximum dry unit weight (pcf): 122.2

Specific gravity of solids, Gs: 2.66

Saturated hydraulic conductivity (ft/hr): 263

Optimum gravimetric water content (%): 11.1

Calculated degree of saturation (%): 82.0

Soil water characteristic curve parameters

Parameter	Value
af	11.1
bf	1.83
cf	0.51
fr	361

OK Cancel

De igual manera a como se ha realizado la alimentación para la capa de base granular se deben realizar las entradas para los materiales de subbase granular y subrasante.

A continuación se mostrará en las figuras 4.22 y 4.23, las pantallas de entrada para los materiales de subbase granular y subrasante.

Figura 4.22 Propiedades de la capas granulares

Unbound Layer - Layer #3

Unbound Material: A-3 Thickness(in): 6  Last layer

Strength Properties:  ICM

Input Level:

Level 1

Level 2

Level 3

Poisson's ratio: 0.35

Coefficient of lateral pressure, K<sub>o</sub>: 0.5

Analysis Type:

ICM Calculated Modulus

ICM Inputs

User Input Modulus:

Seasonal input (design value)

Representative value (design value)

Material Property:

Modulus (psi)

CBR: 30

R - Value

Layer Coefficient - a<sub>r</sub>

Penetration (DCP)

Based upon PI and Gradation

AASHTO Classification

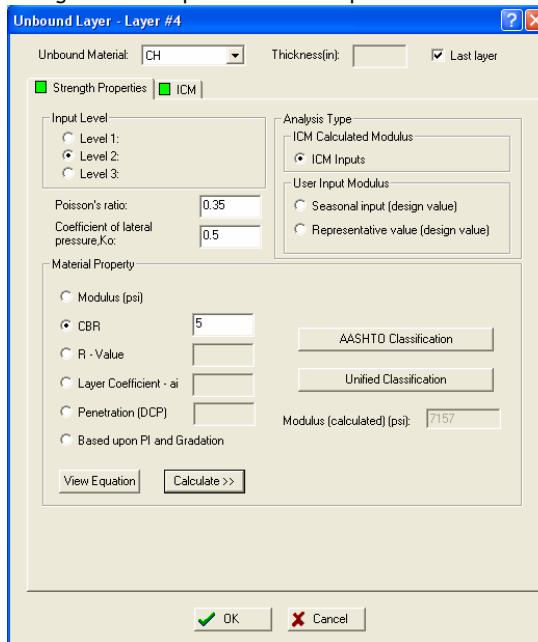
Unified Classification

Modulus (calculated) (psi): 22529

View Equation Calculate >>

OK Cancel

Figura 4.23 Propiedades de la capas de subrasante



Dar click en OK para continuar con las entradas de agrietamiento térmico en la carpeta asfáltica, para entrar en esta página se debe dar doble click en el icono de la pagina principal que se encuentra de color rojo [Thermal cracking] (ver figura 4.24).

La guía de diseño AASHTO 2002 considera la predicción del agrietamiento térmico en el periodo de diseño del pavimento, basado en las propiedades de los materiales y condiciones climáticas. Las propiedades usadas para realizar esta predicción son las siguientes:

- Resistencia a la tensión.
- Creep.
- Coeficiente de contracción térmica.
- Absorción de onda corta.
- Conductividad térmica y capacidad de calor.

*Average tensile strength at 14°F (psi):* Este parámetro indica la resistencia a tensión de un material. Se determina mediante el ensayo de resistencia a la tensión indirecta a una temperatura de 14°F.

- Nivel 1: En este nivel se debe realizar el ensayo de laboratorio según la norma AASHTO TP 9.
- Nivel 2: En este nivel la guía utiliza correlaciones internas.

- Nivel 3: En este nivel se adoptan valores recomendados por la guía de diseño. A continuación se muestra en la tabla No 5.4 las recomendaciones de la guía.

*Creep Test Duration:* Es el tiempo de duración del ensayo creep. Se tienen dos opciones, que se pueden elegir entre 100 y 1000 segundos.

*Creep Compliance:* Este parámetro indica la deformación a tensión del material cuando se realiza en un ensayo de resistencia a la tensión indirecta bajo niveles de tensión conservando un rango de viscosidad del material y en una temperatura de -4, 14 y 32 °F.

- Nivel 1: En el nivel 1, se utiliza el ensayo de laboratorio de acuerdo con la norma AASHTO TP 9.
- Nivel 2: En el nivel 2, se utilizan correlaciones con otras propiedades del concreto asfáltico CA.
- Nivel 3: En el nivel 3, se utilizan valores típicos que se presentan en la tabla No 5.4.

Se pueden crear archivos con esta información para el uso de diseños futuros con extensión (.thc)

*Coefficient of thermal contraction:* Es una entrada importante para determinar el agrietamiento térmico en la carpeta asfáltica.

No existe ningún ensayo de laboratorio AASHTO o ASTM para determinar el coeficiente de contracción térmica de materiales asfálticos. El software calcula internamente usando propiedades volumétricas del concreto asfáltico, bitumen asfáltico, coeficiente de contracción térmica, porcentaje de volumen de agregados. Las entradas son las siguientes:

*Mixture VMA (%):* Este es el porcentaje de volumen de vacíos del agregado mineral que es igual a la suma del porcentaje de volumen de aire y el porcentaje de volumen de cemento asfáltico, menos el porcentaje de volumen de cemento asfáltico absorbido.

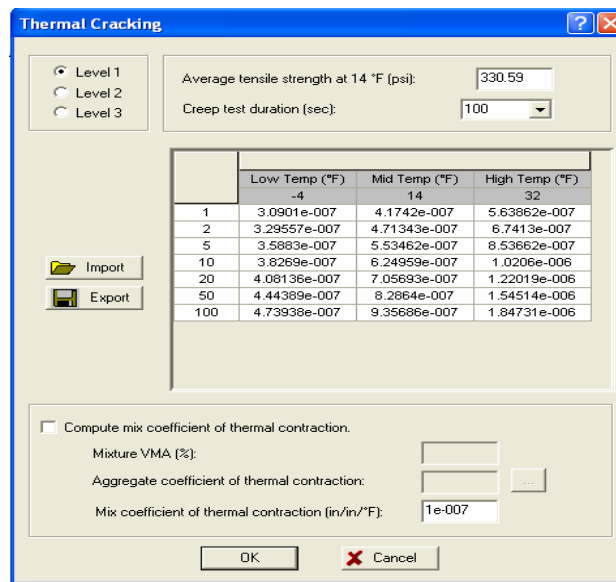
Tabla 4.4 Valores típicos de resistencia a la tensión y creep (nivel 3).

GRADO DEL BITUMEN	TIEMPO (SEG)	CREEP (1/GPA)			TENSILE STRENGTH AT 14 °F (PSI)
		-4 °F	14 °F	32 °F	
AC-2.5 Pen 200-300 PG 46-34 PG 46-40	1	0.058	0.087	0.120	447
	2	0.062	0.102	0.144	
	5	0.070	0.132	0.228	
	10	0.079	0.173	0.324	
	20	0.087	0.207	0.477	
	50	0.105	0.323	0.732	
AC-5 Pen 120-150 PG 52-28 PG 52-34	1	0.052	0.087	0.117	421
	2	0.054	0.097	0.146	
	5	0.057	0.115	0.199	
	10	0.063	0.135	0.260	
	20	0.065	0.155	0.302	
	50	0.075	0.203	0.440	
AC-10 Pen 85-100 PG 58-22 PG 58-28	1	0.041	0.060	0.077	444
	2	0.043	0.061	0.090	
	5	0.048	0.076	0.113	
	10	0.049	0.085	0.127	
	20	0.053	0.094	0.152	
	50	0.055	0.116	0.197	
AC-20 Pen 60-70 PG 64-22	1	0.030	0.035	0.062	370
	2	0.032	0.039	0.068	
	5	0.035	0.043	0.080	
	10	0.037	0.047	0.091	
	20	0.039	0.051	0.108	
	50	0.041	0.057	0.137	
AC-30 Pen 40-50 PG 70-16	1	0.021	0.024	0.042	350
	2	0.022	0.027	0.045	
	5	0.024	0.030	0.053	
	10	0.026	0.032	0.060	
	20	0.027	0.035	0.071	
	50	0.028	0.039	0.090	
PG 64-28	1	0.056	0.075	0.090	511
	2	0.064	0.080	0.105	
	5	0.069	0.090	0.136	
	10	0.075	0.103	0.168	
	20	0.082	0.117	0.212	
	50	0.097	0.139	0.288	
PG 70-34	1	0.063	0.120	0.191	590
	2	0.106	0.148	0.248	
	5	0.124	0.199	0.343	
	10	0.144	0.259	0.459	
	20	0.168	0.332	0.609	
	50	0.214	0.472	0.924	
	100	0.261	0.612	1.276	

*Aggregate Coefficient of Thermal Contraction:* Este es el coeficiente de contracción termica del agregado usado en el diseño de mezcla, y es expresado como el cambio de volumen por grado de disminución de temperatura. Los valores típicos se extienden de 21 a 37 / °C.

*Mix Coefficient of Thermal Contraction:* Esta entrada es opcional se utiliza si el diseñador lo considera. Esta entrada es el coeficiente de contracción termica de la mezcla asfáltica, y es expresado como el cambio de la longitud por grado de disminución de la temperatura. Los valores típicos se extienden de 2.2 a 3.4 / °C. (ver figura 4.24)

Figura 4.24 Agrietamiento térmico



Dar click en OK para continuar con la última entrada del software. Finalmente se debe dar click en el icono de color amarillo [Distress potential]. (ver figura 4.25).

*Block cracking:* Este es el agrietamiento en bloque, con respecto al porcentaje de area afectada. El software presenta para cada potencial de fatiga en bloque un valor recomendado por la guía. Por defecto la guía no utiliza ningún potencial de fatiga, pero si el diseñador lo considera puede tomar las siguientes opciones: alto, medio, bajo, ninguno o definido por el usuario.

*Sealed longitudinal cracks outside of wheel path:* Estas son las grietas longitudinales en pies/milla. El software presenta para cada potencial de fatiga de agrietamiento longitudinal fuera de la huella un valor recomendado. Por defecto la guía no utiliza ningún potencial de fatiga, pero si el diseñador lo considera puede tomar las siguientes opciones: alto, medio, bajo, ninguno o definido por el usuario.

Figura 4.24 Potencial de daños

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	40	0
Sealed longitudinal cracks outside of wheel path (M/H) (ft/mile):	None	8.5	0
Patches (H) (% of total lane area):			
Potholes (H) (% of total lane area):			

OK Cancel

En este momento se encuentra alimentado totalmente el software de diseño AASHTO 2002, luego se debe correr el programa haciendo clic en el icono [RUN ANALYSIS].

