

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



**METODOLOGIA PARA LA CALIBRACION DE LOS MODELOS DE
DETERIORO DE PAVIMENTOS GENERADOS POR EL PROGRAMA
HDM4**

PRESENTADO POR:

JAVIER ERNESTO ARGUETA MEJÍA

ELSA ELIDA CASTRO HERNÁNDEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE 2009

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ

SECRETARIO GENERAL :

LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIO :

ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR :

MSc. ING. FREDY FABRICIO ORELLANA CALDERÓN

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título

:

**METODOLOGIA PARA LA CALIBRACION DE LOS MODELOS DE
DETERIORO DE PAVIMENTOS GENERADOS POR EL PROGRAMA
HDM4**

Presentado por

:

**JAVIER ERNESTO ARGUETA MEJÍA
ELSA ELIDA CASTRO HERNÁNDEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores

:

Ing. Mauricio Ernesto Valencia
Ing. Jorge Oswaldo Rivera Flores
Ing. Carlos Antonio Quintanilla Rodríguez

San Salvador, Septiembre 2009

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA

ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES

ING. CARLOS ANTONIO QUINTANILLA RODRIGUEZ

DEDICATORIA

A DIOS, por regalarme la vida en más de una ocasión, por darme múltiples oportunidades maravillosas y por brindarme la dicha de un susurro de esperanza en momentos claves.

A MIS PADRES, porque a pesar de la distancia sentí su apoyo en cada momento. Por el amor incondicional y profundo, que es el motor de mis aspiraciones.

A MI TIA, por ser la guía y soporte necesario desde el momento en que emprendí este nuevo camino.

A MI HERMANO, por ser un ejemplo de profesionalismo y entrega al trabajo.

A MIS HERMANAS, por la compañía inmejorable que me brindaron y por la certeza de saber que estarán a mi lado siempre.

A MI AMIGA, por las sonrisas, los consejos y reconfortante compañía.

A MI AMIGO, por su apoyo, consejos y por las conversaciones sin límite de tiempo en un mismo lenguaje.

A MI COMPAÑERO, por su carisma y por haber aceptado embarcarse en este reto, logrando una dinámica que tuvo resultados satisfactorios.

A todos, humildemente, mi dedicatoria;

ELSA ELIDA CASTRO HERNANDEZ.

DEDICATORIA

A LA SANTISIMA TRINIDAD, A mi Padre Santo por demostrarme diariamente cuanto me amas, a mi Señor Jesucristo por enseñarme cual es el camino que debo de seguir, al Espíritu Santo por darme la fuerza que necesito para salir adelante en este arduo caminar y también gracias a mi Madre Santa la Virgen María por cubrirme siempre con su manto sagrado.

A MIS PADRES, porque siempre han sido una inspiración para mi, siempre han estado en los momentos en que mas los he necesitado, porque me demuestran cuanto me aman, y porque se que puedo contar con ustedes toda la vida, los amo y muchas gracias.

A MI HERMANO, Porque durante todos mis estudios fuiste mi compañero, fuiste mi mejor amigo, y me ayudaste cuando más lo necesitaba, me explicabas lo que no entendía y me regañabas cuando lo necesitaba, gracias hermano.

A MI NOVIA, Porque contigo he aprendido a amar, porque desde que te conocí me di cuenta que eras una excelente persona, y ahora que estamos juntos descubro que eres lo máximo, Gracias mi princesita linda por estar conmigo y apoyarme en todo.

A MI COMPAÑERA DE TESIS, Por enseñarme a trabajar de manera eficiente, y por ayudarme a finalizar de excelente manera mi carrera profesional.

Mi más sincero agradecimiento para todos los que de alguna manera me han ayudado a finalizar esta etapa de mi vida, que Dios los bendiga.

JAVIER ERNESTO ARGUETA MEJÍA

EN ESPECIAL AGRADECEMOS:

A NUESTRO ASESORES, Ing. Mauricio Ernesto Valencia, Ing. Jorge Oswaldo Flores e Ing. Carlos Antonio Quintanilla; por dedicarnos parte de su valioso tiempo, compartir sus conocimientos y experiencia, por ser las directrices para lograr la culminación satisfactoria de nuestro trabajo de graduación.

ING. MEDAD CEA, por la participación activa en el desarrollo de este trabajo de graduación, por su dedicación, tiempo; aportando invaluable conocimientos en el área de gestión vial.

DR. ING. MARCELO BUSTOS; Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña (EICAM), Argentina, por el gran aporte en la aclaración de conceptos básicos y por compartir con nosotros bibliografía e información de la amplia experiencia en el tema que se aborda en este trabajo.

INDICE

INTRODUCCIÓN	xix
CAPITULO I ANTEPROYECTO	22
1.1 Antecedentes	23
1.2 Planteamiento Del Problema	27
1.3 Objetivos	29
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	29
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	29
1.4 Alcances	30
1.5 Limitaciones	32
1.6 Justificaciones	33
CAPITULO II GENERALIDADES	34
2.1 Generalidades De Los Pavimentos	35
2.1.1 <i>Definición Actual De Pavimento</i>	35
2.1.2 <i>Elementos Que Conforman La Estructura De Un Pavimento</i>	35
2.2 Tipos De Pavimentos	40
2.2.1 <i>Pavimentos Flexibles</i>	42
2.2.2 <i>Pavimentos Rígidos</i>	45
2.3 Comportamiento De Los Pavimentos	48
2.3.1 <i>Concepto De Deterioro De Pavimentos</i>	48
2.3.2 <i>Etapa De Construcción</i>	48
2.3.3 <i>Etapa De Deterioro Lento Y Poco Visible</i>	49
2.3.4 <i>Etapa De Deterioro Acelerado Y De Quiebre</i>	49
2.3.5 <i>Etapa De Descomposición Total</i>	50

2.4 Tipología De Daños	52
2.4.1 <i>Tipología De Daños De Pavimentos Rígidos</i>	53
2.4.2 <i>Tipología De Daños De Pavimentos Flexibles</i>	70
2.5 Gestión De Pavimentos	86
2.5.1 <i>Niveles De La Gestión De Pavimentos</i>	88
2.6 Modelación De Deterioro De Pavimentos	91
2.6.1 <i>Teoría De Modelos De Deterioro</i>	91
2.6.2 <i>Clases Y Tipos De Modelos</i>	92
2.6.3 <i>Técnicas Para Desarrollar Modelos</i>	93
2.6.4 <i>Modelos De Deterioro De Primera Y Segunda Fase</i>	98
2.6.5 <i>Modelos De Deterioro Agregados E Incrementales</i>	99
CAPITULO III SISTEMAS DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS	102
3.1 Sistemas De Gestión De Pavimentos	103
3.1.1 <i>El SIGESVIES En La Gestión De Pavimentos</i>	107
3.1.2 <i>El HDM-4 En La Gestión De Pavimentos</i>	109
CAPITULO IV MODELOS DE DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS POR HDM-4	125
4.1 Modelos De Deterioro De Pavimentos En HDM-4	126
4.2 Factores Que Inciden En La Confiabilidad De Los Modelos De Deterioro	129
4.2.1 <i>Factores Climatológicos</i>	129
4.2.2 <i>Solicitaciones De Tránsito</i>	131
4.2.3 <i>Historial De Reparaciones</i>	133
4.2.4 <i>Diseño Geométrico</i>	134
4.2.5 <i>Características Estructurales Del Pavimento</i>	134
4.3 Tipos De Pavimentos Considerados	135

4.4 Modelos De Deterioros En HDM-4 Para Pavimentos Flexibles	136
4.4.1 Deterioros Superficiales.....	136
4.4.2 Deterioros Relacionados Con La Deformación Del Pavimento.....	136
4.4.3 Deterioros Relacionados Con La Textura Superficial.....	137
4.4.4 Procedimiento De Cálculo	138
4.5 Modelos De Deterioros En HDM-4 Para Pavimentos Rígidos.....	165
4.5.1 Procedimiento De Cálculo	167
4.5.2 Escalonamiento.....	173
4.5.3 Despostillamiento De Juntas Transversales (JPCP).....	176
4.5.4 Agrietamiento Transversal.....	178
4.5.5 IRI (Índice De Rugosidad Internacional).....	179
4.6 Sensibilidad De Los Modelos De Deterioro De HDM-4.....	181
4.6.1 Importancia De La Sensibilidad Del HDM-4.....	181
4.6.2 Trabajos Previos Relacionados Con La Sensibilidad	183
4.6.3 Datos De Entrada.....	189
CAPITULO V CALIBRACIÓN.....	191
5.1 Definición De Calibración	192
5.2 Limitaciones Y Aplicabilidad De La Calibración	193
5.3 Concepto De Confiabilidad	197
5.3.1 Precisión Y Sesgo.....	197
5.3.2 Factores De Corrección	200
5.3.3 Precisión En Los Datos De Entrada.....	201
5.3.4 Límites En Los Sesgos.....	203
5.3.5 Niveles De Calibración.....	204

5.3.6 Adaptación De Los Datos Al Modelo	209
CAPITULO VI METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN.....	212
6.1 Introducción A La Metodología De Calibración	213
6.2 Metodología De Ventanas.....	215
6.3 Definición De Las Variables Independientes.....	219
6.3.1 Definición De Variables Y Diseño Del Factorial Del Experimento	219
6.4 Metodología De Selección De Tramos Muestrales.....	221
6.4.1 Criterios Generales A Emplear.....	221
6.4.2 Recomendaciones Para Selección De Tramos Testigos.....	225
6.5 Conformación De La Base De Datos Para El Estudio.....	228
6.5.1 Medición Y Procesamiento De La Información De Deterioro	228
6.5.2 Metodología Estadística Para Recolectar Datos De Deterioro	230
6.5.3 Datos A Recolectar.....	234
6.5.4 Equipo.....	234
6.6 Metodología Estadística De Los Factores De Calibración Ki.....	240
6.7 Metodología De Calibración Para Los Modelos De Pavimentos De Concreto Asfáltico ..	245
6.7.1 Inicio De Agrietamiento	245
6.7.2 Progresión Del Agrietamiento	252
6.7.3 Progresión De Ahuellamiento	255
6.7.4 Desviación Estándar De Ahuellamiento.....	257
6.7.5 Progresión De Rugosidad.....	259
6.7.6 Macrotextura.....	266
6.7.7 Microtextura.....	268
6.7.8 Bache Iniciación Y Progresión.....	269

6.8 Metodología De Calibración Para Los Modelos Pavimentos De Concreto Hidráulico	272
6.8.1 Metodología De Cálculo De Factores De Calibración	272
6.8.2 Escalonamiento De Juntas Con Barras De Traspaso De Carga	273
6.8.3 Escalonamiento De Juntas Sin Barras De Traspaso De Carga	279
6.8.4 Agrietamiento Transversal.....	280
6.8.5 Despostillamiento De Juntas.....	283
6.8.6 Índice De Rugosidad Internacional (IRI)	285
CAPITULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	290
7.1 Conclusiones	291
7.2 Recomendaciones	297
BIBLIOGRAFIA	300

INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Clasificación por humedad.....	130
Tabla 4.2 Clasificación por temperatura.....	131
Tabla 4.3 Clasificación de los pavimentos en el HDM-4.....	135
Tabla 4.4 Coeficientes de resistencia de las capas de pavimento.....	141
Tabla 4.5 Coeficientes de número estructural ajustados al modelo.....	142
Tabla 4.6 Valores de exponente p para calcular SNP.....	143
Tabla 4.7 Valores de coeficientes por defecto para cociente estacional SNP.....	144
Tabla 4.8 Valores por defecto de coeficientes del modelo de desprendimiento de borde.....	150
Tabla 4.9 Valores por defecto para modelo de densificación inicial.....	153
Tabla 4.10 Valores por defecto de coeficientes para el modelo de deformación estructural.....	154
Tabla 4.11 Valores por defecto de coeficientes para el modelo de deformación plástica.....	156
Tabla 4.12 Valores prefijados para el coeficiente ambiental m	159
Tabla 4.13 Modelos de deterioro en HDM-4.....	166
Tabla 4.14 Valores típicos del coeficiente térmico del concreto.....	170
Tabla 4.15 Categorías definidas para el análisis de sensibilidad del HDM-4.....	183
Tabla 4.16 Resultados del análisis de sensibilidad del HDM-4, para modelos RDWE.....	184
Tabla 4.17 Casos analizados en el estudio exploratorio de sensibilidad del IMT.....	185
Tabla 4.18 Resultados obtenidos para modelos RDWE en estudio exploratorio de sensibilidad del IMT.....	186
Tabla 5.1 RUE datos de calibración y la jerarquía de las fuentes de recursos.....	207
Tabla 6.1 Factorial del experimento.....	224
Tabla 6.2 Factorial del experimento.....	224
Tabla 6.3 Matriz de Diseño mínima para las secciones de calibración.....	227

Tabla 6.4 Ejemplo de ubicación de rutas de análisis.....	228
Tabla 6.5 Información a incorporar en la base de datos ampliada.....	229
Tabla 6.6 Ejemplo Valores promedio de deterioro para subtramos y tramos de rutas nacionales.....	232
Tabla 6.7 Datos de tránsito para las rutas inspeccionadas.....	233
Tabla 6.8 Parámetros climáticos en ciudades cercanas a las rutas observadas.....	233
Tabla 6.9 Valores por defecto para el modelo de inicio de agrietamiento.....	248
Tabla 6.10 Coeficientes del Modelo de Progresión de Agrietamiento.....	253
Tabla 6.11 Coeficiente de rugosidad del medio ambiente “m” por las zonas climáticas.....	260
Tabla 6.12 Clasificación de la Humedad.....	260
Tabla 6.13 Clasificación de la Temperatura.....	261
Tabla 6.14 Valores de Parámetros calibrados para el Modelo Macrotextura.....	266
Tabla 6.15 Coeficientes de Iniciación bache.....	269
Tabla 6.16 Coeficientes de Ampliación bache.....	270
Tabla 6.17 Factor de calibración usado en pavimentos de concreto hidráulico JPCP.....	273
Tabla 6.18 Relación entre tiempo de drenaje y calidad de drenaje.....	276
Tabla 6.19 Valores recomendados de coeficiente de drenaje (Cd) para pavimentos de concreto hidráulico.....	276
Tabla 6.20 Matriz simplificada para coeficiente de drenaje (Cd) AASHTO modificada.....	276

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Evolución histórica del modelo HDM.....	26
Figura 2.1 Estructura típica de una sección de pavimento.....	39
Figura 2.2 Camino de Tierra.....	40
Figura 2.3 Camino de Piedra.....	41
Figura 2.4 Camino de Adoquines.....	41
Figura 2.5 Carretera de Concreto Asfáltico.....	41
Figura 2.6 Carretera de Concreto Hidráulico.....	42
Figura 2.7 Sección transversal de un pavimento flexible.....	43
Figura 2.8 Sección transversal de un pavimento rígido.....	46
Figura 2.9 Pavimento de concreto simple sin dovelas (JPCP).....	46
Figura 2.10 Pavimento de concreto simple con dovelas (JPCP).....	47
Figura 2.11 Pavimento de concreto con refuerzo discontinuo (JRCP).....	47
Figura 2.12 Pavimento de concreto con refuerzo continuo (CRCP).....	47
Figura 2.13 Deterioro de los pavimentos a través del tiempo [Caminos, Cepal].....	51
Figura 2.14 Fisura Longitudinal.....	53
Figura 2.15 Fisura Transversal o Diagonal.....	54
Figura 2.16 Fisura de Esquina.....	55
Figura 2.17 Losas Subdivididas.....	56
Figura 2.18 Fisuras en Bloque.....	57
Figura 2.19 Fisuras Inducidas.....	58
Figura 2.20 Levantamiento de Losas.....	59

Figura 2.21 Despostillamiento	60
Figura 2.22 Hundimiento	61
Figura 2.23 Peladura.....	62
Figura 2.24 Pulimiento de la Superficie	63
Figura 2.25 Descascaramiento y Fisuras capilares.....	64
Figura 2.26 Bache.....	65
Figura 2.27 Deficiencias en Material de Sello.....	66
Figura 2.28 Despostillamiento	67
Figura 2.29 Fisuras por Mal Funcionamiento de Juntas.....	68
Figura 2.30 Parchados y Reparaciones de Servicios Públicos.....	69
Figura 2.31 Fisuras Piel de Cocodrilo	70
Figura 2.32 Fisuras En Bloque.....	71
Figura 2.33 Fisuras En Arco	72
Figura 2.34 Fisura Transversal.....	73
Figura 2.35 Fisura Longitudinal.....	74
Figura 2.36 Fisura por Reflexión de Junta.....	75
Figura 2.37 Ahuellamiento.....	76
Figura 2.38 Corrimiento	77
Figura 2.39 Corrugación.....	78
Figura 2.40 Hinchamiento	79
Figura 2.41 Hundimiento	80
Figura 2.42 Bache.....	81

Figura 2.43 Peladura.....	82
Figura 2.44 Desintegración de Bordes.....	83
Figura 2.45 Exudación de Asfalto	84
Figura 2.46 Parchados y Reparaciones de Servicios Públicos.....	85
Figura 2.47 Procedimiento para la creación de un modelo de deterioro.....	92
Figura 2.48 Extrapolación lineal.....	94
Figura 2.49 Distribución de probabilidades	95
Figura 2.50 Esquema de deterioro de pavimentos de 1ª y 2ª fase.. ..	99
Figura 2.51 Diferencias entre modelos agregados e incrementales [Vidal, 1998]	101
Figura 3.1 El HDM-4 en la Gestión de Pavimentos.....	110
Figura 3.2 Arquitectura del sistema HDM-4 [Kerali, 2000].....	114
Figura 3.3 Evolución de los costos de la sociedad	115
Figura 3.4 Modelo de deterioro de carreteras.....	116
Figura 3.5 Costos totales de los usuarios.....	117
Figura 4.1 Interacción entre los modelos de deterioro del HDM-4 para Pavimentos Asfálticos.....	137
Figura 4.2 Procedimiento para la predicción de deterioro	138
Figura 4.3 Esquema de Escalonamiento de losas para pavimentos de concreto hidráulico JPCP.	173
Figura 4.4 Esquema de Despostillamiento de juntas (JPCP)	176
Figura 4.5 Esquema de agrietamiento transversal de losas de concreto hidráulico (JPCP).....	178
Figura 4.6 Esquema de progresión de deterioros en pavimentos.....	187
Figura 4.7 Impacto de los datos de entrada en la condición del pavimento.....	189
Figura 4.8 Piramide de niveles de importancia en los datos de entrada.....	189

Figura 5.1. Comparación entre curvas de deterioro calibradas, con sobrepredicción y con subpredicción	195
Figura 5.2 Ejemplo De Sesgo Y Precisión.....	199
Figura 5.3 Factores De Corrección.....	201
Figura 5.4 Sesgo En Los Datos De Muestra.....	202
Figura 5.5 Precisión En Los Datos De Muestra.....	202
Figura 5.6 Recursos y el tiempo necesarios para las calibraciones.	205
Figura 5.7 Efecto de la condición existente en provocar el mantenimiento.....	210
Figura 6.1 Metodología de Ventanas	216
Figura 6.2 Diagrama de metodología de calibración.....	222
Figura 6.3 Video Láser RST.....	235
Figura 6.4 Láser Portable.....	235
Figura 6.5 Grip T ester.....	236
Figura 6.6 FWD Kuab.....	236
Figura 6.7 Equipo Scrim	237
Figura 6.8 Minimización de cuadrados de las diferencias entre valores estimados y medidos.....	241
Figura 6.9 Diagrama conceptual de la metodología de calibración.....	244

INTRODUCCIÓN

La gestión de pavimentos constituye una de las funciones más importantes en las organizaciones operadoras de carreteras. Los sistemas de gestión de pavimentos son un conjunto de procedimientos y herramientas que tienen como propósito asistir a estas organizaciones en la aplicación sistemática de procesos relacionados con este aspecto. Entre las principales componentes de un sistema de gestión pueden mencionarse: un conjunto de programas de cómputo para la información requerida por el sistema; herramientas de análisis para la predicción del deterioro de pavimentos; evaluación económica de proyectos carreteros, y la formulación de programas.

El Modelo HDM-4 es una importante herramienta de análisis para la evaluación técnica y económica de Inversiones en construcción y conservación de redes de carreteras. Sucesor reciente del HDM -III presenta importantes novedades y mejoras respecto a la versión anterior que le hacen aplicable a redes de carreteras de cualquier nivel de tráfico. El funcionamiento de la herramienta se basa en un modelo de cálculo de las relaciones físicas y económicas derivadas de un extenso estudio sobre el deterioro de las carreteras, el efecto de la conservación de las mismas, y los costes de operación de los vehículos.

Las principales funciones del HDM-4 son el análisis de los deterioros y los efectos de la conservación de carreteras, para una serie de alternativas de conservación especificadas por el usuario de la aplicación. Para ello, calcula los costos de operación de los vehículos en función del estado de cada carretera, determina los costos anuales de la administración de carreteras y de

los usuarios para cada una de las alternativas de conservación definidas. Por último, se evalúan las alternativas de conservación, produciendo la comparación económica de las mismas. De esta manera el ingeniero dispone de una amplia información para determinar cuáles son las medidas de conservación más beneficiosas para la red estudiada.

Una de las características del HDM-4 es el número de parámetros de entrada, es decir, los modelos de deterioro son desarrollados con una data empírica determinada y bajo condiciones específicas de clima, tipo y forma, materiales, etc., al ser estos utilizados bajo condiciones distintas, pueden presentarse diferencias considerables entre los deterioros que el modelo predice y los que se observan en la realidad, para reducir estos errores ó para verificar si el modelo es inadecuado o incompleto, detectando posibles debilidades y limitaciones, los procedimientos de calibración o ajuste resultan muy útiles.

Sin embargo, el conocimiento del programa HDM-4 en el país es relativamente bajo, y es por eso que muchas instituciones están utilizando esta herramienta de forma parcial, y por consiguiente obteniendo una respuesta con alta probabilidad de resultados no apegados a la realidad de nuestras carreteras, por lo tanto este trabajo de investigación propone una metodología para calibrar los modelos de deterioro del programa HDM-4 para los tipos de pavimentos más utilizados en nuestro país como son concreto hidráulico con juntas (JPCP) y concreto asfáltico (mezcla en caliente), y poder así, presentar una plataforma de los requerimientos de calibración a las instituciones involucradas en la gestión vial a nivel nacional, y además proponer realizar la

primera calibración de los modelos del programa HDM-4, para optimizar los recursos en la gestión de la red vial a nivel nacional.

El presente documento está dividido en siete capítulos: Los aspectos generales en los que se fundamentó el desarrollo de la investigación, como el planteamiento del problema, objetivos, alcances, limitaciones y otros; se detallan en el Capítulo I.

En el Capítulo II se describen las generalidades de los pavimentos, es decir, se realiza una descripción detallada de los tipos de pavimentos, el comportamiento de éstos durante su ciclo de vida, se presenta la tipología de daños de los pavimentos, así como también se define lo que es gestión de pavimentos, y la modelación de los deterioros de los pavimentos. En el Capítulo III se definen los Sistemas de Gestión de pavimentos, tomando en consideración el SIGESVIES y el programa HDM-4. Y posteriormente en el Capítulo IV se presentan los modelos de deterioro para los pavimentos del programa HDM-4, así como también la importancia de la sensibilidad.

En el Capítulo V se define el término calibración, y se presentan cuales son las limitaciones que se tienen para poder calibrar y cual es la aplicabilidad de esta calibración, del mismo modo se presenta la importancia de la confiabilidad en los datos de entrada. En el Capítulo VI se presenta la metodología de calibración propuesta, tomando en consideración el equipo necesario para realizar la calibración, así como también las recomendaciones para la selección de tramos testigos y en el Capítulo VII, se presentan las Conclusiones y Recomendaciones que se desprenden del desarrollo de este trabajo de investigación.