## 5. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS TRADICIONALES Y AASHTO 2002

Existen en la actualidad muchas metodologías de diseño de pavimentos flexibles, y actualmente las más utilizadas en Colombia son; la metodología del Instituto Nacional de Vías INVIAS, la metodología AASHTO 1993 y su verificación por la metodología racional. Este trabajo pretende mostrar algunas comparaciones de las metodologías tradicionales y la actual guía de diseño de pavimentos AASHTO 2002.

### 5.1 DISEÑO DE PAVIMENTO MÉTODO AASHTO 1993.

#### 5.1.1 Generalidades de la vía

Este proceso de diseño corresponde a una carretera que comunica la ciudad de Popayán y Rosas.

El pavimento a diseñar será para un periodo de diseño de 10 años; con una longitud de 10 Km. En general, la subrasante a lo largo del tramo no presenta grandes variaciones y es predominante en suelos limo arcillosos plásticos de color pardo amarillento.

El trazado geométrico actual cuenta con tramos rectos y curvas que permiten desarrollar una velocidad de operación de los vehículos de 60 Km/h. la banca actual de la vía es de 7.60 metros con presencia de cunetas en tierra de 60 cm en algunos sectores del tramo. Las secciones transversales de la vía son en su mayoría terraplenes en depósitos aluviales. En general, los taludes conformados a lo largo del tramo son pequeños y escasos.

Popayán, por sus características de relieve y altitud corresponde a la formación de bosque húmedo tropical. La zona presenta temperaturas atmosféricas en promedios anuales de 18 °C y precipitaciones promedios anuales de 2200 mm.

#### 5.1.2 Analisis del tránsito

Se tiene para este trabajo los valores de tránsito existente ( $TPD_5$ ) sobre la vía en estudio, la expresión utilizada para el cálculo de número de ejes equivalentes de 8.2 t fue la siguiente:

$$N_{EE} = TPD_5 \times VC \times DD \times DC \times FC \times 365$$



$N_{EE}$	=	Número de ejes equivalentes de 8.2 t.
$TPD_5$	=	Tránsito Promedio Diario Semanal.
VC	=	Porcentaje de vehículos comerciales.
DD	=	Distribución direccional del tránsito.
DC	=	Factor carril.
FC	=	Factor Camión (Buses y Camiones).

Para el cálculo de ejes equivalentes se utilizaron los factores de daño recomendados por la Universidad del Cauca.

Tabla 5.1 Factores Daño Universidad del Cauca.

VEH. COMERCIALES	F.D.
BUS	1.00
BUSETA	0,50
C2 G	3,44
C2 P	1,14
C3	3,76
C4	6,73
C5	4,40
>C5	4,72

Se adopto para este proyecto un crecimiento anual del 4% del transito promedio diario semanal TPDS.

Tabla 5.2 Ejes equivalentes anuales.

ANO	TPDS	A	B	C2P	C2G	C3-4	C5	C6	VC	DD	DC	FC	TOTAL ANUAL	TOTAL ACUMULADO
2006	2275	48	10	8.0	16.8	8.3	3.7	5.3	52	50	1	2.48	536,113	5.36E+05
2007	2366	48	10	8.0	16.8	8.3	3.7	5.3	52	50	1	2.48	557,557	1.09E+06
2008	2461	48	10	8.0	16.8	8.3	3.7	5.3	52	50	1	2.48	579,859	1.67E+06
2009	2559	48	10	8.0	16.8	8.3	3.7	5.3	52	50	1	2.48	603,054	2.28E+06
2010	2661	48	10	8.0	16.8	8.3	3.7	5.3	52	50	1	2.48	627,176	2.90E+06
2011	2768	48	10	8.0	16.8	8.3	3.7	5.3	52	50	1	2.48	652,263	3.56E+06
2012	2879	48	10	8.0	16.8	8.3	3.7	5.3	52	50	1	2.48	678,354	4.23E+06
2013	2994	48	10	8.0	16.8	8.3	3.7	5.3	52	50	1	2.48	705,488	4.94E+06
2014	3113	48	10	8.0	16.8	8.3	3.7	5.3	52	50	1	2.48	733,707	5.67E+06
2015	3238	48	10	8.0	16.8	8.3	3.7	5.3	52	50	1	2.48	763,056	6.44E+06

El número de ejes equivalentes en el año 10 del proyecto es  $6,44 \times 10^6$ .

### 5.1.3 Características geotécnicas

Se realizaron en la exploración geotécnica, sondeos separados cada 250 m a una profundidad mínima de 1.50 m. A cada sondeo se le realizaron los ensayos de clasificación de suelos para cada estrato y CBR inalterado en la subrasante.

La metodología utilizada para el procesamiento de la información suministrada, consistió en determinar el parámetro de CBR diseño, de acuerdo a las características geomecánicas del suelo de subrasante y la homogeneidad del tramo.

Se determinó el CBR de diseño según la metodología AASHTO 93, como el promedio aritmético o percentil 50% del sector, que permitiera caracterizar la resistencia de la unidad homogénea.

El CBR de diseño es 5.0%, según los resultados determinados en la investigación geotécnica.

### 5.1.4 Diseño de la estructura de pavimento

Según el método de diseño de la AASHTO 93, se determinan los espesores de las capas de la estructura del pavimento en función del número de ejes equivalentes en el período de diseño, el número estructural, la pérdida de serviciabilidad en el tiempo y del módulo de resiliencia de la subrasante, a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Log}W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(\text{SN} + 1) - 0.20 + \frac{\log[\Delta\text{PSI}/(4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1094/(\text{SN} + 1)^{5.19}} + 2.32 \log M_R - 8.07$$

Donde:

$W_{18}$	=	Número de ejes equivalentes de 8.2 t
$Z_R$	=	Desviación estándar normal
$S_o$	=	Error estándar combinado de la predicción del tránsito
$\Delta\text{PSI}$	=	Pérdida de serviciabilidad
$M_R$	=	Módulo de resiliencia de la subrasante (psi)
$\text{SN}$	=	Número estructural determinado por:
$\text{SN}$	=	$a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$

Siendo:

- $a_i$  = Coeficiente estructural de la capa i (psi)  
 $D_i$  = Espesor de la capa i (plg)  
 $m_i$  = Coeficiente de drenaje de la capa granular i

a. Confiabilidad:

Representa el concepto de la incertidumbre que se refleja en la predicción del tránsito y en los niveles de comportamiento.

La ecuación básica fue deducida para condiciones medias del proyecto experimental y en consecuencia existe la probabilidad de que un 50% de los valores estén sobrevaluados y un 50% infraevaluados.

Tabla 5.3 Niveles sugeridos de confiabilidad.

TIPO DE CARRETERA	NIVEL DE CONFIABILIDAD RECOMENDADO	
	URBANO	RURAL
Autopistas y carreteras inter departamentales	85 - 99.9	80 - 99.9
Otras arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Si las variaciones de tránsito y de comportamiento se representan en una curva normalizada de Gauss, el área total que se encuentra debajo de ella, corresponden al 100% de los resultados. Si para una confiabilidad del 50% la desviación normal estándar es 0.00, para valores mayores que 50% el valor será negativo.

De acuerdo a la tabla 5.3 por ser este tipo de vía una carretera local pero importante en el desarrollo del departamento, y con base en el TPD obtenido, el nivel de confiabilidad sugerido es del 90%.

## b. Desviación normal estándar Zr:

Tabla 5.4 Desviación normal estándar

CONFIABILIDAD R (%)	DESVIACIÓN NORMAL ESTÁNDAR(zr)
50	0.00
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645

Para una confiabilidad del 90%, la desviación normal estándar que corresponde es de -1.282.

## c. Error estándar So:

Las variaciones debidas a la predicción del tránsito y al comportamiento real se suman en un “error estándar”, que se aplica directamente al cálculo de espesores. De la experiencia disponible se ha verificado que So se encuentra entre 0.40 y 0.50. El valor menor corresponde a las condiciones del AASTHO Road Test.

El error estándar que se toma es de 0.45 por ser un diseño de pavimento flexible.

## d. Pérdida del índice de serviciabilidad:

Índice de servicio o serviciabilidad: capacidad que tiene el pavimento para atender el tránsito. El índice de serviciabilidad varía de 5 (excelente) a 1 (pésimo).

$$(\Delta PSI = P_i - P_f)$$

El diseño se hace para que el pavimento llegue al final de su vida útil con el nivel de servicio mínimo deseado. El nivel superior de serviciabilidad depende de las condiciones de construcción y el final hasta donde se permite llevar la vía. Tiene un carácter subjetivo, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 5.5 Nivel final de servicio

NIVEL FINAL DE SERVICIO	PORCENTAJE DE PERSONAS QUE LA CONSIDERAN INACEPTABLE
3.0	12
2.5	55
2.0	85

El nivel de servicio finales de 2.5 supone que un 55% de las personas considerarán la vía en su nivel de servicio final como inaceptable.

$$\Delta\text{PSI} = 4,2 - 2,5 = 1,7$$

e. Caracterización de los materiales:

La subrasante es caracterizada mediante el módulo resiliente de acuerdo con AASHTO T274, realizado en situaciones de humedad representativas de las condiciones de servicio.

En nuestro medio para la determinación del Mr se puede hacer un ensayo dinámico de suelos. Sin embargo, el valor más comúnmente utilizado se obtiene con la siguiente correlación:

$$\text{Mr} = 1,500 * \text{CBR (PSI)}$$

El CBR de diseño de la subrasante para este proyecto, es CBR = 5.0%

$$\text{Mr} = 7,500 \text{ PSI}$$

Los coeficientes estructurales de los materiales asfálticos y granulares se adoptan a partir de las propiedades de cada material.

Tabla 5.6 Coeficiente ai para diferentes tipos de materiales

TIPO DE MATERIAL	COEFICIENTE ESTRUCTURAL
Mezcla densa en caliente	0.42
Base estabilizada con asfalto	0,24
Base estabilizada con cemento	0,19
Base granular	0.14
Sub base granular	0.11

Los coeficientes de drenaje adoptados para las capas granulares se adoptan a partir de la calidad del drenaje y el tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación.

Tabla 5.7 Coeficiente  $m_i$  para los materiales granulares

TIPO DE MATERIAL	COEFICIENTE DE DRENAJE
Base granular	1.00
Sub base granular	1.00

f. Determinación de espesores:

Se seleccionan los espesores realizando un análisis por capas; primero se calcula el SN requerido sobre la subrasante, y del mismo modo se calculan los SN necesarios sobre las capas de subbase y base, usando los valores aplicables para cada caso.

$$SN_{\text{requerido}} = 4.65$$

Se determina el espesor de la carpeta asfáltica a partir del modulo resiliente de la base  $E_b=30.000$  PSI, calculado a partir del  $CBR=80\%$ .

$$SN_1 = 2.78$$

$$D_1 = SN_1 / a_1 = 2.78 / 0.42 = 6.62''$$

$$D_{1, \text{ corregido}} = 7.0''$$

$$SN_{1, \text{ corregido}} = 2.94$$

Se determina el espesor que debe tener la base granular, a partir del modulo resiliente de la subbase  $E_{sb}=15.000$  PSI, calculado a partir del  $CBR=30\%$ .

$$SN_2 = 3.62 - 2.94 = 0.68$$

$$D_2 = SN_2 / a_2 \times m_2 = 0.68 / 0.14 = 4.86''$$

$$D_{2, \text{ corregido}} = 6.0'', \text{ minimo recomendado por la guía AASHTO 1993}$$

$$SN_{2, \text{ corregido}} = 0.84$$

Se determina el espesor de la subbase a partir del numero estructural del total del pavimento, del concreto asfaltico y de la base granular.

$$SN_3 = 4.65 - (2.94 + 0.84) = 0.87, \text{ entonces,}$$

$$D_3 = SN_3 / a_3 \times m_3 = 0.87 / 0.11 = 7.9''$$

$$D_{3, \text{ corregido}} = 8.0''$$

$$SN_{3, \text{ corregido}} = 0.88$$

$$SN_{\text{colocado}} = 2.94 + 0.84 + 0.88$$

$$SN_{\text{colocado}} = 4.66 > SN_{\text{requerido}} = 4.65 \text{ ok}$$

La estructura de pavimento queda diseñada de la siguiente forma:

- Concreto asfáltico ( $E=400.000$  PSI) = 7.0”
- Base granular (CBR=80%) = 6.0”
- Subbase granular (CBR=30%) = 8.0”

El espesor de la carpeta asfáltica de 7.0”, encontrado por la metodología AASHTO 1993, se considera demasiado grande, por lo que se recomienda colocar una carpeta asfáltica y una base estabilizada con asfalto o una base estabilizada con cemento, teniendo en cuenta los espesores mínimos y el número estructural requerido  $SN_1$  sobre la base granular, recomendados por la metodología AASHTO 1993.

A continuación se presentan en la tabla 5.8 y 5.9 respectivamente, el cuadro resumen y las alternativas de diseño por la metodología AASHTO 1993.

Tabla 5.8 Cuadro resumen metodo AASHTO 1993

MATERIALES	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
	$H_i$	$a_i$	$SN_i$	$H_i$	$a_i$	$SN_i$	$H_i$	$a_i$	$SN_i$
Carpeta Asfáltica	7”	0.42	$SN_1 = 2.94$	4”	0.42	$SN_{1,1} = 1.68$	4”	0.42	$SN_{1,1} = 1.68$
Base Asfáltica				6”	0.24	$SN_{1,2} = 1.44$			
Base Cementada							7”	0.19	$SN_{1,2} = 1.33$
			$SN_1 = 2.94$			$SN_1 = 3.12$			$SN_1 = 3.01$
Base Granular	6”	0.14	$SN_2 = 0.84$	6”	0.14	$SN_2 = 0.84$	6”	0.14	$SN_2 = 0.84$
Subbase Granular	8”	0.11	$SN_3 = 0.88$	8”	0.11	$SN_3 = 0.88$	8”	0.11	$SN_3 = 0.88$
			$SN_T = 4.66$			$SN_T = 4.84$			$SN_T = 4.73$

Tabla 5.9 Alternativas de diseño metodo AASHTO 1993

CAPA	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
Carpeta asfáltica	18 cm	10 cm	10 cm
Base Asfáltica		15 cm	
Base Cementada			18 cm
Base Granular	15 cm	15 cm	15 cm
Subbase Granular	20 cm	20 cm	20 cm

## 5.2 DISEÑO DE PAVIMENTO MÉTODO INVIAS.

### 5.2.1 Region climática

Para la clasificación del tramo dentro de las regiones en las que se ha dividido el país, como se presenta en la Tabla 5.10, se utilizó el valor de la Precipitación Media Anual (2,200 mm) y la Temperatura TMAP (18°C) de la región.

Tabla 5.10 Regiones climáticas según la temperatura y precipitación

No	REGION	TEMPERATURA TMAP (°C)	PRECIPITACION MEDIA ANUAL (mm)
R1	Fria seca y fria semihumeda	<13	<2000
R2	Templado seco y semihumedo	13-20	<2000
R3	Calido seco y calido semihumedo	20-30	<2000
R4	Templado humedo	13-20	2000-4000
R5	Calido humedo	20-30	2000-4000
R6	Calido muy humedo	20-30	>4000

Ubicados los datos dentro de la Tabla 5.10, se obtuvo la región climática a la que pertenece el proyecto, R4.

### 5.2.2 Categorías del tránsito

Para este proyecto en particular, el tránsito que se utilizó para definir las estructuras aptas es el T5, que se presenta en la Tabla 5.11, contemplado dentro de las cartas de diseño, que presenta el Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito, el cual corresponde a 6.440.000 ejes de 8.2 t, que son equivalentes a  $6.44 \times 10^6$ .

Tabla 5.11 Categorías del tránsito

DESIGNACION	RANGOS DEL TRÁNSITO ACUMULADO POR EL CARRIL DE DISEÑO ( $10^6$ )
T1	0.5-1
T2	1-2
T3	2-4
T4	4-6
T5	6-10
T6	10-15
T7	15-20



### 5.2.3 Categorías de la subrasante

Si el parámetro evaluado es el CBR se debe utilizar la correlación  $Mr \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = 100 \text{ CBR}$ , para clasificarla dentro de las categorías que se presentan en la Tabla No 5.12, este caso corresponde a una categoría S2.

Tabla 5.12 Categorías del tránsito

<b>MODULO RESILIENTE (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>CATEGORIA</b>
300<MR<500	S1
500<MR<700	S2
700<MR<1000	S3
1000<MR<1500	S4
MR>1500	S5

### 5.2.4 Diseño de la estructura de pavimento

Según lo indicado en la carta de diseño 5, para la Región climática R5, las estructuras a recomendar se presentan en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13 Alternativas de diseño metodo INVIAS

<b>CAPA</b>	<b>ALTERNATIVA 4</b>	<b>ALTERNATIVA 5</b>	<b>ALTERNATIVA 6</b>
MDC-2	15 cm	10 cm	15 cm
BEE		20 cm	
BEC			25 cm
BG-2	25 cm		20 cm
SBG-1	30 cm	40 cm	

### 5.3 DISEÑO DE PAVIMENTO METODO RACIONAL

#### 5.3.1 Información inicial

Como parte de la información necesaria para realizar el análisis racional de las diferentes estructuras planteadas por las metodologías tradicionales, se encuentran:

- Transito de diseño  $N = 6,440,000$  ejes equivalentes de 8,2 toneladas
- CBR de diseño = 5%

#### 5.3.2 Caracterización dinámica de los materiales

##### *MEZCLA ASFALTICA:*

- ✓ Temperatura de la mezcla:

Para una temperatura media Anual WMAAT = 18 °C, y de acuerdo al espesor de la carpeta a colocar, se obtiene la temperatura de la mezcla según la relación entre la temperatura efectiva de las capas asfálticas y MMAT o WMAAT.

$$T_{mix} = 27 \text{ °C}$$

- ✓ Módulo de la mezcla:

Con la temperatura del pavimento como dato, se realizó el cálculo del Módulo de la mezcla, con la formulación propuesta por Hwang y Witczak para el Instituto Norteamericano del Asfalto (1979), tal como se presenta en la tabla 5,14.

$$Smez_{CA} = 1E+05 \times 10^{B1} \text{ (lbs/pulg}^2\text{)}, \text{ donde,}$$

$Smez_{CA}$ : Módulo dinámico de la mezcla de concreto asfáltico.

$$B1 = (B3) + 5E-06 \cdot (B2) - 1.89E-03 \cdot F^{-1.1}$$

$$B2 = (B4)^{0.5} \cdot T^{(B5)}$$

$$B3 = 0.553833 + 0.028829 \cdot (P_{200} \cdot F^{-0.1703}) - 0.03476 \cdot V_A + 0.070377 \cdot V_S + 0.931757 \cdot F^{-0.02774}$$

$$B4 = 0.483 \cdot V_{LA}$$

$$B5 = 1.3 + 0.49825 \cdot \log(F)$$

F: Frecuencia de aplicación de la carga en Hz

T: Temperatura de la mezcla en °F

P<sub>200</sub> = Porcentaje de agregados que pasa la malla N° 200

V<sub>A</sub> = Porcentaje de volumen de vacíos con aire

V<sub>S</sub> = Viscosidad del ligante asfáltico a 70 °F en poises x 10<sup>6</sup>

V<sub>LA</sub> = Volumen del ligante asfáltico en %

Tabla 5.14 Módulo Dinámico de la Carpeta Asfáltica

DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DEL CONCRETO ASFÁLTICO		
PARAMETRO	UNIDAD	VALOR
Pasa 200	%	5
Frecuencia de carga	Hz	10
Vacíos con aire	%	8
Viscosidad absoluta	Poises x 10 <sup>6</sup>	3.68
Volumen asfalto	%	11

MÓDULO DEL ASFÁLTO - INSTITUTO DEL ASFÁLTO (Hwang y Witczak 1979)								
T (°F)	B1	B2	B3	B4	B5	MÓDULO DEL CONCRETO ASFÁLTICO		
						PSI	K/cm <sup>2</sup>	Mpa
81	0.60	6,230.27	1.51	5.31	1.80	399,985	27,999	2800

$$S_{mezCA} = 2800 \text{ MPa}$$

#### BASE ASFÁLTICA:

✓ Temperatura de la mezcla:

Para una temperatura media Anual WMAAT = 18 °C, y de acuerdo al espesor de la base asfáltica a colocar, se obtiene la temperatura de la mezcla según la relación entre la temperatura efectiva de las capas asfálticas y WMAAT o WMAAT.

$$T_{mix} = 27 \text{ °C}$$

✓ Módulo de la mezcla:

Con la temperatura del pavimento como dato, se realizó el cálculo del Módulo de la mezcla, con la formulación propuesta por Hwang y Witczak para el Instituto Norteamericano del Asfalto (1979), tal como se presenta en la tabla 5,15.

$$Smez_{CA} = 1E+05 \times 10^{B1} \text{ (lbs/pulg}^2\text{)}, \text{ donde,}$$

$$B1 = (B3) + 5E-06 \times (B2) - 1.89E-03 \times F^{-1.1}$$

$$B2 = (B4)^{0.5} \times T^{(B5)}$$

$$B3 = 0.553833 + 0.028829 \times (P_{200} \times F^{-0.1703}) - 0.03476 \times V_A + 0.070377 \times V_S + 0.931757 \times F^{-0.02774}$$

$$B4 = 0.483 \times V_{LA}$$

$$B5 = 1.3 + 0.49825 \times \text{Log}(F)$$

F: Frecuencia de aplicación de la carga en Hz

T: Temperatura de la mezcla en °F

P<sub>200</sub> = Porcentaje de agregados que pasa la malla N° 200

V<sub>A</sub> = Porcentaje de volumen de vacíos con aire

V<sub>S</sub> = Viscosidad del ligante asfáltico a 70 °F en poises x 10<sup>6</sup>

V<sub>LA</sub> = Volumen del ligante asfáltico en %

Tabla 5.15 Modulo dinamico de la base asfaltica

DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DEL CONCRETO ASFÁLTICO		
PARAMETRO	UNIDAD	VALOR
Pasa 200	%	6
Frecuencia de carga	Hz	10
Vacios con aire	%	16
Viscosidad absoluta	Poises x 10 <sup>6</sup>	3.68
Volumen asfalto	%	10

MÓDULO DEL ASFÁLTO - INSTITUTO DEL ASFÁLTO (Hwang y Witczak 1979)								
T (°F)	B1	B2	B3	B4	B5	MÓDULO DEL CONCRETO ASFÁLTICO		
						PSI	K/cm2	Mpa
81	0.39	5,940.33	1.25	4.83	1.80	242,951	17,007	1701

$$Smez_{BA} = 1700 \text{ MPa}$$

**BASE CEMENTADA:**

- ✓ Resistencia a la compresión inconfiada a 7 días:

Se adopta para este proyecto en particular, una resistencia a la compresión inconfiada a los 7 días de 600 PSI (42 kg/cm<sup>2</sup>).