CAPITULO I ***ANTEPROYECTO***

1.1. ANTECEDENTES

El primer paso para producir un modelo de evaluación de proyectos de carreteras lo dio en 1968 el Banco Mundial. El modelo inicial se produjo como respuesta a los términos de referencia para un estudio de diseño de carreteras producido por el Banco Mundial conjuntamente con el Laboratorio Británico de Investigación de Transportes y Caminos (TRRL, por sus siglas en inglés, Transport and Road Research Laboratory), con el objeto de examinar las interacciones entre costos de la obra y costos de operación de vehículos.

Posteriormente, el Laboratorio Británico de Investigación en Transporte y Caminos (TRRL), en colaboración con el Banco Mundial auspiciaron un importante estudio de campo en Kenia para investigar el deterioro de carreteras pavimentadas y no pavimentadas, así como los factores que afectan los costos de operación de los vehículos.

En los años subsecuentes se realizaron diversos estudios que proporcionaron nuevos conocimientos en relación con mecanismos de deterioro de carreteras; costos de operación vehicular; problemas de operación; efectos del diseño geométrico en los costos de operación, entre otros. Entre 1977 y 1983, el TRRL realizó otro estudio en países del Caribe, para investigar los efectos del diseño geométrico de las carreteras en los gastos de operación vehicular. En ese mismo periodo, el Instituto Central de Investigación en Carreteras de la India (*Central Road Research Institute, CRRI*), diseñó un estudio de problemas de operación de la red carretera de la

India, relacionados con caminos angostos y con la circulación de tránsito no motorizado en proporciones significativas.

Patrocinado por el *Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas (United Nations Development Program, UNDP)*, se realizó de 1975 a 1984 un nuevo estudio de campo de grandes proporciones; esta vez en Brasil, cuyos resultados junto con la información y experiencias previas. Paralelamente, se constituyó un modelo destinado a optimizar programas de mantenimiento de carreteras sujetos a restricciones presupuestales, el *modelo de presupuestos del gasto (Expenditure Budgeting Model, EBM)*. Estos resultados se integraron en el desarrollo del HDM III, el cual concluyó en 1984.

El Modelo de Estándares de Conservación de Diseño de Carreteras (Highway Design and Maintenance Standards Model, HDMIII), desarrollado por el Banco Mundial en 1987, se viene usando desde hace más de dos décadas para combinar la evaluación técnica y económica de proyectos, preparar programas de inversión y analizar estrategias de redes de carreteras.

Tanto el HDM-II como el HDM-III fueron concebidos originalmente para ejecutarse en computadoras tipo *mainframe*. Sin embargo, en 1989 el Banco Mundial presentó el HDM-PC, una versión del HDM-III para computadoras personales con sistema operativo MS-DOS. Al mismo tiempo comenzó a distribuirse el programa *modelo de costos de operación de vehículos (Vehicle Operating Costs Model, VOC)*, el cual permitía calcular los montos de operación vehicular con las mismas relaciones utilizadas por el HDM-III.

En 1994 se presentó el HDM-Q, una nueva versión del modelo que incorporaba las herramientas necesarias para estimar los beneficios económicos derivados de la ampliación de tramos con problemas de congestión, y en ese mismo año apareció el *administrador del HDM (HDM Manager o HDM-ADM)*, una interfaz de usuario basada en menús con la cual se trataba de facilitar el uso del HDM

Con este propósito, en 1997 se inició el Estudio Internacional sobre Desarrollo y Gestión de Carreteras (ISOHDM, por las siglas de *International Study of Highway Development and Management*), en el cual participaron organizaciones de diversos países; y en febrero del 2000 se anunció la terminación de la versión 1.0 del HDM-4.

El programa HDM4, es una herramienta computacional para la simulación, evaluación y gestión de pavimentos de concreto hidráulico y de concreto asfáltico, para que inversionistas y administradores en infraestructura vial, puedan evaluar simultáneamente pavimentos; superando así, las evaluaciones tradicionales de los proyectos, proporcionando un potente sistema para el análisis de la gestión de carreteras y de las alternativas de inversión.

Por su parte, la versión 2.0 se finalizó en junio del 2005 e incluye mejoras en rubros como: herramientas para realizar análisis de sensibilidad; análisis para diferentes escenarios de presupuestos y multicriterio; estimación de beneficios sociales y mejoras en el modelado de emisiones, entre otros. La figura 1.1: muestra la evolución histórica del modelo HDM.

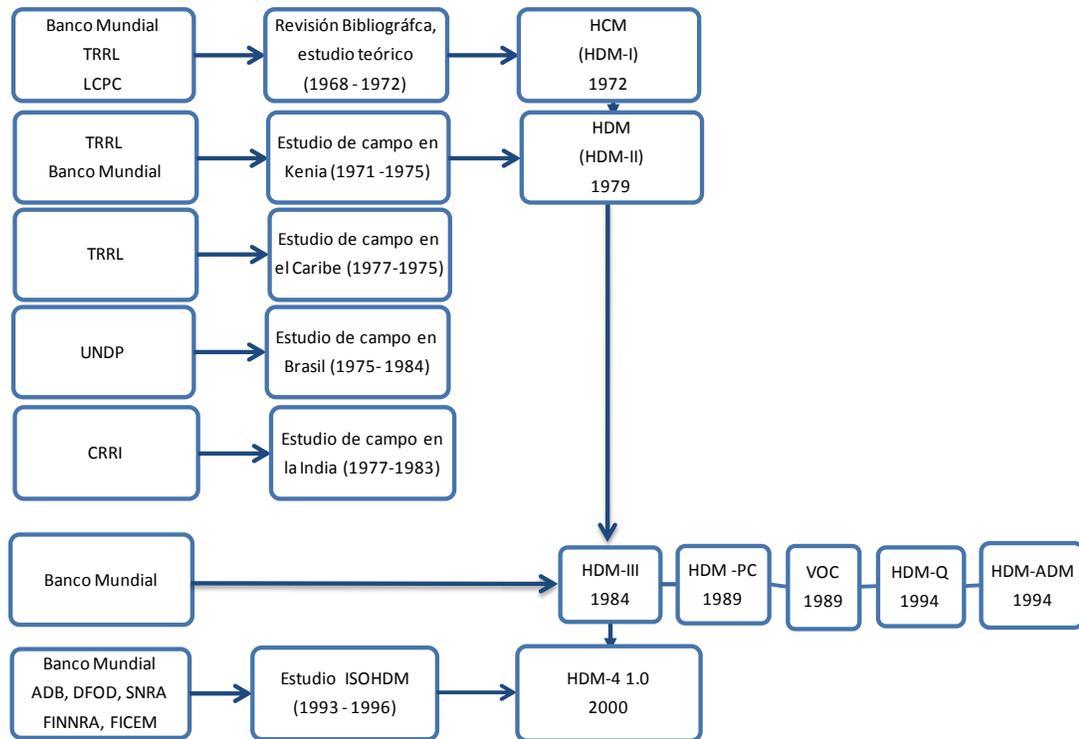


Figura 1.1: Evolución histórica del modelo HDM.

En nuestro país, actualmente, se utiliza el programa HDM4 para predecir el deterioro de la carretera CA-3 o Longitudinal del Norte, oficialmente; así como también, se ha utilizado para predecir el deterioro de proyectos viales aislados en los últimos 3 años, tales como: tramo San Martín- Desvío Ilopango (CA-1), tramo Zacatecoluca – Puente San Marcos (CA-2), San Francisco Javier – Taburete Claro y tramo Cinquera – Tejutepeque (estos dos últimos correspondientes a caminos no pavimentados); con la finalidad de realizar una evaluación económica con los datos obtenidos.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los modelos de deterioro son por lo general expresiones matemáticas que representan la evolución del estado del pavimento en el tiempo, en base al conocimiento de sus condiciones en el momento de la puesta en servicio y de la realización del análisis. Además permiten pronosticar el efecto de las actividades de mantenimiento a corto y largo plazo, con el objetivo de estimar con mayor precisión el momento de aplicación de actividades de conservación y conocer el nivel de deterioro resultante después de la misma y su progresión en el tiempo. Dichos modelos de deterioro, sirven como base para la creación de un Sistema de Gestión de Pavimentos.

Calibrar un modelo de deterioro consiste en definir un procedimiento de cálculo de factores de calibración numéricos, que modifican la predicción del modelo ajustándolo de acuerdo a la información provista por bases de datos de pavimentos de una región o país. Esto se realiza a través de la minimización de la diferencia entre las predicciones del modelo y un conjunto de datos de deterioro medidos en terreno.

Los modelos proporcionados por el programa HDM4, son los insumos para la posterior evaluación económica, el cual se basa en el ciclo de vida de la capa de rodadura (concreto hidráulico o asfáltico), y se aplica para predecir el deterioro del pavimento, efectos de las obras de reparación, efectos para los usuarios de la carretera, efectos socioeconómicos y medioambientales.

Si bien, en nuestro país se hace uso de herramientas como el programa HDM4, se utilizan valores por defecto de los mismos para el procesamiento de datos o corridas y sin la aplicación de un factor que permita el ajuste a nuestra situación real (situación ambiental, carga por tráfico, procesos constructivos, etc.). El usar un modelo calibrado contribuiría a una mejor proyección, consecuentemente, contribuiría a una reducción en los costos de construcción, operación y de mantenimiento.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- ✓ Establecer una plataforma de trabajo que permita la primera calibración de los modelos de deterioro de pavimentos de concreto hidráulico y concreto asfáltico, ajustados a parámetros locales, generados por el programa HDM4

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Determinar los insumos necesarios para la metodología de calibración de los modelos de deterioro generados por el programa HDM4, en pavimentos de concreto hidráulico y pavimentos de concreto asfáltico.
- ✓ Detectar las posibles debilidades y limitaciones que pueden resultar en el proceso de calibración de los modelos de deterioro generados por el programa HDM4.
- ✓ Brindar una guía fiable teórica para la calibración de los modelos de deterioro aplicables a nuestra realidad social y ambiental.
- ✓ Identificar el tipo de equipo a utilizar para la auscultación en campo para cada modelo de deterioro.
- ✓ Identificar el perfil idóneo de los especialistas que se requieren para la ejecución de la calibración de los modelos de deterioro.

1.4. ALCANCES

La investigación va enfocada a determinar una metodología para, posteriormente, lograr una primera calibración de los modelos de deterioro generados por el programa HDM4; y así, con dicha calibración, permitir el uso de los valores obtenidos por el programa mencionado, de forma confiable y con resultados ajustados, coherente a nuestra condición climática, condiciones de tránsito, etc.; lo que ayudaría a crear un sistema de gestión de pavimentos que se ajuste fielmente a las necesidades locales, tendiendo a la optimización de los recursos disponibles y minimizando los costos totales de operación del camino.

La metodología de calibración va enfocada a crear una plataforma de trabajo para los 2 tipos de pavimentos rígidos y flexibles más utilizados en nuestro país, como son concreto hidráulico con juntas (JPCP) y concreto asfáltico (mezcla en caliente), tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- ✓ No se pretende ningún tipo de auscultación en campo para la elaboración de este trabajo, ya que dichas actividades se realizaran en el proceso de la calibración en sí.
- ✓ No es propósito de esta investigación proponer tramos de evaluación para la calibración posterior, ya que esta depende del tiempo de rehabilitación de las vías; y aunque se recomienda ampliamente realizarla seguidamente a la conclusión del trabajo, no podemos afirmar que ocurra de tal forma.

La idea esencial de este trabajo de graduación es establecer la brecha y rumbo de trabajo para, seguidamente, ejecutar la primera calibración de los modelos de deterioro tanto de pavimentos de concreto hidráulico con juntas (JPCP) como concreto asfáltico (mezcla en caliente); para la cual es indispensable un grupo multidisciplinario especializado, ya sea extranjeros o un grupo integrado por profesionales nacionales y extranjeros. Así, pues, de forma teórica se brindarán los pasos, como también los tipos y formas de almacenamiento de datos para realizar dicha labor en nuestro país.

1.5. LIMITACIONES

- ✓ Puesto que no se ha realizado algún tipo de análisis del método para la calibración de modelos de deterioro generados por el programa HDM4 en nuestro país, se recopilará la mayor cantidad de información posible referente al tema con la cooperación del Ministerio de Obras Publicas (MOP) y el ISCYC (Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto); dando lugar a incertidumbre en el cambio de la apertura, que actualmente existe, por una mínima colaboración.

- ✓ Para este trabajo de investigación se utilizará el programa HDM4 con el que cuenta actualmente el ISCYC (Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto), por lo que la consulta al programa se verá limitada por la disposición de la empresa durante la realización del trabajo.

- ✓ Las acotaciones teóricas y análisis que se realicen estarán basadas en estudios similares y experiencias en el tema de países en los que ya se tiene un buen terreno ganado en esta área; lo que deja de lado la comprobación de dichos señalamientos, debido a que ésta es producto de un levantamiento de campo o auscultación, la cual está fuera de los alcances de este trabajo de investigación.

1.6. JUSTIFICACIONES

Los modelos de deterioro son desarrollados con una base de datos empíricamente determinados y bajo condiciones específicas de clima, tipo y forma, materiales, etc., al ser estos utilizados bajo condiciones distintas, pueden presentarse diferencias considerables entre los deterioros que el modelo predice y los que se observan en la realidad, para reducir estos errores ó para verificar si el modelo es inadecuado o incompleto, detectando posibles debilidades y limitaciones, los procedimientos de calibración o ajuste resultan muy útiles.

La metodología, permitirá llevar a cabo posteriormente la calibración, y ésta, mejorará la predicción por ajuste de los modelos de deterioro del programa HDM4, para la realidad de los pavimentos de nuestro país, y serán los valores ajustados los insumos para la creación de un Sistema de Gestión de Pavimento eficaz y eficiente.

CAPITULO II

GENERALIDADES

2.1 GENERALIDADES DE LOS PAVIMENTOS

2.1.1 DEFINICION ACTUAL DE PAVIMENTO

Un pavimento lo podemos definir como una estructura que se diseña y se forma mediante un conjunto de capas construidas sobre el suelo de fundación, con la finalidad de ser utilizado como una superficie apta para el libre tránsito de vehículos de tipo liviano, pesado y comercial; y donde la circulación se hace de manera rápida, confortable, segura y económica.

El número y el espesor de las diferentes capas que integran un pavimento varía según su tipo (rígido o flexible por ejemplo) y los resultados del diseño, pero el principio básico es el mismo.

2.1.2 ELEMENTOS QUE CONFORMAN LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO

La estructura de un pavimento se halla formada por diferentes capas las cuales son: la sub-rasante, sub-base, base, capa de rodamiento y sello; sin embargo, es necesario aclarar que no siempre se encontrarán todas las capas que se detallan. En tales casos, la ausencia de una o varias de ellas dependerá de factores como la capacidad de soporte del terreno de fundación, la clase de material a utilizarse, el tipo de pavimento, intensidad de tránsito, carga de diseño, etc.

2.1.2.1 *Suelo Soportante o Subrasante*

Es el suelo que sirve de fundación para todo el paquete estructural, se define como el suelo preparado y compactado para soportar la estructura del pavimento; es decir, que es el terreno de

cimentación del mismo. Puede ser también el suelo natural, pero si éste es deficiente se debe seleccionar un material con mejores propiedades.

Existen dos condiciones básicas que debe cumplir el suelo de soporte, y son:

1. Debe mantener el mayor valor posible de soporte, ya que entre más fuerte se considere ésta superficie menor será el costo de las capas superiores.
2. El movimiento diferencial vertical debe ser mínimo, de ésta forma las ondulaciones en la superficie serán menores y el rodamiento vehicular será más suave.

2.1.2.2 Sub-base

Es una capa de materiales pétreos de buena graduación construida sobre la sub-rasante, este elemento subyace a la capa base cuando esta es necesaria, como en el caso de los pavimentos flexibles. En el caso de los pavimentos rígidos, en ocasiones resulta conveniente colocar una sub-base cuando las especificaciones son más exigentes. Las funciones que ésta capa debe cumplir son:

- ✓ Atenuar o suavizar aquellas deformaciones perjudiciales para la sub-rasante, como por ejemplo los cambios volumétricos producidos por cambios de humedad, evitando que se reflejen en la superficie del pavimento.
- ✓ Lograr espesores menores de la capa base para pavimentos flexibles.
- ✓ Servir de drenaje al pavimento, esto quiere decir que debe ser capaz de desalojar el agua que se infiltra en la capa de rodadura.
- ✓ Transmitir los esfuerzos a la capa sub-rasante en forma adecuada.

- ✓ Reducir el costo del pavimento, ya que es una capa que por estar bajo la base, queda sujeta a esfuerzos menores y requiere de especificaciones menos rígidas.

2.1.2.3 Base

Constituye la capa intermedia entre la capa de rodamiento y la sub-base. Generalmente se usa en los pavimentos flexibles y se compone de materiales pétreos con buena distribución granulométrica. Entre sus funciones tenemos:

- ✓ Drenar el agua que se filtra a través de las carpetas y hombros.
- ✓ Resistir los cambios de temperatura, humedad y la desintegración por abrasión producida por el tránsito.
- ✓ Reducir los esfuerzos cortantes que se transmiten a las capas inferiores.
- ✓ Proveer suficiente resistencia para recibir la carga de la superficie arriba de ella, y transmitirla a un nivel de esfuerzo adecuado a la capa siguiente, que puede ser una sub-base o una sub-rasante.
- ✓ Función económica, permite reducir el espesor de la carpeta asfáltica, que es la más costosa.

Las bases se pueden clasificar en dos tipos:

- a) **Base Granular:** Los materiales empleados pueden ser grava o piedra triturada, suelo y arena; la estabilidad del material depende de su fricción interna y de su cohesión. Una base granular es un conjunto de agregados mezclados entre si, en donde una alta

fricción interna se consigue con agregados bien graduados, de forma irregular, y con una pequeña cantidad de finos limo – arenosos.

- b) **Base Estabilizada:** Suelo con cemento Portland, cal o asfalto, se recurre a ella por motivos de tipo económico, en los casos en que resulta más favorable recurrir al mejoramiento del suelo existente en el lugar, sin tener que transportar otros materiales desde grandes distancias. Como ejemplo de este tipo de bases podemos mencionar: Grava-Emulsión, Suelo-Emulsión, Suelo-Cemento, etc.

2.1.2.4 Capa de Rodamiento

Formada por una o varias capas que se colocan sobre la base, dichas capas consisten en materiales granulares con o sin liga, y por lo general son de concreto asfáltico o hidráulico. Este es el elemento del pavimento sobre el cual circulan directamente los vehículos y peatones. Las funciones que esta capa debe cumplir son:

- ✓ Recibir y absorber en primera instancia el peso de los vehículos que circulan sobre la vía.
- ✓ Minimizar sensiblemente los esfuerzos que se transmiten hacia la terracería.
- ✓ Si la rodadura posee un espesor mayor o igual a cinco centímetros, se considera que trabaja junto al resto de capas para soportar las cargas y distribuir los esfuerzos.
- ✓ Proveer una superficie estable para el tránsito, uniforme, prácticamente impermeable, con una textura y color convenientes y que a la vez sea capaz de resistir los efectos abrasivos del tráfico.

2.1.2.5 Sello

Se coloca en algunas ocasiones sobre la capa de rodadura y está formado por una mezcla bituminosa de asfalto o alquitrán. Sobre esta carpeta se coloca a veces, un riego de arena o chispa, y su función es la de lograr la impermeabilización de la capa de rodadura, a fin de evitar la infiltración de las aguas de lluvia.



Figura 2.1: Estructura típica de una sección de pavimento.

2. 2 TIPOS DE PAVIMENTOS

Hoy en día los pavimentos pueden clasificarse de dos formas:

- a) De acuerdo al material que compone su capa de rodadura y
- b) Según la forma en que la estructura de éstos atiende y transmite las cargas aplicadas sobre su superficie.

Según el material que compone su capa de rodadura los pavimentos pueden ser:

- ✓ Pavimentos de Tierra. (Figura 2.2)
- ✓ Pavimentos de Piedra. (Figura 2.3)
- ✓ Pavimentos de Adoquines. (Figura 2.4)
- ✓ Pavimentos de Concreto Hidráulico. (Figura 2.5)
- ✓ Pavimentos de Concreto Asfáltico. (Figura 2.6)



Figura 2.2 Camino de Tierra



Figura 2.3 Camino de Piedra



Figura 2.4 Calle de Adoquines



Figura 2.5 Carretera de Concreto Asfáltico



Figura 2.6 Carretera de Concreto Hidráulico

Por la forma en que la estructura del pavimento transmite las cargas aplicadas sobre él, éstos se pueden dividir en:

- ✓ Pavimentos Flexibles.
- ✓ Pavimentos Rígidos.

2.2.1 PAVIMENTOS FLEXIBLES

Una definición de uso común es la siguiente: “Un pavimento flexible es una estructura que mantiene un contacto íntimo con las cargas y las distribuye a la sub-rasante, su estabilidad depende del entrelazamiento de los agregados, de la fricción de las partículas y de la cohesión. De modo que los pavimentos flexibles comprenden en primer lugar, a aquellos que están formados por una serie de capas granulares, rematadas por una capa de rodamiento asfáltica de alta calidad y relativamente delgada, la cual es capaz de acomodarse a pequeñas deformaciones de las capas inferiores sin que su estructura se rompa. En este tipo de pavimentos la calidad de

los materiales utilizados en cada una de las capas aumenta conforme nos acercamos a la superficie, de modo de lograr una estructura competente ante las cargas esperadas y que a la vez resulte lo más económica posible.

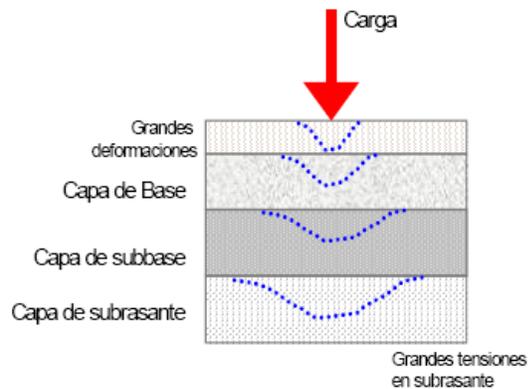


Figura 2.7: Sección transversal de un pavimento flexible.

El espesor de la capa de rodadura de un pavimento asfáltico varía grandemente, desde menos de 2.5 cm en los tratamientos superficiales usados en caminos de tránsito liviano, hasta 15 cm o más de concreto asfáltico usado en caminos destinados al tránsito pesado. La carpeta de rodadura asfáltica puede ser de cuatro tipos:

- 1) Mezcla asfáltica en caliente.
- 2) Mezcla asfáltica en frío.
- 3) Tratamiento superficial simple o múltiple.
- 4) Macadam Asfáltico

2.2.1.1 Mezcla Asfáltica en Caliente

Está compuesta por agregados gruesos y finos unidos mediante un ligante bituminoso, dichos materiales son procesados en plantas de mezclado especiales, donde son calentados, proporcionados y mezclados para lograr una adecuada homogeneidad.

2.2.1.2 Mezcla Asfáltica en Frío

En su elaboración se emplean los mismos materiales que en las mezclas en caliente, pero en éste caso pueden ser procesados a temperatura ambiente. En estas mezclas se pueden utilizar ligantes bituminosos con menor viscosidad que las mezclas en caliente, betunes fluidificados, alquitranes fluidos o emulsiones asfálticas. Las mezclas en frío pueden a su vez clasificarse como:

- ✓ Mezclas Abiertas
- ✓ Mezclas Densas

2.2.1.3 Tratamiento Superficial

Dentro de ésta categoría se tiene todas las aplicaciones de asfalto, con o sin agregados, que se hacen sobre cualquier camino de tierra o superficie de pavimento, y cuyo espesor por lo general es menor a una pulgada.