- ✓ Módulo de elasticidad de la base cementada:

Tomando como referencia el abaco correspondiente para determinar los aportes estructurales para bases tratadas con cemento de la AASHTO 1993, encontramos el módulo de elasticidad de la base estabilizada con cemento,  $7 \times 10^5$  PSI

$$S_{mezBEC} = 4800 \text{ MPa}$$

**SUBRASANTE:**

- ✓ Módulo de la subrasante:

Para el cálculo del Módulo de la subrasante se trabajó con la siguiente expresión, en la búsqueda de optimizar la estructura de pavimento a colocar de acuerdo a la solicitud del tránsito.

$$M_r \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = 100 \text{ CBR}$$

$$M_r \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = 500$$

$$M_r \text{ (MPa)} = 50$$

**CAPAS GRANULARES:**

- ✓ Módulos de las capas granulares:

El módulo de las capas granulares se obtuvo con las expresiones propuestas por Barker, tal como se presenta en la tabla 5,16.

Para la capa granular inferior:

$$E_{SB} = E_{SBR} * [5.35 * \text{Log}(H_{SB}) + 0.62 * \text{Log}(E_{SBR}) - 1.56 * \text{Log}(E_{SBR}) * \text{Log}(H_{SB}) - 1.13]$$

Para la capa granular superior:

$$E_{BG} = E_{SB} * [8.05 * \text{Log}(H_{BG}) + 0.84 * \text{Log}(E_{SB}) - 2.1 * \text{Log}(E_{SB}) * \text{Log}(H_{BG}) - 2.2]$$

Donde:

$E_{SBR}$ : Módulo de la subrasante o capa de apoyo inferior ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$E_{SB}$ : Módulo de la capa granular inferior ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$E_{BG}$ : Módulo de la capa granular superior ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$H_{SB}$ : Espesor de la capa granular inferior (cm)

$H_{BG}$ : Espesor de la capa granular superior (cm).

Tabla 5.16 Modulo de elasticidad de las capas granulares

AASHTO 1993									
Materiales	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
	Espesores (cm)	Modulos		Espesores (cm)	Modulos		Espesores (cm)	Modulos	
		(k/cm2)	(MPa)		(k/cm2)	(MPa)		(k/cm2)	(MPa)
Base	15	2400	240	15	2400	240	15	2400	240
Subbase	20	1013	101	20	1013	101	20	1013	101
Subrasante	Infinito	500	50	Infinito	500	50	Infinito	500	50

INVIAS									
Materiales	ALTERNATIVA 4			ALTERNATIVA 5			ALTERNATIVA 6		
	Espesores (cm)	Modulos		Espesores (cm)	Modulos		Espesores (cm)	Modulos	
		(k/cm2)	(MPa)		(k/cm2)	(MPa)		(k/cm2)	(MPa)
Base	25	2971	297						
Subbase	30	1113	111	40	1185	118	20	1013	101
Subrasante	Infinito	500	50	Infinito	500	50	Infinito	500	50

### 5.3.3 Relaciones de Poisson

Con respecto a las relaciones de Poisson de estos tipos de materiales, se pueden asumir los siguientes valores.

Tabla 5.17 Coeficientes de Poisson

MATERIALES	RELACION DE POISSON
Concreto asfaltico	0.35
Base asfáltica	0.35
Base cementada	0.20
Base granular	0.40
Subbase granular	0.40
Subrasante	0.45

### 5.3.4 Modelos elásticos

Con base en los criterios de caracterización dinámica de los materiales, la modelización estructural del pavimento contempla los valores de módulo y relaciones de Poisson y los espesores de las capas, que se presentan a continuación en la tabla 5,18.

Tabla 5.18 Modelos Elásticos

AASHTO 1993										
Materiales	Relaciones de Poisson	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
		Espesores (cm)	Modulos		Espesores (cm)	Modulos		Espesores (cm)	Modulos	
			(k/cm2)	(MPa)		(k/cm2)	(MPa)		(k/cm2)	(MPa)
Carpeta asfáltica	0,35	18	28000	2800	10	28000	2800	10	28000	2800
Base asfáltica	0,35				15	17000	1700			
Base cementada	0,20							18	48000	4800
Base granular	0,40	15	2400	240	15	2400	240	15	2400	240
Subbase granular	0,40	20	1013	101	20	1013	101	20	1013	101
Subrasante	0,45	Infinito	500	50	Infinito	500	50	Infinito	500	50

INVIAS										
Materiales	Relaciones de Poisson	ALTERNATIVA 4			ALTERNATIVA 5			ALTERNATIVA 6		
		Espesores (cm)	Modulos		Espesores (cm)	Modulos		Espesores (cm)	Modulos	
			(k/cm2)	(MPa)		(k/cm2)	(MPa)		(k/cm2)	(MPa)
Carpeta asfáltica	0,35	15	28000	2800	10	28000	2800	15	28000	2800
Base asfáltica	0,35				20	17000	1700			
Base cementada	0,20							25	48000	4800
Base	0,40	25	2971	297				20	1013	101
Subbase	0,40	30	1113	111	40	1185	118			
Subrasante	0,45	Infinito	500	50	Infinito	500	50	Infinito	500	50

### 5.3.5 Definición de los modelos de falla de los materiales

Tradicionalmente los pavimentos flexibles bajo la concepción de los métodos mecanicistas se han diseñado utilizando dos criterios básicos: evitar el agrietamiento de las capas asfálticas y evitar el ahuellamiento de la subrasante.

En los pavimentos semirígidos estos criterios se complementan con el control de fisuración de la capa cementada, cuando se pone a trabajar a tracción, controles que son válidos realizarlos con criterios de deformaciones o de esfuerzos, pero siempre garantizando que las solicitaciones críticas calculadas sean menores que las admisibles, permitiéndose así obtener el consumo de deterioro por cada concepto, al relacionar las solicitaciones esperadas versus las repeticiones admisibles.

**DEFORMACION UNITARIA A TRACCION EN LA FIBRA INFERIOR DE LAS CAPAS ASFALTICAS ADMISIBLES:**

El cálculo de los valores admisibles se realizó con las siguientes expresiones.

➤ Ecuación Shell,

$$\epsilon_{tadm} = (0.856 * V_{LA} + 1.08) * S_{mezCA}^{-0.36} * (N/K)^{-0.2}$$

Donde.

$S_{mezCA}$  = Módulo dinámico de la mezcla, N/m<sup>2</sup>

$V_{LA}$  = Volumen del ligante, %

K = Factor de calage .

$$K = K1 * K2 * K3 = 8,25$$

K1 = Autoreparación de pequeñas fisuras diferentes estados de tensiones, para mezclas densas ricas en asfalto = 10

K2 = Distribución lateral de las cargas = 2,5

K3 = Diferentes temperaturas de trabajo de la mezcla a lo largo del día y del año, espesor alto temperatura alta = 0,33

➤ Ecuación Instituto Norteamericano del asfalto (INA),

$$\epsilon_{tadm} = [N / (0.00432 * K * C * S_{mezCA}^{-0.854})]^{(-1/3.291)}$$

Donde.

$S_{mezCA}$  = Módulo dinámico de la mezcla, psi

K = Factor de calage = 18,4

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 * (A - 0.69)$$

$$A = V_{LA} / (V_A + V_{LA})$$

$V_{LA}$  = Volumen del ligante, %

$V_A$  = Volumen de aire, %



De los dos valores obtenidos se sacó un valor promedio que se usó en la comparación.

***ESFUERZO A TRACCION EN LA FIBRA INFERIOR DE LA CAPA CEMENTADA ADMISIBLE:***

Para complementar la evaluación elástica de las estructuras de diseño, se hace necesario el chequeo de la deformación que se presenta en la capa de base estabilizada, utilizando como valor admisible el proporcionado por el siguiente modelo de predicción.

$$\sigma_t = (0,5144 * N * 1E^{-6})^{-1/2} * R_f$$

$$R_f = 2 * RT = 2 * (R_c/10) = 3 * (R/10)$$

Donde.

$\sigma_t$  = Tensión radial de tracción en la fibra inferior

$R_f$  = Resistencia a flexotracción a 90 días

$RT$  = Resistencia a tracción a 90 días

$R_c$  = Resistencia a compresión a 90 días

$R$  = Resistencia a compresión a 7 días

***DEFORMACIÓN UNITARIA A COMPRESION EN LA SUBRASANTE ADMISIBLE***

Para calcular la condición estructural del pavimento, se utilizo la expresión de Shell, para una confiabilidad del 85%:

$$\epsilon_z = 2.1 * 10^{-2} (N)^{-0.25}$$

*ESFUERZO DE COMPRESIÓN EN LA SUBRASANTE ADMISIBLE*

Para el esfuerzo vertical en la subrasante, se utilizó la expresión de Dormon y Kerhoven:

$$\sigma_{z_{adm}} = \frac{0.007 * E_{SR}}{1 + 0.7 * \text{Log}N}$$

*DEFORMACION ADMISIBLE*

Para calcular la condición estructural del pavimento, se utilizó la expresión del Instituto Norteamericano del Asfalto INA:

$$\Delta_o = 1.0363 (N)^{-0.2438}$$

Donde.

$\Delta_o$  = Deflexión en pulgadas

N = Número de repeticiones de ejes de 8.2 toneladas

## 5.3.6 Calculo de esfuerzos y deformaciones

Una vez definido el modelo estructural, las características geomecánicas de los materiales y configuración del eje de referencia que actuara sobre el pavimento, se calculan los valores de esfuerzos y deformaciones presentadas en los diferentes puntos de interés de la estructura.

Para facilitar estos cálculos tan dispendiosos, se utilizan programas de computador tal como el Bituimen Stress Analysis in Roads, Bisar 3,0 de la casa Shell.