Los tratamientos superficiales sellan y sirven para prolongar la vida de los caminos, teniendo a la vez propósitos especiales según sea su tipo.

Entre los diversos tratamientos existentes podemos mencionar:

- ✓ Tratamiento superficial simple y múltiple.
- ✓ Tratamiento superficial con aplicación única de asfalto.
- ✓ Riego de imprimación.
- ✓ Riego antipolvo.
- ✓ Lechadas asfálticas.
- ✓ Microaglomerados en frío

2.2.2 PAVIMENTOS RIGIDOS

Comúnmente se emplea el término “pavimento rígido” para las superficies de rodamiento construidas con concreto de cemento Portland. Se supone que un pavimento construido con concreto hidráulico posee una considerable resistencia a la flexión, lo cual le permitirá trabajar como una viga tendiendo un puente sobre las pequeñas irregularidades de la sub-base o terracería sobre la cual descansa.

La capa de rodadura de éstos pavimentos la integran una serie de losas que trabajan en conjunto, distribuyendo las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores. Aunque algunas irregularidades menores en las capas de cimentación no se reflejen en la superficie, estas no son deseables, ya que pueden inducir una falla en el pavimento al ser la causa de cuarteaduras, fracturas, u otros defectos similares.

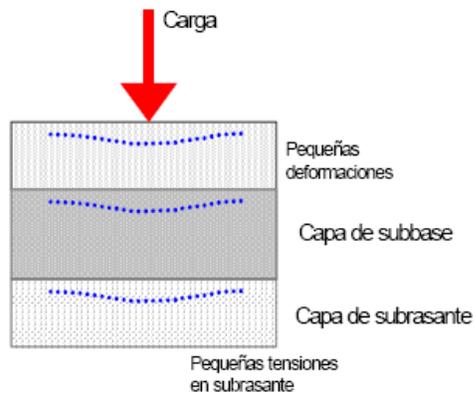


Figura 2.8: Sección transversal de un pavimento rígido.

En teoría, las losas de concreto hidráulico pueden colocarse sobre la sub-rasante, sin embargo, en la práctica es necesario construir una capa de sub-base para evitar que los finos sean bombeados hacia la superficie.

Los tipos de pavimentos rígidos son los siguientes:

- ✓ Pavimentos de concreto simple sin dovelas o barras de transferencia (JPCP).

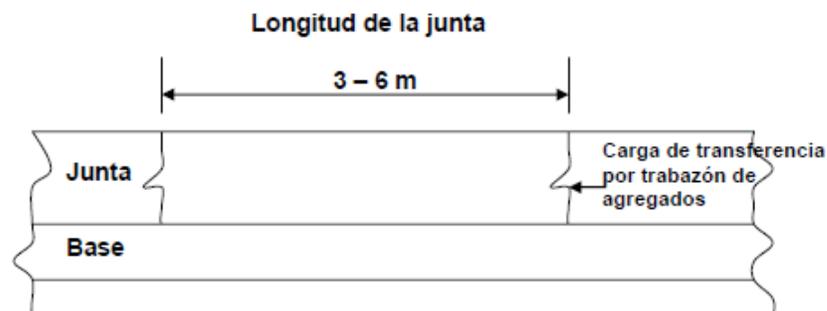


Figura 2.9: Pavimento de concreto simple sin dovelas (JPCP)

- ✓ Pavimentos de concreto simple con dovelas o barras de transferencia (JPCP).

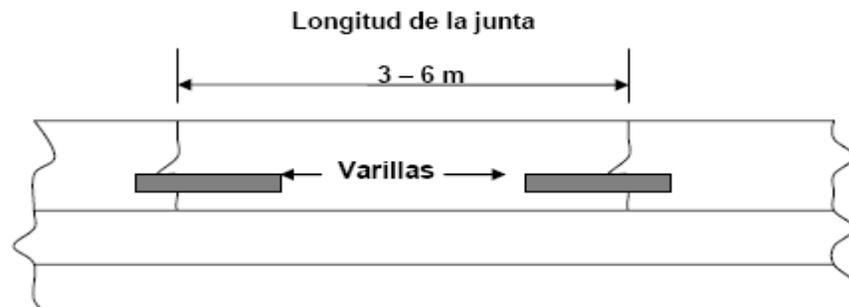


Figura 2.10: Pavimento de concreto simple con dovelas (JPCP)

- ✓ Pavimentos de concreto con refuerzo discontinuo distribuido sin función estructural (JRCP).

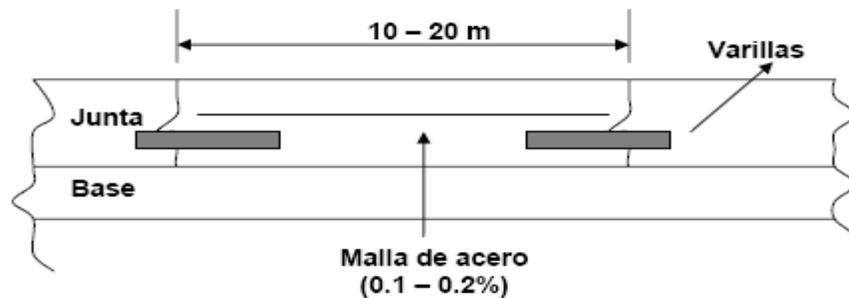


Figura 2.11: Pavimento de concreto con refuerzo discontinuo (JRCP)

- ✓ Pavimentos de concreto con refuerzo continuo sin función estructural (CRCP).

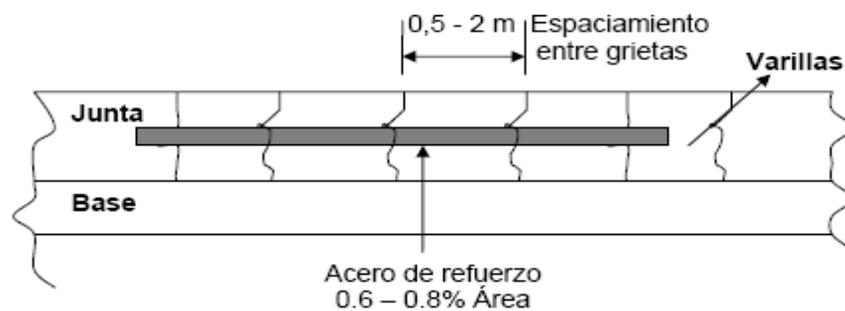


Figura 2.12: Pavimento de concreto con refuerzo continuo (CRCP).

2. 3 COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS

2.3.1 CONCEPTO DE DETERIORO DE PAVIMENTOS.

En Términos generales se entenderá por deterioro de pavimentos a una serie de manifestaciones superficiales de la capa de rodamiento, haciendo que la circulación vehicular sea menos segura, confortable y que los costos de operación sean mayores.

El comportamiento de los pavimentos a lo largo de su vida útil es regido generalmente por un ciclo, el cual ha llegado a considerarse como normal debido a la frecuencia con que se presenta, los indicadores (deterioros del pavimento) de cada una de las etapas de este ciclo son diferentes según el tipo de pavimento, sin embargo, la tendencia en la evolución de la estructura a través del tiempo es común y puede describirse de la siguiente manera:

2.3.2 ETAPA DE CONSTRUCCION

Un pavimento puede haber tenido una buena construcción o haber presentado algunos defectos durante esta etapa, o bien haber sido claramente deficientes tanto la etapa de diseño como la de ejecución. De cualquier forma, cuando la estructura entra en servicio, esta suele encontrarse en excelentes condiciones, satisfaciendo plenamente las necesidades de los usuarios.

2.3.3 ETAPA DE DETERIORO LENTO Y POCO VISIBLE

Durante algunos años, el pavimento experimenta un proceso de desgaste y debilitamiento lento, principalmente en la superficie de rodamiento y en menor medida en el resto de su estructura. Este desgaste es producido por los diversos tipos de vehículos que circulan sobre él, también por la influencia que ejercen otros factores como el clima, la radiación solar, el agua de lluvias, cambios de temperatura, etc. La calidad de la construcción inicial también incide en la evolución del deterioro.

A través de toda esta etapa el pavimento se mantiene aparentemente en buen estado y el usuario no percibe el desgaste. A pesar del aumento gradual de fallas menores aisladas, el camino sigue sirviendo bien a los usuarios y está en condiciones de ser conservado.

2.3.4 ETAPA DE DETERIORO ACELERADO Y DE QUIEBRE

Luego de varios años de uso, el pavimento entra en una etapa de deterioro acelerado y resiste cada vez menos el tránsito. Al inicio de esta etapa, la estructura básica del pavimento se conserva intacta y las fallas en la superficie son menores, por eso el usuario común tiene la impresión que este se mantiene aún bastante sólido. Sin embargo, no es así, ya que cada vez se pueden observar más daños en la superficie y comienza a deteriorarse la estructura básica, la cual no es visible.

Entonces, podemos asegurar que cuando en la superficie de un pavimento se detectan graves fallas a simple vista, la estructura básica del pavimento está seriamente dañada. Los daños al

inicio son puntuales, pero luego se van extendiendo en la mayor parte del pavimento, cuando esto ocurre la destrucción es acelerada; si no se interviene en algún momento durante esta etapa el pavimento llega al punto de quiebre en el cual se produce una falla generalizada, tanto en la superficie como en la estructura básica.

A medida que se desarrolla esta etapa, los vehículos circulan experimentando una cantidad creciente de molestias a causa de las irregularidades de la superficie, tales como: grietas, baches, depresiones y deformaciones.

2.3.5 ETAPA DE DESCOMPOSICION TOTAL

Constituye la última etapa de la existencia de un pavimento, y puede durar varios años, lo primero que se observa es la pérdida de la capa de rodadura, ya que cada vez que pasa un vehículo pesado se desprenden trozos de ésta, por lo que al final la vía termina siendo un camino de grava, y a la larga, de tierra. El paso de vehículos se dificulta, la velocidad promedio de circulación baja bruscamente y la capacidad del camino queda reducida en un gran porcentaje. Los vehículos comienzan a presentar daños en neumáticos, ejes, amortiguadores y en el chasis; los costos de operación vehicular suben de manera considerable y se incrementa la cantidad de accidentes graves. En esta última etapa llega un momento en que ya no pueden transitar los automóviles normales, sólo algunos camiones y vehículos todo terreno.

Como ya se dijo anteriormente, los detalles del ciclo de vida de los pavimentos varían dependiendo de su tipo, pero en general, el mensaje que debe atenderse es el mismo y consiste

en que las acciones de conservación de cualquier pavimento deben planificarse debidamente de modo que nunca se permita el deterioro excesivo o la destrucción de su estructura básica.

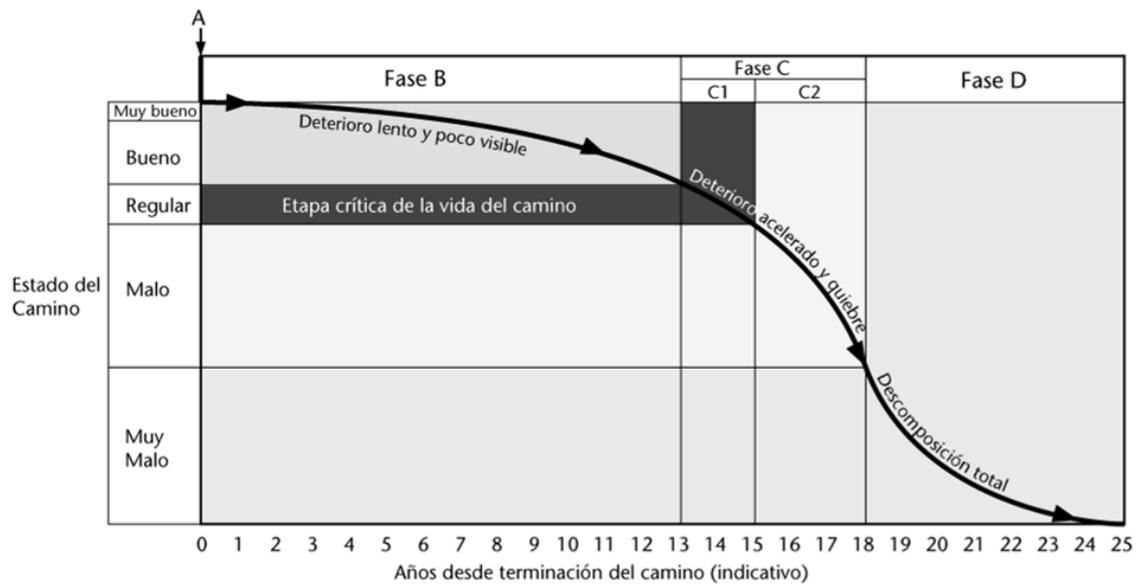


Figura 2.13: Deterioro de los pavimentos a través del tiempo [Camino, CEPAL]

2. 4 TIPOLOGIA DE DAÑOS

Los pavimentos fallan en modos diversos y por causas variadas, los daños más frecuentes dependen del tipo de estructura del pavimento, de los materiales empleados en su construcción y de las condiciones climáticas en las que la estructura se encuentra sometida. El agrietamiento por fatiga, la deformación longitudinal permanente que causa el aumento sostenido del IRI (Índice de Rugosidad Internacional), y el agrietamiento térmico, son los modos de fallo más frecuentes.