### 5.3.7 Comparaciones de solicitaciones calculadas con las admisibles

Después de realizar el cálculo de los esfuerzos y deformaciones en los puntos de interés de la estructura, se hace la comparación de estos valores con los límites admisibles establecidos por las leyes de fatiga o de comportamiento de los materiales.

Tabla 5.19 Cuadro resumen diseño racional

ALTERNATIVA	DEFORMACIÓN DE TRACCIÓN CARPETA ASFÁLTICA MDC-2			DEFORMACIÓN DE TRACCIÓN BASE ASFÁLTICA BEA			ESFUERZO A TRACCIÓN BASE CEMENTADA BEC (k/cm <sup>2</sup> )			DEFORMACION A COMPRESION SUBRASANTE			ESFUERZO COMPRESION SUBRASANTE (k/cm <sup>2</sup> )			DEFLEXIÓN (mm)		
	CALC	ADMISIBLE PROMEDIO	CONSUMO (%)	CALC	ADMISIBLE PROMEDIO	CONSUMO (%)	CALC	ADM	CONSUMO (%)	CALC	ADM	CONSUMO (%)	CALC	ADM	CONSUMO (%)	CALC	ADM	CONSUMO (%)
1	1.72E-04	1.87E-04	92							3.57E-04	4.17E-04	86	0.19	0.61	31	0.50	0.55	91
2	5.23E-05	1.87E-04	28	1.49E-04	1.81E-04	82				2.69E-04	4.17E-04	65	0.14	0.61	23	0.42	0.55	76
3	1.53E-05	1.87E-04	8				4.92	6.92	71	1.85E-04	4.17E-04	44	0.10	0.61	16	0.35	0.55	64
4	1.73E-04	1.87E-04	93							2.69E-04	4.17E-04	65	0.14	0.61	23	0.47	0.55	85
5	4.72E-05	1.87E-04	25	1.35E-04	1.81E-04	75				2.06E-04	4.17E-04	49	0.11	0.61	18	0.40	0.55	73
6	3.56E-05	1.87E-04	19				2.92	6.92	42	1.21E-04	4.17E-04	29	0.08	0.61	13	0.29	0.55	53

## 5.4 DISEÑO DE PAVIMENTO MÉTODO AASHTO 2002.

Tomando como base los mismos parámetros del ejemplo de diseño por los métodos tradicionales AASHTO 1993 y el Manual de diseño de pavimentos para medios y altos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías, presentamos a continuación los resultados encontrados para diferentes alternativas y confiabilidades de diseño por la metodología de diseño AASHTO 2002.

### 5.4.1 Ejemplo de diseño AASHTO 2002, alternativa 1 AASHTO 1993

#### 5.4.1.1 Información general

##### General Information

Design Life	10 years
Base/Subgrade construction:	January, 2007
Pavement construction:	March, 2007
Traffic open:	April, 2007
Type of design	Flexible

#### 5.4.1.2 parámetros de análisis

Location:	Popayan - Rosas
Project ID:	INV_P2500
Section ID:	Ruta 25_Sector 03

Date: 12/8/2006

Station/milepost format:	Miles: 0.000
Station/milepost begin:	0
Station/milepost end:	10
Traffic direction:	North bound

#### 5.4.1.3 criterios de desempeño

##### Performance Criteria

	Limit	Reliability
Initial IRI (in/mi)	95	
Terminal IRI (in/mi)	222	90
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) (ft/mile):	2000	90
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	25	90
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	1000	90
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture)	25	90
Permanent Deformation (AC Only) (in):	0.25	90
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	0.5	90

### 5.4.1.4 Tránsito

**Traffic**

Initial two-way aadtt: 1183  
 Number of lanes in design direction: 1  
 Percent of trucks in design direction (%): 50  
 Percent of trucks in design lane (%): 100  
 Operational speed (mph): 37

**Traffic -- Volume Adjustment Factors**

**Monthly Adjustment Factors** (Level 3, Default MAF)

Month	Vehicle Class										
	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7	Class 8	Class 9	Class 10	Class 11	Class 12	Class 13	
January	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
February	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
March	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
April	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
May	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
June	1.00	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	1.00
August	1.00	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	1.00
October	1.00	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	1.00
December	1.00	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 19.0%  
 Class 5 48.0%  
 Class 6 16.0%  
 Class 7 0.0%  
 Class 8 0.0%  
 Class 9 7.0%  
 Class 10 10.0%  
 Class 11 0.0%  
 Class 12 0.0%  
 Class 13 0.0%

**Hourly truck traffic distribution**

by period beginning:

Midnight	0.6%	Noon	6.4%
1:00 am	0.5%	1:00 pm	6.0%
2:00 am	0.5%	2:00 pm	6.7%
3:00 am	0.6%	3:00 pm	6.6%
4:00 am	1.5%	4:00 pm	7.0%
5:00 am	3.1%	5:00 pm	7.0%
6:00 am	5.2%	6:00 pm	7.3%
7:00 am	6.1%	7:00 pm	4.1%
8:00 am	6.1%	8:00 pm	3.1%
9:00 am	6.3%	9:00 pm	1.8%
10:00 am	5.6%	10:00 pm	1.3%
11:00 am	5.8%	11:00 pm	0.8%

**Traffic Growth Factor**

Vehicle Class	Growth Rate	Growth Function
Class 4	4.0%	Compound
Class 5	4.0%	Compound
Class 6	4.0%	Compound
Class 7	4.0%	Compound
Class 8	4.0%	Compound
Class 9	4.0%	Compound
Class 10	4.0%	Compound
Class 11	4.0%	Compound
Class 12	4.0%	Compound
Class 13	4.0%	Compound

**Traffic -- Axle Load Distribution Factors**

Level 1: Site Specific

**Traffic -- General Traffic Inputs**

Mean wheel location (inches from the lane marking): 12  
 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	1.00	1.00	0.00	0.00
Class 5	2.00	0.00	0.00	0.00
Class 6	1.00	1.00	0.00	0.00
Class 7	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 8	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 9	1.00	2.00	0.00	0.00
Class 10	1.00	1.00	1.00	0.00
Class 11	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 12	0.00	0.00	0.00	0.00
Class 13	0.00	0.00	0.00	0.00

**Axle Configuration**

Average axle width (edge-to-edge) outside dimensions(ft): 8.5  
 Dual tire spacing (in): 12

**Axle Configuration**

Tire Pressure (psi) : 120

**Average Axle Spacing**

Tandem axle(psi): 51.6  
 Tridem axle(psi): 49.2  
 Quad axle(psi): 49.2

### 5.4.1.5 Clima

#### Climate

icm file:	C:\DG2002\Projects\POPAYAN.ICM
Latitude (degrees.minutes)	2.4667
Longitude (degrees.minutes)	-76.6
Elevation (ft)	5578
Depth of water table (ft)	5

### 5.4.1.6 Materiales

#### Structure--Design Features

#### Structure--Layers

##### Layer 1 -- Asphalt concrete

Material type:	Asphalt concrete
Layer thickness (in):	7

##### General Properties

###### General

Reference temperature (F°):	70
-----------------------------	----

###### Volumetric Properties as Built

Effective binder content (%):	11
Air voids (%):	8
Total unit weight (pcf):	148

<u>Poisson's ratio:</u>	0.35 (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:	0
Cumulative % Retained 3/8 inch sieve:	20
Cumulative % Retained #4 sieve:	40
% Passing #200 sieve:	6

##### Asphalt Binder

Option:	Conventional penetration grade
Viscosity Grade	Pen 60-70
A	10.6508 (correlated)
VTS:	-3.5537 (correlated)

**Layer 2 -- A-1-a**

Unbound Material: A-1-a  
 Thickness(in): 6

**Strength Properties**

Input Level: Level 2  
 Analysis Type: Representative value (User Input Modulus)  
 Poisson's ratio: 0.35  
 Coefficient of lateral pressure, Ko: 0.5  
 CBR: 80  
 Modulus (calculated) (psi): 42205  
 Moisture Content(%): -9999

**ICM Inputs**

Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI: 0  
 Liquid Limit (LL) 4  
 Compacted Layer Yes  
 Passing #200 sieve (%): 10  
 Passing #40 20  
 Passing #4 sieve (%): 50  
 D10(mm) 0.075  
 D20(mm) 0.425  
 D30(mm) 1.545  
 D60(mm) 7.54  
 D90(mm) 20.82

Sieve	Percent Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	10
#100	
#80	
#60	
#50	
#40	20
#30	
#20	
#16	
#10	32
#8	
#4	50
3/8"	65
1/2"	
3/4"	85
1"	100
1 1/2"	
2"	
2 1/2"	
3"	
3 1/2"	
4"	

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf): 139.3 (derived)  
 Specific gravity of solids, Gs: 2.70 (derived)  
 Saturated hydraulic conductivity (ft/hr): 0.01837 (derived)  
 Optimum gravimetric water content (%): 6.1 (derived)  
 Calculated degree of saturation (%): 79.1 (calculated)

Soil water characteristic curve parameters: Default values

Parameters	Value
a	5.3371
b	1.4888
c	0.66744
Hr.	100

**Layer 3 -- A-2-4**

Unbound Material: A-2-4  
 Thickness(in): 8

**Strength Properties**

Input Level: Level 2  
 Analysis Type: Representative value (User Input Modulus)  
 Poisson's ratio: 0.35  
 Coefficient of lateral pressure, Ko: 0.5  
 CBR: 30  
 Modulus (calculated) (psi): 22529  
 Moisture Content(%): -9999

**ICM Inputs**

Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI: 2  
 Liquid Limit (LL) 14  
 Compacted Layer Yes  
 Passing #200 sieve (%): 20  
 Passing #40 65  
 Passing #4 sieve (%): 85.6  
 D10(mm) 0.002739  
 D20(mm) 0.075  
 D30(mm) 0.1103  
 D60(mm) 0.3505  
 D90(mm) 9.5

Sieve	Percent Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	20
#100	
#80	
#60	
#50	
#40	65
#30	
#20	
#16	
#10	80
#8	
#4	
3/8"	90
1/2"	
3/4"	
1"	100
1 1/2"	
2"	
2 1/2"	
3"	
3 1/2"	
4"	

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf): 124.0 (derived)  
 Specific gravity of solids, Gs: 2.70 (derived)  
 Saturated hydraulic conductivity (ft/hr): 0.0003644 (derived)  
 Optimum gravimetric water content (%): 9.3 (derived)  
 Calculated degree of saturation (%): 69.7 (calculated)

Soil water characteristic curve parameters: Default values

Parameters	Value
a	6.6773
b	0.62051
c	3.2427
Hr.	180



**Layer 4 -- MH**

Unbound Material: MH  
 Thickness(in): Semi-infinite

**Strength Properties**

Input Level: Level 2  
 Analysis Type: ICM inputs (ICM Calculated Modulus)  
 Poisson's ratio: 0.35  
 Coefficient of lateral pressure, Ko: 0.5  
 CBR: 5  
 Modulus (calculated) (psi): 7157