El Catalogo Centroamericano de Daños a Pavimentos Viales unifica la clasificación de daños en los pavimentos, utilizando una terminología común. Es frecuente que el mismo deterioro sea conocido con nombres diferentes a nivel regional, por lo que es necesario estandarizarlos a fin de ser identificados correctamente, por lo que es necesario recalcar que la tipología de daños expuesta en esta investigación a sido tomada del Catalogo Centroamericano de Daños a Pavimentos Viales, y se muestra a continuación:

2.4.1 TIPOLOGIA DE DAÑOS DE PAVIMENTOS RIGIDOS

2.4.1.1 FISURAS

2.4.1.1.1 *Fisura Longitudinal*

DESCRIPCION:

Fracturamiento de la losa que ocurre aproximadamente paralela al eje de la carretera, dividiendo la misma en dos planos.

POSIBLES CAUSAS:

Son causadas por la repetición de cargas pesadas, pérdida de soporte de la fundación, gradientes de tensiones originados por cambios de temperatura y humedad, o por las deficiencias en la ejecución de éstas y/o sus juntas longitudinales.

Con frecuencia la ausencia de juntas longitudinales y/o losas, con relación ancho / longitud excesiva, conducen también al desarrollo de fisuras longitudinales.



Figura 2.14 Fisura Longitudinal

2.4.1.1.2 *Fisura Transversal o Diagonal*

DESCRIPCION:

Fracturamiento de la losa que ocurre aproximadamente perpendicular al eje del pavimento, o en forma oblicua a este, dividiendo la misma en dos planos.

POSIBLES CAUSAS:

Son causadas por una combinación de los siguientes factores: excesivas repeticiones de cargas pesadas (fatiga), deficiente apoyo de las losas, asentamientos de la fundación, excesiva relación longitud / ancho de la losa o deficiencias en la ejecución de éstas. La ausencia de juntas transversales o bien losas con una relación longitud / ancho excesivos, conducen a fisuras transversales o diagonales, regularmente distribuidas o próximas al centro de las losas, respectivamente. Variaciones significativas en el espesor de las losas provocan también fisuras transversales.



Figura 2.15 Fisura Transversal o Diagonal

2.4.1.1.3 Fisura de Esquina

DESCRIPCION:

Es una fisura que intercepta la junta o borde que delimita la losa a una distancia menor de 1.30 m a cada lado medida desde la esquina. Las fisuras de esquina se extienden verticalmente a través de todo el espesor de la losa.

POSIBLES CAUSAS:

Son causadas por la repetición de cargas pesadas (fatiga de concreto) combinadas con la acción drenante, que debilita y erosiona el apoyo de la fundación, así como también por una deficiente transferencia de cargas a través de la junta, que favorece el que se produzcan altas deflexiones de esquina.

La presencia de arenas angulosas sueltas, muy próximas a la pista, hace que aumente la abrasión de las llantas que ascienden y descienden del pavimento, provocando peladuras severas que pueden conducir a la desintegración.



Figura 2.16 Fisura de Esquina

2.4.1.1.4 Losas Subdivididas

DESCRIPCION:

Fracturamiento de la losa de concreto conformando una malla amplia, combinando fisuras longitudinales, transversales y/o diagonales, subdividiendo la losa en cuatro o más planos. Se miden contando la cantidad total que existe en una sección muestra, en términos del número de losas afectadas según su severidad. Si se registro como de severidad mediana a alta, no se cuenta otros daños que pudieran evidenciar la losa. El registro se lleva separadamente para cada nivel de severidad.

POSIBLES CAUSAS:

Son originadas por la fatiga del concreto, provocadas por la repetición de elevadas cargas de tránsito y/o deficiente soporte de la fundación, que se traducen en una capacidad de soporte deficiente de la losa.

Cuando no se toman medidas preventivas o correctivas oportunas, las "Losas Subdivididas" se degeneran en "Fisuras en Bloque".



Figura 2.17 Losas Subdivididas

2.4.1.1.5 *Fisuras en Bloque*

DESCRIPCION:

Fracturamiento que subdividen generalmente una porción de la losa en planos o bloque pequeños de área inferior a 1 metro cuadrado.

POSIBLES CAUSAS:

Son causadas por la repetición de cargas pesadas (fatiga de concreto), el equivocado diseño estructural y las condiciones de soporte deficiente. Es la evolución final del proceso de fisuración, que comienza formando una malla más o menos cerrada; el tránsito y el continuo deflexionar de los planos aceleran la subdivisión en bloques más pequeños, favoreciendo el despostillamiento de sus bordes.

De no tomarse medidas correctivas el deterioro progresa formando a corto plazo un bache. Pueden presentar diversas formas y aspectos, pero con mayor frecuencia son delimitados por una junta y una fisura.



Figura 2.18 Fisuras en Bloque

2.4.1.1.6 *Fisuras Inducidas*

DESCRIPCION:

Se incluyen bajo esta denominación un conjunto de fisuras de forma errática cuyo desarrollo en el pavimento es indicado por factores relativos a una inadecuada distribución de juntas o inapropiada inserción de estructuras u otros elementos dentro de las losas.

POSIBLES CAUSAS:

Cuando el arreglo de juntas en un carril no es respetado en el carril contiguo, es muy probable que induzcan o reflejen en éste, fisuras que den continuidad a las juntas existentes. Esta situación se presenta también con frecuencia cuando se ejecutan parchados y el diseño de sus bordes o juntas, sus dimensionamientos o inclusive distancias mínimas o juntas existentes, no son respetadas; eventualmente este fisuramiento puede continuar subdividiendo los planos resultantes identificándose este caso particularmente como "Fisuras en Bloques", Fisuras alrededor de estructuras pueden inducirse cuando no se proveen elementos de aislamiento.



Figura 2.19 Fisuras Inducidas

2.4.1.2 DEFORMACIONES

2.4.1.2.1 *Levantamiento de Losas (Escalonamiento)*

DESCRIPCION:

Sobre-elevación abrupta de la superficie del pavimento, localizada generalmente en zonas contiguas a una junta o fisura transversal.

POSIBLES CAUSAS:

Son causadas por falta de libertad de expansión de las losas de concreto, las mismas que ocurren mayormente en la proximidad de las juntas transversales. La restricción a la expansión de las losas puede originar fuerzas de compresión considerables sobre el plano de la junta. Cuando estas fuerzas no son completamente perpendiculares al plano de la junta o son excéntricas a la sección de la misma, pueden ocasionar el levantamiento de las losas contiguas a las juntas, acompañados generalmente por la rotura de estas losas.



Figura 2.20 Levantamiento de Losas

2.4.1.2.2 Despostillamiento

DESCRIPCION:

Es una falla provocada por el tránsito en la que una losa del pavimento a un lado de una junta presenta un desnivel con respecto a una losa vecina; también puede manifestarse en correspondencia con fisuras.

Los Despostillamientos se miden contando y registrando separadamente según su severidad, la cantidad existente en una sección o muestra, generalmente en términos de número de losas afectadas

POSIBLES CAUSAS:

Es el resultado en parte del ascenso a través de la junta o grieta del material suelto proveniente de la capa inferior de la losa (en sentido de la circulación del tránsito) como también por depresión del extremo de la losa posterior, al disminuir el soporte de la fundación. Son manifestaciones del fenómeno de bombeo, cambios de volumen que sufren los suelos bajo la losa de concreto y de una deficiente transferencia de carga entre juntas.



Figura 2.21 Despostillamiento

2.4.1.2.3 *Hundimiento*

DESCRIPCION:

Depresión o descenso de la superficie del pavimento en un área localizada del mismo; puede estar acompañado de un fisuramiento significativo, debido al asentamiento del pavimento.

Los hundimientos se miden contando y registrando separadamente según su severidad, la cantidad existente en una sección o muestra.

POSIBLES CAUSAS:

Este tipo de deformación permanente del pavimento, con o sin agrietamiento puede ocurrir cuando se producen asentamiento o consolidación en la subrasante, por ejemplo, en terraplenes cuando existen condiciones muy desfavorables para la fundación, o bien en zonas contiguas a una estructura de drenaje o de retención donde puede ocurrir el asentamiento del material de relleno por deficiente compactación inicial o bien por movimiento de la propia estructura. También pueden ser originadas por deficiencias durante el proceso de construcción de las losas.



Figura 2.22 Hundimiento

2.4.1.3 DESINTEGRACIONES

2.4.1.3.1 *Peladura*

DESCRIPCION:

Progresiva desintegración de la superficie del pavimento por pérdida de material fino desprendido de matriz arena-cemento del concreto, provocando una superficie de rodamiento rugosa y eventualmente pequeñas cavidades.

Se miden en términos de losas afectadas. Una vez identificada la severidad de la falla, se registra como una losa con su grado de severidad correspondiente. Se totaliza el número de losas afectadas en la muestra o sección para cada nivel de severidad.

POSIBLES CAUSAS:

Son causadas por el efecto abrasivo del tránsito sobre concretos de calidad pobre, ya sea por el empleo de dosificaciones inadecuadas (bajo contenido de cemento, exceso de agua, agregados de inapropiada granulometría), o bien por deficiencias durante su ejecución (segregación de la mezcla, insuficiente densificación, curado defectuoso, etc.).



Figura 2.23 Peladura

2.4.1.3.2 Pulimiento de la Superficie

DESCRIPCION:

Superficie de rodamiento excesivamente lisa por efecto del pulimiento de los agregados que la componen.

POSIBLES CAUSAS:

Esta deficiencia es causada principalmente por el tránsito, el mismo que produce el desgaste superficial de los agregados de naturaleza degradable, particularmente cuando el concreto es de calidad pobre y favorece la exposición de los mismos. Cuando el agregado en la superficie favorece la exposición de los mismos. Cuando el agregado en la superficie llega a ser muy suave al tacto, la adherencia con las llantas de los vehículos se reduce considerablemente. La reducción de la fricción o resistencia al deslizamiento, puede alcanzar niveles de riesgo para la seguridad del tránsito. El pulimiento de los agregados puede ser considerado cuando un examen de cerca revela que el número de contactos con el agregado sobre la superficie es muy reducido y este presenta una superficie suave al tacto.



Figura 2.24 Pulimiento de la Superficie

2.4.1.3.3 Descascaramiento y Fisuras Capilares

DESCRIPCION:

Descascaramiento es la rotura de la superficie de la losa hasta una profundidad del orden de 5 a 15 mm, por desprendimiento de pequeños trozos de concreto. Por fisuras capilares se refiere a una malla o red de fisuras superficiales muy finas, que se extiende solo a la superficie del concreto. Las mismas que tienden a interceptarse en ángulos de 120°.