**ICM Inputs**

Gradation and Plasticity Index  
 Plasticity Index, PI: 21.5  
 Liquid Limit (LL) 48  
 Compacted Layer Yes  
 Passing #200 sieve (%): 100  
 Passing #40 100  
 Passing #4 sieve (%): 100  
 D10(mm) 0.0001778  
 D20(mm) 0.0003162  
 D30(mm) 0.0005623  
 D60(mm) 0.002  
 D90(mm) 0.03873

Sieve	Percent Passing
0.001mm	40
0.002mm	60
0.020mm	80
#200	100
#100	
#80	
#60	
#50	
#40	
#30	
#20	
#16	
#10	
#8	
#4	100
3/8"	
1/2"	
3/4"	
1"	
1 1/2"	
2"	
2 1/2"	
3"	
3 1/2"	
4"	

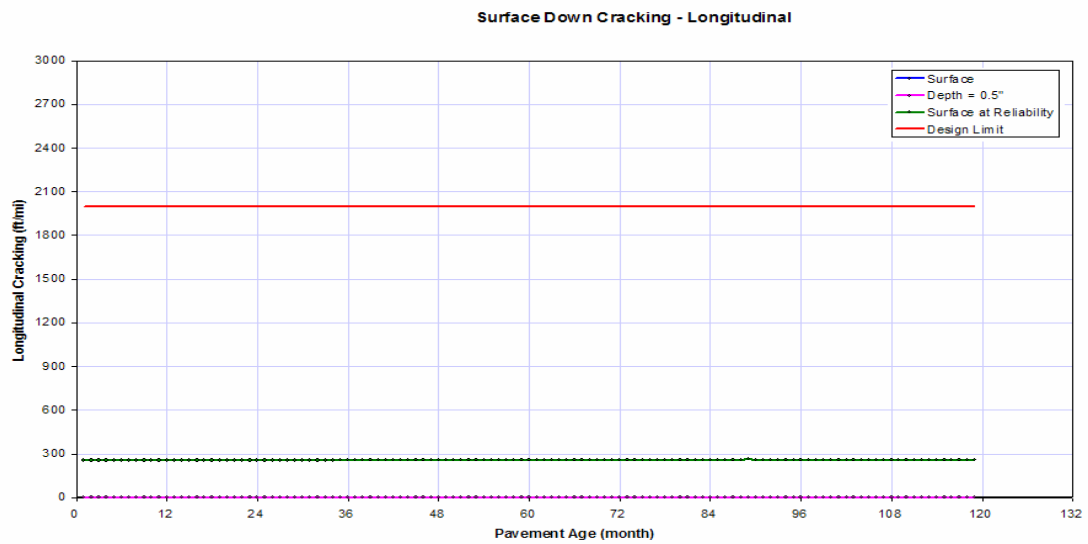
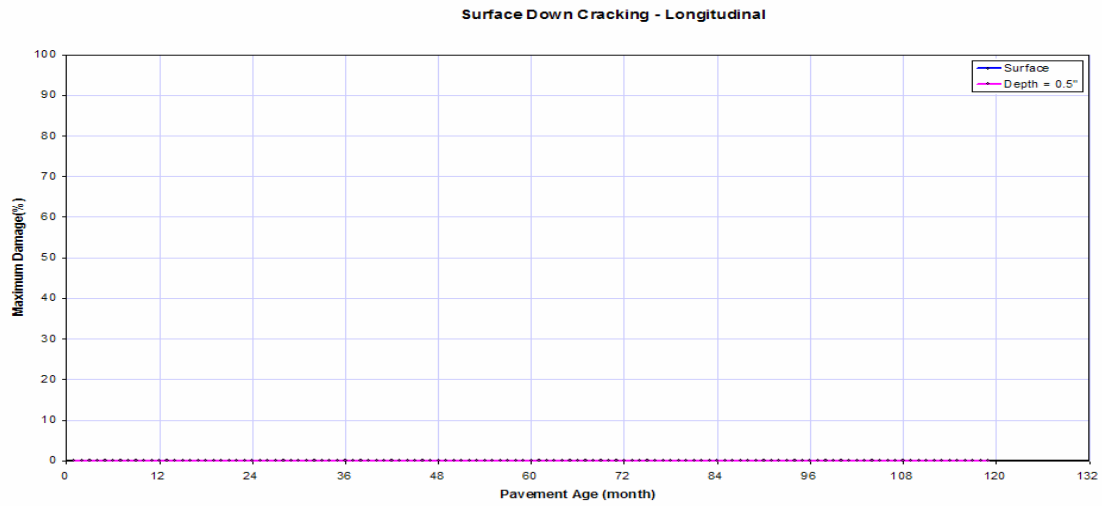
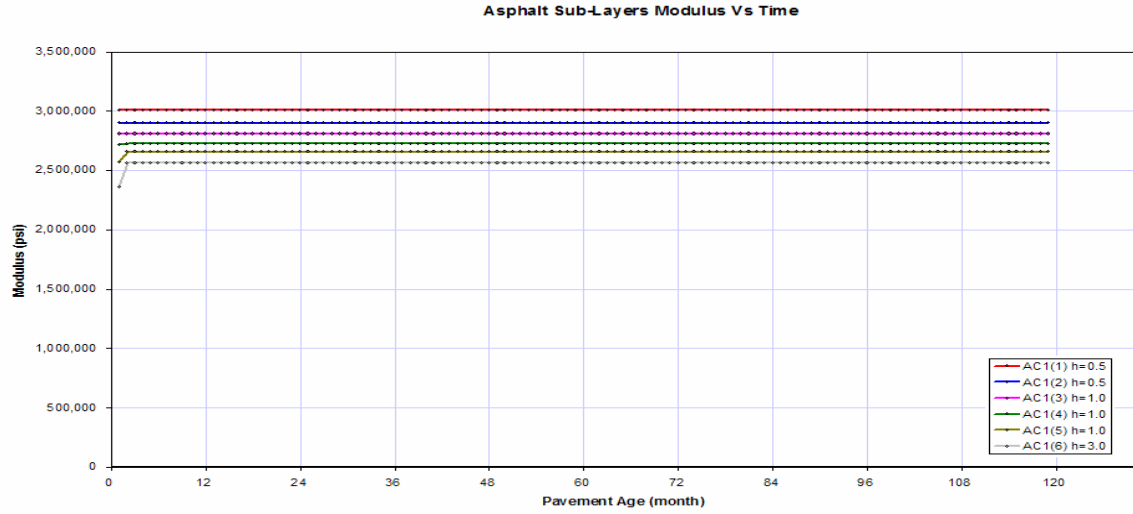
Calculated/Derived Parameters

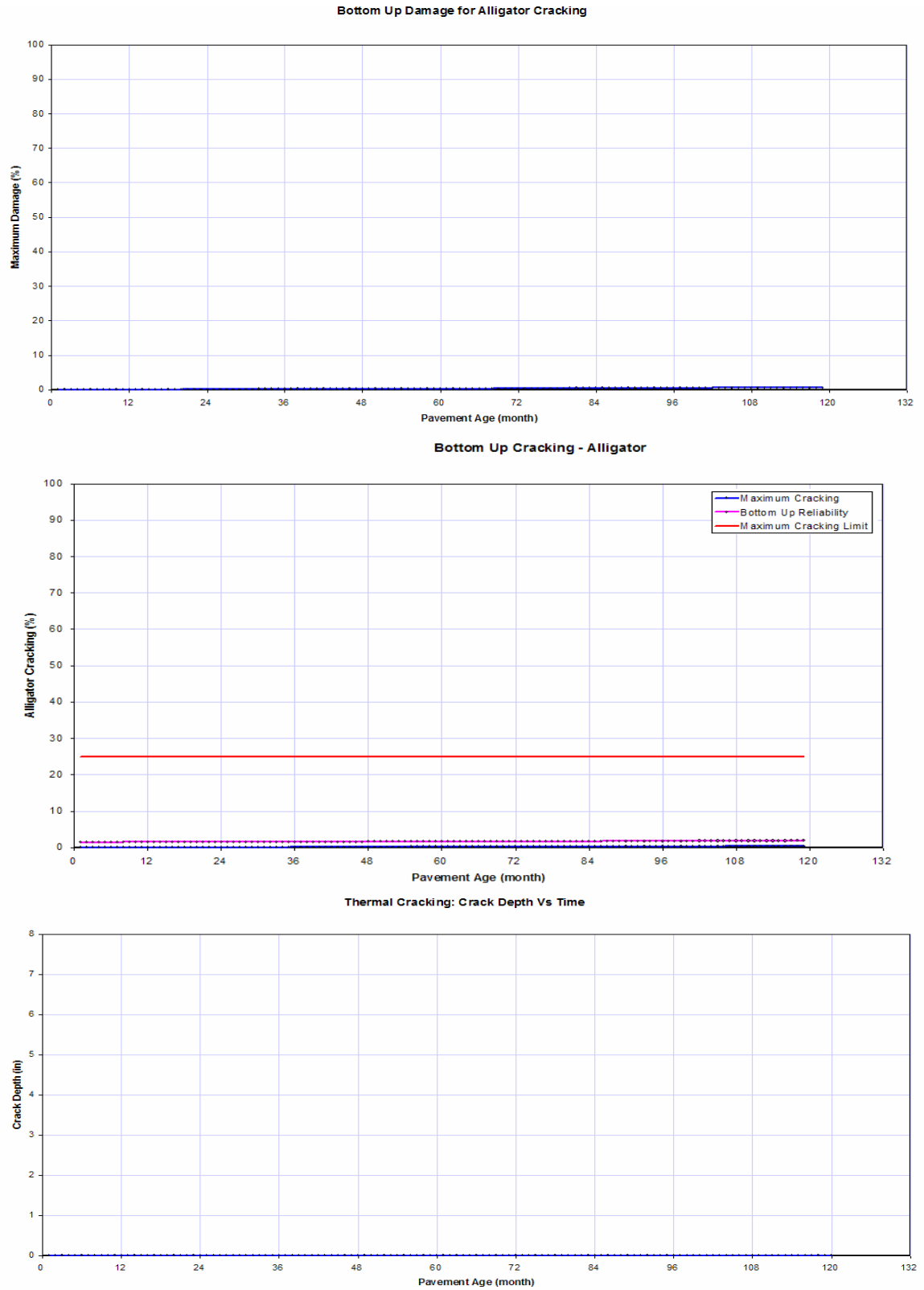
Maximum dry unit weight (pcf): 99.9 (derived)  
 Specific gravity of solids, Gs: 2.70 (derived)  
 Saturated hydraulic conductivity (ft/hr): 9.524e-006 (derived)  
 Optimum gravimetric water content (%): 21.6 (derived)  
 Calculated degree of saturation (%): 84.8 (calculated)

Soil water characteristic curve parameters: Default values

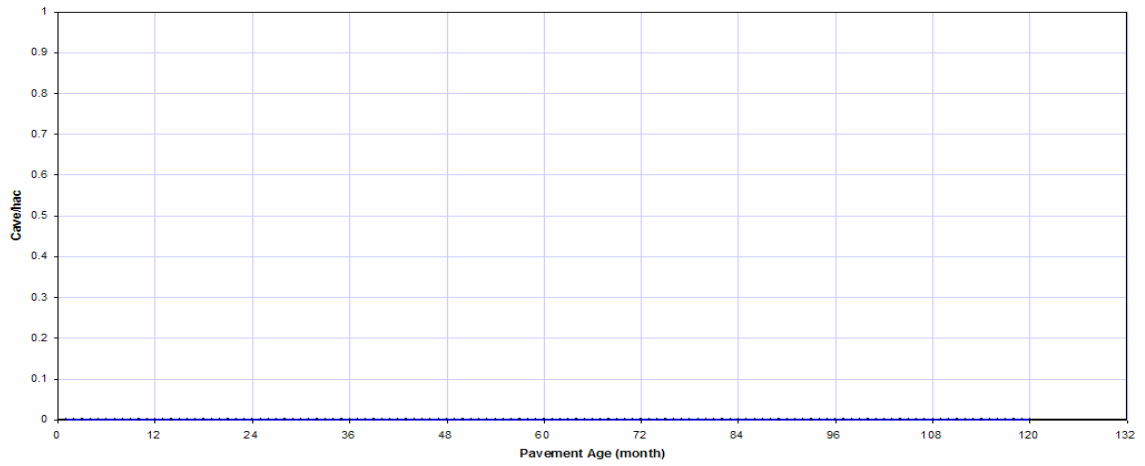
Parameters	Value
a	133.18
b	0.53483
c	0.053641
Hr.	500

### 5.4.1.7 Reportes

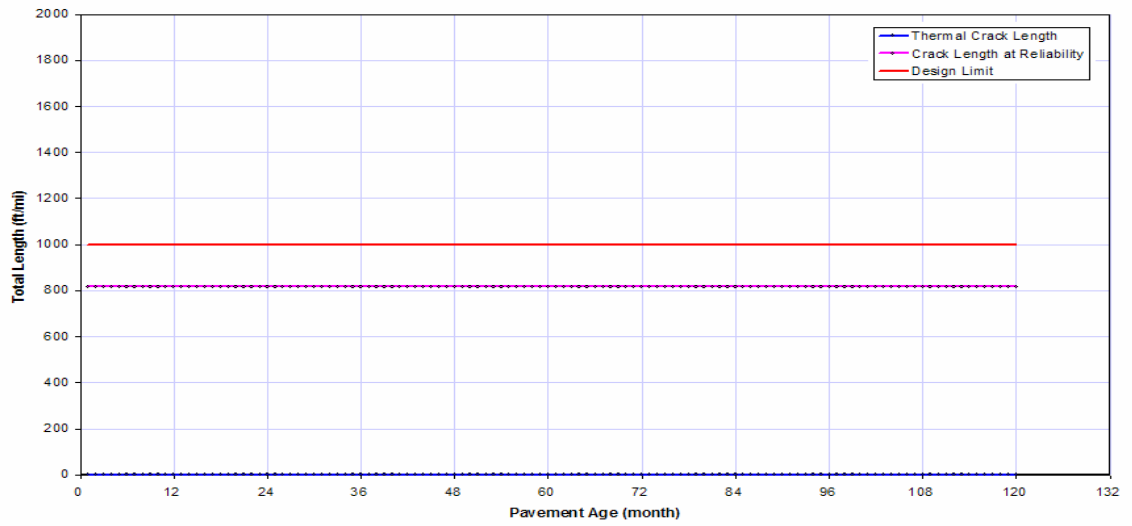




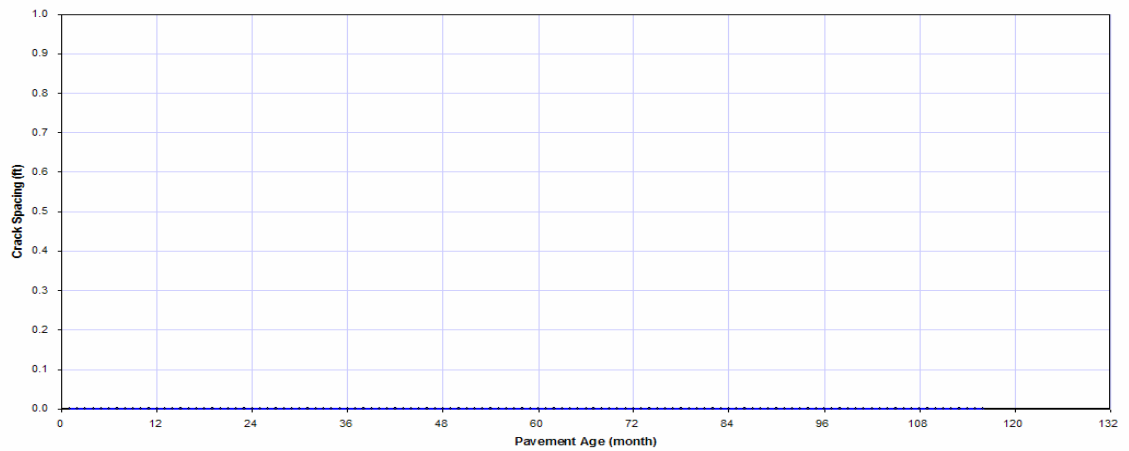
Thermal Cracking: Depth Ratio Vs Time

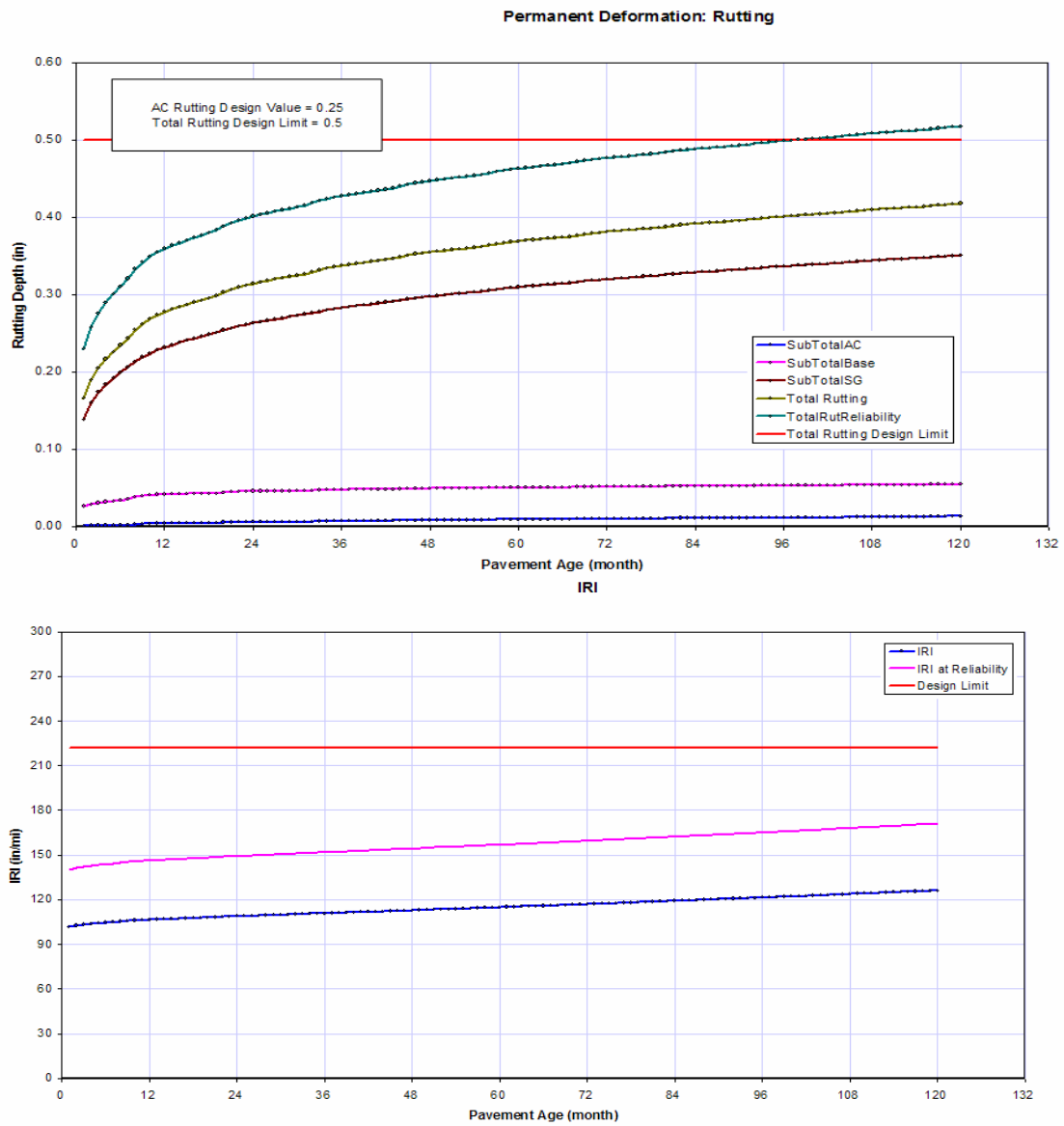


Thermal Cracking: Total Length Vs Time



Transverse Crack Spacing





### 5.4.1.8 Resumen alternativa 1, metodo AASHTO 1993

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

## 5.4.2 Resumen alternativa 2, metodo AASHTO 1993

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

## 5.4.3 Resumen alternativa 3, metodo AASHTO 1993

<b>Performance Criteria</b>	Distress Target	Reliability Target	Distress Predicted	Reliability Predicted	Acceptable
Terminal IRI (in/mi)	222	90	123.9	99.77	Pass
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) (ft/mile):	2000	90	0	99.999	Pass
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	25	90	0	99.999	Pass
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	1000	90	1	94.16	Pass
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture)	25	90			N/A
Permanent Deformation (AC Only) (in):	0.25	90	0.02	99.999	Pass
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	0.5	90	0.37	96.8	Pass

## 5.4.4 Resumen alternativa 4, metodo INVIAS

<b>Performance Criteria</b>	Distress Target	Reliability Target	Distress Predicted	Reliability Predicted	Acceptable
Terminal IRI (in/mi)	222	90	126.6	99.67	Pass
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) (ft/mile):	2000	90	0	99.999	Pass
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	25	90	0.6	99.999	Pass
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	1000	90	1	94.16	Pass
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture)	25	90			N/A
Permanent Deformation (AC Only) (in):	0.25	90	0.02	99.999	Pass
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	0.5	90	0.42	83.92	Fail

### 5.4.5 Resumen alternativa 5, metodo INVIAS

Performance Criteria	Distress Target	Reliability Target	Distress Predicted	Reliability Predicted	Acceptable
Terminal IRI (in/mi)	222	90	120	99.87	Pass
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) (ft/mile):	2000	90	0	99.999	Pass
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	25	90	0	99.999	Pass
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	1000	90	1	94.16	Pass
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture) Permanent Deformation (AC Only) (in):	0.25	90	0.01	99.999	Pass
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	0.5	90	0.27	99.99	Pass

### 5.4.6 Resumen alternativa 6, metodo INVIAS

Performance Criteria	Distress Target	Reliability Target	Distress Predicted	Reliability Predicted	Acceptable
Terminal IRI (in/mi)	222	90	120.4	99.86	Pass
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) (ft/mile):	2000	90	0	99.999	Pass
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	25	90	0	99.999	Pass
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	1000	90	1	94.16	Pass
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture) Permanent Deformation (AC Only) (in):	0.25	90	0.02	99.999	Pass
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	0.5	90	0.28	99.98	Pass

### 5.4.7 Comparación de los métodos

De los resultados obtenidos por las diferentes metodologías de diseño de pavimentos, se presenta un resumen de las revisiones o chequeos, de las estructuras de pavimentos, determinadas por las metodologías tradicionalmente utilizadas en nuestro país, con la actual metodología AASHTO 2002.