POSIBLES CAUSAS:

Las fisuras capilares generalmente son consecuencia de un exceso de acabado del concreto fresco colocado, produciendo la exudación del mortero y agua, dando lugar a que la superficie del concreto resulte muy débil frente a la retracción. Las fisuras capilares pueden evolucionar en muchos casos por efecto del tránsito, dando origen al descascaramiento de la superficie, posibilitando un desconchado que progresa tanto en profundidad como en área. También pueden observarse manifestaciones de descascaramiento en pavimentos de concreto armado, cuando las armaduras se colocan muy próximas a la superficie.



Figura 2.25 Descascaramiento y Fisuras capilares

2.4.1.3.4 *Bache*

DESCRIPCION:

Descomposición o desintegración la losa de concreto y su remoción en una cierta área, formando una cavidad de bordes irregulares. Los baches descubiertos pueden medirse alternativamente: a) Contando el número de baches por cada nivel de severidad y registrando estos separadamente, y b) Computando éstos en metros cuadrados de superficie afectada, registrando separadamente las áreas, según su nivel de severidad.

POSIBLES CAUSAS:

Los baches se producen por conjunción de varias causas: fundaciones y capas inferiores inestables; espesores del pavimento estructuralmente insuficientes; defectos constructivos; retención de agua en zonas hundidas y/o fisuradas. La acción abrasiva del tránsito sobre sectores localizados de mayor debilidad del pavimento o sobre áreas en las que se han desarrollado fisuras en bloque, que han alcanzado un alto nivel de severidad, provoca la desintegración y posterior remoción de parte de la superficie del pavimento, originando un bache.



Figura 2.26 Bache

2.4.1.4 DEFICIENCIA DE JUNTAS

2.4.1.4.1 *Deficiencias en Material de Sello*

DESCRIPCION:

Se refiere a cualquier condición que posibilite la acumulación de material en las juntas o permita una significativa infiltración de agua. La acumulación de material incompresible impide el movimiento de la losa, posibilitando que se produzcan fallas, como levantamiento o despostillamientos de juntas.

POSIBLES CAUSAS:

Las causas más frecuentes para que el material de sello sea deficiente, son: Endurecimiento por oxidación del material de sello, pérdida de adherencia con los bordes de las losas, levantamiento del material de sello por efecto del tránsito y movimientos de las losas, escasez o ausencia del material de sello, material de sello inadecuado.



Figura 2.27 Deficiencias en Material de Sello

2.4.1.4.2 Despostillamiento

DESCRIPCION:

Rotura, fracturación o desintegración de los bordes de las losas dentro de los 0.60 m de una junta o una esquina y generalmente no se extiende más allá de esa distancia. Además no se extiende verticalmente a través de la losa sino que intersectan la junta en ángulo

POSIBLES CAUSAS:

Los despostillamientos se producen como consecuencia de diversos factores que pueden actuar aislada o combinadamente; excesivas tensiones en las juntas ocasionadas por las cargas del tránsito y/o por infiltración de materiales incompresibles; debilidad del concreto en la proximidad de la junta debido a un sobre acabado y excesiva disturbación durante la ejecución de la junta; deficiente diseño y/o construcción de los sistemas de transferencia de carga de la junta; acumulación de agua a nivel de las juntas.



Figura 2.28 Despostillamiento

2.4.1.4.3 Fisuras por Mal Funcionamiento de Juntas

DESCRIPCION:

Fisuras sinuosas aproximadamente paralelas a la junta, en algunos casos transversalmente y en forma de arcos erráticos, localizados muy próximas a las mismas.

POSIBLES CAUSAS:

La falta de verticalidad y la inadecuada inserción de los elementos empleados para inducir el corte de la junta, cortes poco profundos, excesiva disturbación durante la ejecución de las juntas son algunas causas frecuentes que provocan una fisura paralela muy próxima a las mismas (doble junta).

Típicamente, la colocación de barras pasadores mal alineados, el empleo de barras de insuficiente diámetro y/o longitud, o bien la corrosión de éstas, impiden el movimiento normal de las juntas, provocando fisuras próximas a la junta transversal, a una distancia de 0.20 m a 0.40 m



Figura 2.29 Fisuras por Mal Funcionamiento de Juntas

2.4.1.5 OTROS DETERIOROS

2.4.1.5.1 *Parchados y Reparaciones de Servicios Públicos*

DESCRIPCION:

Un parche es un área donde el pavimento original ha sido removido y reemplazado, ya sea con un material similar o eventualmente diferente, para reparar el pavimento existente, también un parchado por reparación de servicios públicos es un parche que se ha ejecutado para permitir la instalación o mantenimiento de algún tipo de servicio público subterráneo.

Los parchados disminuyen la servicialidad de la pista, al tiempo que pueden constituir indicadores, tanto de la intensidad de mantenimiento demandado por una carretera, como la necesidad de reforzar la estructura de la misma.

En muchos casos, los parchados, por deficiente ejecución dan origen a nuevas fallas. Si bien los parches por reparaciones en servicios públicos se deben a causas bien diferentes, los niveles de severidad se definen en forma idéntica.



Figura 2.30 Parchados y Reparaciones de Servicios Públicos

2.4.2 TIPOLOGIA DE DAÑOS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

2.4.2.1 FISURAS Y GRIETAS

2.4.2.1.1 *Fisura Piel de Cocodrilo*

DESCRIPCION:

Serie de fisuras interconectadas formando pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos, generalmente con un diámetro promedio menor a 30 cm. El fisuramiento empieza en la parte inferior de las capas asfálticas.

POSIBLES CAUSAS:

Son causadas por la fatiga que sufren las capas asfálticas al ser sometidas a las cargas repetidas del tránsito. Por lo general, el fisuramiento indica que el pavimento ya no tiene capacidad estructural de sostener las cargas de tránsito y ha llegado al fin de su vida útil. El ligante por lo general ha envejecido y por ende ha perdido la flexibilidad de sostener cargas repetidas al tránsito sin agrietarse.



Figura 2.31 Fisuras Piel de Cocodrilo

2.4.2.1.2 *Fisura en Bloque*

DESCRIPCION:

Serie de fisuras interconectadas formando piezas aproximadamente rectangulares, de diámetro promedio mayor de 30 cm, con un área variable de 0.10 a 9.0 m². La fisura en bloque se presenta normalmente en una gran área del pavimento y algunas veces ocurren solamente en las áreas no afectadas por el tráfico.

POSIBLES CAUSAS:

Son causadas principalmente por la contracción de las mezclas asfálticas debido a las variaciones diarias de temperatura. También suelen ocurrir en pavimentos bituminosos colocados sobre bases granulares estabilizadas o mejoradas con cemento portland, que se producen a raíz de la contracción eventual de la capa estabilizada, que se reflejan en la superficie del pavimento. A menudo es difícil constatar si las fisuras y grietas son debido a contracciones producidas en la capa de rodadura o en la base y sub-base. La ausencia de tráfico tiende a acelerar la formación de estas grietas de contracción.



Figura 2.32 Fisuras En Bloque

2.4.2.1.3 *Fisura En Arco*

DESCRIPCION:

Son fisuras en forma de media luna (o más precisamente de cuarto creciente) que apuntan en la dirección de las fuerzas de tracción de las ruedas sobre el pavimento. Las fisuras en arco no necesariamente apuntan en el sentido del tránsito.

POSIBLES CAUSAS:

Se producen cuando los efectos de frenado o giro de las ruedas de los vehículos provocan un resbalamiento y deformación de la superficie de pavimento. Esto ocurre generalmente cuando se combinan una mezcla asfáltica de baja estabilidad y una deficiente adherencia entre la superficie y la siguiente capa de la estructura del pavimento. La falta de riego de liga, un exceso de ligante o la presencia de polvo durante la ejecución de los riegos, son factores que con frecuencia conducen a tales fallas. Asimismo, espesores de carpeta muy reducidos sobre superficies pulidas, especialmente sobre pavimentos de concreto, suelen ser causas primarias en muchos casos.



Figura 2.33 Fisuras En Arco

2.4.2.1.4 *Fisura Transversal*

DESCRIPCION:

Fracturación de longitud variable que se extiende a través de la superficie del pavimento, formando un ángulo aproximadamente recto con el eje de la carretera. Puede afectar todo el ancho del carril como limitarse a los 0.60 m próximos al borde del pavimento.

POSIBLES CAUSAS:

Las posibles causas incluyen:

- ✓ Contracción de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad, debido a un exceso de filler, envejecimiento asfáltico, etc. Particularmente ante la baja temperatura y gradientes térmicos importantes.
- ✓ Reflexión de grietas en la capa subyacente, incluyendo pavimentos de concreto, con excepción de la reflexión de sus juntas.
- ✓ Defectuosa ejecución de las juntas transversales de construcción de las capas asfálticas de superficie.

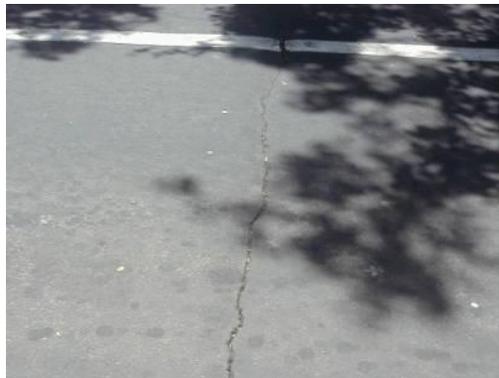


Figura 2.34 Fisura Transversal

2.4.2.1.5 *Fisura Longitudinal*

DESCRIPCION:

Fracturación que se extiende a través de la superficie del pavimento, paralelamente al eje de la carretera, pudiendo localizarse en las huellas de canalización de tránsito, en el eje o en los bordes del pavimento. La ubicación de la fisura es indicativa de la causa más probable.

POSIBLES CAUSAS:

Las posibles causas incluyen

- ✓ Instancias iniciales del fenómeno de fatiga por debilidad estructural, ocurren en las huellas de canalización del tránsito.
- ✓ Defectuosa ejecución de las juntas longitudinales de construcción, al distribuir las mezclas asfálticas durante la construcción; ocurren en el eje y coincidencia con los carriles de distribución y ensanches.
- ✓ Contracción de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad, particularmente ante gradientes térmicos importantes.



Figura 2.35 Fisura Longitudinal

2.4.2.1.6 *Fisura por Reflexión de Junta*

DESCRIPCION:

Se presentan sólo en pavimentos mixtos constituidos por una superficie asfáltica sobre un pavimento de concreto con juntas. Consiste en la propagación ascendente hacia la superficie asfáltica, de las juntas del pavimento de concreto. Como consecuencia, por efecto de la reflexión, se observan en la superficie fisuras longitudinales y/o transversales que tienden a reproducir las juntas longitudinales y transversales de las losas inferiores.

POSIBLES CAUSAS:

Son causadas principalmente por el movimiento de las losas de concreto, como resultado de cambios de temperaturas o cambios en los contenidos de humedad. Las grietas por reflexión se propagan dentro de la capa asfáltica, como consecuencia directa de una concentración de tensiones; asimismo, si por la aplicación de las cargas de tránsito las losas experimentan deflexiones verticales importantes en las juntas, la reflexión se produce con mayor rapidez.



Figura 2.36 Fisura por Reflexión de Junta

2.4.2.2 DEFORMACIONES SUPERFICIALES

2.4.2.2.1 *Ahuellamiento*

DESCRIPCION:

Depresión longitudinal continúa a lo largo del rodamiento del tránsito, de longitud mínima de 6 m.

POSIBLES CAUSAS:

Las repeticiones de las cargas de tránsito conducen a deformaciones permanentes en cualquiera de las capas del pavimento o en la subrasante. Cuando el radio de influencia de la zona ahuellada es pequeño, las deformaciones ocurren en las capas superiores del pavimento; cuando el radio de influencia es amplio, las deformaciones ocurren en la subrasante. Las deformaciones resultan de una compactación o movimiento lateral de los materiales (fluencia plástica o punzonamiento por corte), ambos por efecto de tránsito.

El ahuellamiento indica una insuficiencia estructural del pavimento o una deficiente estabilidad del sistema subrasante-pavimento.