Tabla 5.20 Revisión de las estructuras de diseño metodología tradicional con la AASHTO 2002

CRITERIOS DE DESEMPEÑO AASHTO 2002	DETERIORO LIMITE	CONFIABILIDAD LIMITE (%)	REVISIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE DISEÑO METODOLOGÍA TRADICIONAL					
			ESTRUCTURAS AASHTO 1993					
			ALTERNATIVA 1		ALTERNATIVA 2		ALTERNATIVA 3	
			DETERIORO	CONFIABILIDAD (%)	DETERIORO	CONFIABILIDAD (%)	DETERIORO	CONFIABILIDAD (%)
IRI terminal (in/mi)	222	90	126.2	100	122.1	100	123.9	100
Agrietamiento del C.A de arriba hacia abajo (agriet long) (ft/mi)	2000	90	0	100	0	100	0	100
Agrietamiento del C.A de abajo hacia arriba (piel de cocodrilo) (%)	25	90	0.4	100	0.1	100	0	100
Fractura termica del C.A (agriet transversal) (ft/mi)	1000	90	1	94	1	94	1	94
Deformacion permanente (solo C.A) (in)	0.25	90	0.01	100	0.01	100	0.02	100
Deformacion permanente (pavimento total) (in)	0.50	90	0.42	86	0.32	100	0.37	97

CRITERIOS DE DESEMPEÑO AASHTO 2002	DETERIORO LIMITE	CONFIABILIDAD LIMITE (%)	REVISIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE DISEÑO METODOLOGÍA TRADICIONAL					
			ESTRUCTURAS INVIAS					
			ALTERNATIVA 4		ALTERNATIVA 5		ALTERNATIVA 6	
			DETERIORO	CONFIABILIDAD (%)	DETERIORO	CONFIABILIDAD (%)	DETERIORO	CONFIABILIDAD (%)
IRI terminal (in/mi)	222	90	126.6	100	120	100	120.4	100
Agrietamiento del C.A de arriba hacia abajo (agriet long) (ft/mi)	2000	90	0	100	0	100	0	100
Agrietamiento del C.A de abajo hacia arriba (piel de cocodrilo) (%)	25	90	0.6	100	0	100	0	100
Fractura termica del C.A (agriet transversal) (ft/mi)	1000	90	1	94	1	94	1	94
Deformacion permanente (solo C.A) (in)	0.25	90	0.02	100	0.01	100	0.02	100
Deformacion permanente (pavimento total) (in)	0.50	90	0.42	84	0.27	100	0.28	100

Como se puede notar las alternativas convencionales 1 y 4, correspondientes a las estructuras diseñadas por las metodologías AASHTO 1993 e INVIAS, no cumplen con los requisitos de deformación permanente total en la estructura de pavimento, por lo que se procedió determinar, las estructuras que garanticen estas solicitaciones, a través de iteraciones sucesivas, modificando o aumentando los espesores de la interface granular. Así definitivamente se determinaron las siguientes estructuras de diseño, ver tablas 5,21 y 5,22.

Tabla 5.21 Alternativas definitivas de diseño AASHTO 2002

CAPA	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
Carpeta asfáltica	18 cm	10 cm	10 cm
Base Asfáltica		15 cm	
Base Cementada			18 cm
Base Granular	20 cm	15 cm	15 cm
Subbase Granular	25 cm	20 cm	20 cm

CAPA	ALTERNATIVA 4	ALTERNATIVA 5	ALTERNATIVA 6
Carpeta asfáltica	15 cm	10 cm	15 cm
Base Asfáltica		20 cm	
Base Cementada			25 cm
Base Granular	25 cm		20 cm
Subbase Granular	45 cm	40 cm	

Tabla 5.22 Cuadro resumen alternativas de diseño definitivas AASHTO 2002

CRITERIOS DE DESEMPEÑO AASHTO 2002	DETERIORO LIMITE	CONFIABILIDAD LIMITE (%)	ESTRUCTURAS DEFINITIVAS DE DISEÑO AASHTO 2002					
			ESTRUCTURAS AASHTO 1993					
			ALTERNATIVA 1		ALTERNATIVA 2		ALTERNATIVA 3	
			DETERIORO	CONFIABILIDAD (%)	DETERIORO	CONFIABILIDAD (%)	DETERIORO	CONFIABILIDAD (%)
IRI terminal (in/mi)	222	90	125.5	100	122.1	100	123.9	100
Agrietamiento del C.A de arriba hacia abajo (agriet long) (ft/mi)	2000	90	0	100	0	100	0	100
Agrietamiento del C.A de abajo hacia arriba (piel de cocodrilo) (%)	25	90	0.3	100	0.1	100	0	100
Fractura termica del C.A (agriet transversal) (ft/mi)	1000	90	1	94	1	94	1	94
Deformacion permanente (solo C.A) (in)	0.25	90	0.01	100	0.01	100	0.02	100
Deformacion permanente (pavimento total) (in)	0.50	90	0.4	91	0.32	100	0.37	97

CRITERIOS DE DESEMPEÑO AASHTO 2002	DETERIORO LIMITE	CONFIABILIDAD LIMITE (%)	ESTRUCTURAS DEFINITIVAS DE DISEÑO AASHTO 2002					
			ESTRUCTURAS INVIAS					
			ALTERNATIVA 4		ALTERNATIVA 5		ALTERNATIVA 6	
			DETERIORO	CONFIABILIDAD (%)	DETERIORO	CONFIABILIDAD (%)	DETERIORO	CONFIABILIDAD (%)
IRI terminal (in/mi)	222	90	125.7	100	120	100	120.4	100
Agrietamiento del C.A de arriba hacia abajo (agriet long) (ft/mi)	2000	90	0	100	0	100	0	100
Agrietamiento del C.A de abajo hacia arriba (piel de cocodrilo) (%)	25	90	0.6	100	0	100	0	100
Fractura termica del C.A (agriet transversal) (ft/mi)	1000	90	1	94	1	94	1	94
Deformacion permanente (solo C.A) (in)	0.25	90	0.02	100	0.01	100	0.02	100
Deformacion permanente (pavimento total) (in)	0.50	90	0.4	90	0.27	100	0.28	100



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base al estudio realizado **Aplicación de la Guía de Diseño de Pavimentos Flexibles AASHTO 2002 a las Condiciones Colombianas**, y con el propósito de aprovechar en el país las innovaciones en el diseño de pavimentos, se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. La actual guía de diseño de pavimentos AASHTO 2002, que requiere mayor nivel y volumen de información, es posible utilizarla y aplicarla a las condiciones de nuestro país.
2. La variable tránsito para las condiciones de nuestro país, dentro del método, permite aplicarse en los tres niveles de información, gracias a los registros de tránsito existentes a nivel nacional.
3. La variable clima, que se hace intervenir de forma más detallada o profunda, es posible aplicarla en el Nivel 1 en nuestro país, gestionando la adquisición de los registros climáticos ante el IDEAM, para generar los archivos exigidos en la nueva guía, para las diferentes ciudades de Colombia.
4. El software ME-PDG es una gran herramienta, y no se justifica construir otro software.
5. El software ME-PDG es aplicable a todo tipo de estructuras de pavimentos.
6. El software ME-PDG calcula la modelación de una alternativa de diseño en 1 minuto / año del periodo de diseño.
7. El software ME-PDG permite fácilmente realizar sensibilizaciones de las alternativas de diseño de pavimentos.
8. Se elaboró una guía de alimentación del software ME-PDG, para facilitar el aprendizaje de la guía de diseño.
9. Las estructuras de aplicación utilizadas en este proyecto, diseñadas por las metodologías tradicionales en nuestro país, al verificarlas con la nueva guía AASHTO 2002, cumplen en su mayoría con los requerimientos de diseño; pero esto no se puede generalizar y por lo tanto se recomienda la aplicación de la nueva guía para cada proyecto.

10. Se recomienda comenzar con las tareas de calibración y validación de los modelos de deterioros de la Guía AASHTO 2002, para nuestras condiciones particulares.
11. Con este trabajo se ha logrado la actualización, profundización, conocimiento y aplicaciones del nuevo método de diseño para pavimentos flexibles AASHTO 2002, y se ha logrado que la Universidad del Cauca, incursione en estos nuevos avances de la Ingeniería de pavimentos, para difundirlos a nivel académico local y a nivel de la Ingeniería Nacional.

# **CAPITULO 7**

**BIBLIOGRAFÍA**

---

## BIBLIOGRAFÍA

[www.trb.org/mepdg](http://www.trb.org/mepdg)

[www.2002designguide.com](http://www.2002designguide.com)

[www.ct.gov/dot](http://www.ct.gov/dot)

NCHRP 1-37A. Mechanistic Mechanistic-Empirical Empirical Design Guide for Pavements Design Guide for Pavements, 2004.

AASHTO. Guide for Design of Pavement Structure, 1993.

GARNICA ANGUAS Paul, Métodos contemporáneos de diseño de pavimentos, diseño y análisis por métodos mecanicistas. Instituto Mexicano del Transporte IMT, 2005.

WAHR, Carlos Daniel. Diseños estructurales de pavimentos flexibles en la v región por métodos mecanicistas. Universidad Técnica Federico Santa María Departamento de Obras Civiles. 2005.

HUANG, Yang H. Pavement Análisis and Design. Second Edition.

MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras-Universidad Católica de Colombia: Santafé de Bogotá. 1997.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Manual de diseño de pavimentos para medios y altos volúmenes de tránsito. 2001.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. 2001.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. 1998.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma de ensayo de materiales de carretera. Instituto Nacional de Vías 1996.

BENAVIDES BASTIDAS, Carlos Alberto. Memorias de clase del curso de Pavimentos de la Universidad del Cauca, 2005.