Figura 2.37 Ahuellamiento

2.4.2.2.2 Corrimiento

DESCRIPCION:

Distorsiones de la superficie del pavimento por desplazamiento de la mezcla asfáltica, a veces acompañados por levantamientos de material formando "cordones", principalmente laterales, o bien por desplazamiento de la capa asfáltica sobre la superficie subyacente, generalmente acompañada de un levantamiento hacia el eje de la carretera. Típicamente puede identificarse a través de la señalización horizontal del pavimento, observando demarcación de los carriles, por efecto de corrimiento.

POSIBLES CAUSAS:

Los desplazamientos son ocasionados por las cargas del tránsito, actuando sobre mezclas asfálticas poco estables, ya sea por exceso de asfalto, falta de vacíos, o bien, por falta de confinamiento lateral. La inadecuada ejecución del riego de liga o imprimación no permite una adecuada adherencia entre la capa asfáltica de rodadura y la subyacente, originando mayor posibilidad de corrimiento.

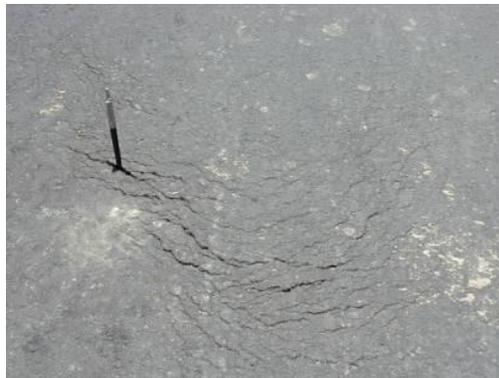


Figura 2.38 Corrimiento

2.4.2.2.3 *Corrugación*

DESCRIPCION:

Serie de ondulaciones, constituidas por crestas y depresiones, perpendiculares a la dirección del tránsito, las cuales se suceden muy próximas unas de otras, a intervalos aproximadamente regulares, en general menor de 1.00 m entre ellas, a lo largo del pavimento.

Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano, Alto) según la siguiente guía:

- B (Bajo) Causa cierta vibración en el vehículo, sin llegar a generar incomodidad.
- M (Mediano) Causa una significativa vibración en el vehículo, que genera cierta incomodidad.
- A (Alto) Causa una vibración excesiva y continua en el vehículo, que genera una sustancial incomodidad y/o riesgo para la circulación de vehículos, siendo necesaria una reducción en la velocidad por seguridad.

POSIBLES CAUSAS:

Este tipo de falla es ocasionado por la acción del tránsito sobre las capas superficiales (carpeta o base del pavimento).



Figura 2.39 Corrugación

2.4.2.2.4 *Hinchamiento*

DESCRIPCION:

Abultamiento o levantamiento localizado en la superficie del pavimento, generalmente en la forma de una onda que distorsiona el perfil de la carretera. Según su incidencia en la comodidad de manejo, se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano, Alto) de acuerdo a la siguiente guía:

- B (Bajo) Baja incidencia en la comodidad de manejo, apenas perceptible.
- M (Mediano) Moderada incidencia en la comodidad de manejo, genera incomodidad y obliga a disminuir la velocidad de circulación.
- A (Alto) Alta incidencia en la comodidad de manejo, condiciona la velocidad de circulación y produce una severa incomodidad con peligro para la circulación (el vehículo es proyectado por efecto del hinchamiento).

POSIBLES CAUSAS:

Son causadas fundamentalmente por la expansión de los suelos de subrasante del tipo expansivo. En muchos casos pueden estar acompañadas por el fisuramiento de la superficie.



Figura 2.40 Hinchamiento

2.4.2.2.5 *Hundimiento*

DESCRIPCION:

Depresión o descenso de la superficie del pavimento en un área localizada del mismo. Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano, Alto) de acuerdo a la siguiente guía:

- B (Bajo) Baja incidencia en la comodidad de manejo, apenas perceptible.
- M (Mediano) Moderada incidencia en la comodidad de manejo, genera incomodidad y obliga a disminuir la velocidad de circulación.
- A (Alto) Alta incidencia en la comodidad de manejo, produce una severa incomodidad requiriéndose reducir la velocidad por razones de seguridad.

POSIBLES CAUSAS:

Los hundimientos son causados por asentamientos de la fundación, deficiencias durante la construcción o falta de un continuo mantenimiento a los drenes. La heterogeneidad constructiva puede provocar, desde simples descensos de nivel, hasta insuficiencia de espesor o estabilidad de los materiales.



Figura 2.41 Hundimiento

2.4.2.3 DESINTEGRACIONES

2.4.2.3.1 *Bache*

DESCRIPCION:

Desintegración total de la superficie de rodadura que puede extenderse a otras capas del pavimento, formando una cavidad de bordes y profundidades irregulares.

POSIBLES CAUSAS:

Los baches se producen por conjunción de varias causas: fundaciones y capas inferiores inestables; espesores insuficientes; defectos constructivos; retención de agua en zonas hundidas y/o fisuradas. La acción abrasiva del tránsito sobre sectores localizados de mayor debilidad del pavimento y/o fundación, o sobre áreas en las que se han desarrollado fisuras tipo cuero de cocodrilo, que han alcanzado un alto nivel de severidad, provoca la desintegración y posterior remoción de parte de la superficie del pavimento, originando un bache.



Figura 2.42 Bache

2.4.2.3.2 Peladura

DESCRIPCION:

Desintegración superficial de la carpeta asfáltica como consecuencia de la pérdida de ligante bituminoso y del desprendimiento del agregado pétreo, aumentando la textura del pavimento y exponiendo cada vez más los agregados a la acción del tránsito y clima.

POSIBLES CAUSAS:

Esta anomalía es indicativa que el ligante se ha endurecido apreciablemente, perdiendo sus propiedades ligantes, o bien que la mezcla asfáltica existente es de deficiente calidad, ya sea por un contenido de ligante insuficiente, empleo de agregados sucios o muy absorbentes, como también por deficiencias durante la construcción, especialmente en tratamientos superficiales bituminosos; frecuentemente se presenta como un desprendimiento de agregados en forma de estrías longitudinales, paralelas a la dirección del riego.



Figura 2.43 Peladura

2.4.2.3.3 *Desintegración de Bordes*

DESCRIPCION:

Consiste en la progresiva destrucción de los bordes del pavimento por la acción del tránsito. Se hace particularmente manifiesto en pistas con hombros no pavimentados, en las que existe una significativa porción de vehículos que acceden del hombro al pavimento o en el sentido contrario.

POSIBLES CAUSAS:

La causa primaria es la acción localizada del tránsito, tanto por su efecto abrasivo como por el poder destructivo de las cargas, sobre el extremo del pavimento donde la debilidad de la estructura es mayor debido al menor confinamiento lateral, deficiente compactación del borde, etc.

La presencia de arenas angulosas sueltas, muy próximas a la pista, hace que aumente la abrasión de las llantas que ascienden y descienden del pavimento, provocando peladuras severas que pueden conducir a la desintegración.



Figura 2.44 Desintegración de Bordes

2.4.2.4 OTROS DETERIOROS

2.4.2.4.1 *Exudación de Asfalto*

DESCRIPCION:

Consiste en el afloramiento de un material bituminoso de la mezcla asfáltica a la superficie del pavimento, formando una película continua de ligante, creando una superficie brillante, reflectante, resbaladiza y pegajosa durante el tiempo cálido.

POSIBLES CAUSAS:

La exudación es causada por un excesivo contenido de asfalto en las mezclas asfálticas y/o sellos bituminosos. Ocurre en mezclas con un porcentaje de vacíos deficientes, durante épocas calurosas. El ligante dilata, llena los vacíos y aflora a la superficie, dejando una película de bitumen en la superficie. Dado que el proceso de exudación no es reversible durante el tiempo frío, el asfalto se acumula en la superficie.



Figura 2.45 Exudación de Asfalto

2.4.2.4.2 Parchados y Reparaciones de Servicios Públicos

DESCRIPCION:

Un parche es un área donde el pavimento original ha sido removido y reemplazado, ya sea con material similar o diferente, para reparar el pavimento existente. También un parchado por reparación de servicios públicos es un parche que se ha ejecutado para permitir la instalación o mantenimiento de algún tipo de servicio público subterráneo. Los parchados disminuyen el nivel de servicio de la carretera, al tiempo que puede constituir un indicador tanto de la intensidad de mantenimiento demandado por una carretera, como de la necesidad de reforzar la estructura de la misma. En general las áreas parchadas tienen un comportamiento inferior al pavimento original y en muchos casos son el origen de una mayor rugosidad del pavimento o de nuevas fallas en el mismo o en el área adyacente, particularmente cuando su ejecución es defectuosa.

POSIBLES CAUSAS:

Si bien los parches por reparaciones de servicios públicos se deben a causas diferentes, los niveles de severidad se definen en forma idéntica.



Figura 2.46 Parchados y Reparaciones de Servicios Públicos

2.5 GESTION DE PAVIMENTOS

Los pavimentos forman parte de un conjunto de elementos que son indispensables para permitir el desplazamiento seguro y confortable de los vehículos de un punto a otro, este conjunto recibe el nombre de infraestructura vial, e incluye además de los pavimentos, a los puentes, túneles, obras de drenaje, señalización, dispositivos de seguridad, etc. Es de gran importancia la formulación de planes para la gestión de la infraestructura vial en todos sus elementos, ya que deben trabajar integralmente para que puedan prestar servicio a los usuarios con la calidad deseada.

Sin embargo, dentro de la gestión de la infraestructura vial, los pavimentos deben recibir especial atención, por ser el elemento primario sobre el cual se llevan a cabo los desplazamientos de los vehículos. Es decir, que todos los demás componentes actúan como elementos secundarios que ayudan al confort y seguridad de los usuarios, así como a lograr mantener la calidad de servicio de la vía durante el período previsto en el diseño.

La gestión de pavimentos debe ser entonces, el primer paso para alcanzar una adecuada gestión de la infraestructura vial, y debe contemplar la planificación, ejecución, y un adecuado control de las diversas acciones de desarrollo y mantenimiento aplicadas en el tiempo; con la finalidad de mantener un nivel de servicio adecuado para los usuarios.

Podemos apreciar entonces que la gestión de pavimentos como tal, es de suma importancia para impulsar el desarrollo de las actividades económicas de un país o de una región, ya que, además

de ser indispensable una selección adecuada del tipo de actividad a realizar para la construcción y/o mantenimiento de una vía, el ejecutar labores de conservación demasiado anticipadas o postergarlas a un tiempo diferente del óptimo tiene un costo. Si se hace antes de tiempo se pierde la posibilidad de utilizar los recursos en algo más rentable durante el periodo del adelanto, pero la situación es más grave si se deja pasar el momento oportuno para intervenir, y como consecuencia los daños llegan hasta la estructura básica del pavimento. En este caso, el tipo de intervención necesaria será una rehabilitación, con un costo mucho más alto que el de los trabajos que pudieron haberse efectuado de manera oportuna. Es más, existe otro efecto perjudicial de postergar la conservación, y es el incremento de los costos de operación de los usuarios; esto se traduce en un aumento de los costos de transporte, lo que significa una presión inflacionaria de carácter estructural.

Vemos entonces que el realizar una adecuada gestión de pavimentos representa, especialmente para los países en desarrollo, la posibilidad de ahorrar valiosos recursos que pueden ser utilizados en otros rubros.

Para preparar un programa global de conservación de una red vial de manera que sea conveniente para la economía nacional, se debe comenzar por identificar para cada camino:

- ✓ El momento preciso para cada intervención.
- ✓ El tipo óptimo de intervención.

Un sistema de gestión de pavimentos debe permitir un uso sencillo, de manera que el ingreso de datos y actualización de la información sea fácil. Además, debe ser capaz de analizar diversas estrategias al efectuar una evaluación, identificando la alternativa económicamente más conveniente.

Debe utilizar procesos racionales con criterios cuantificables sobre los cuales se tomen las decisiones, y finalmente debe ejecutar una evaluación permanente de la eficacia de las actividades realizadas mediante retroalimentaciones del sistema.

2.5.1 NIVELES DE LA GESTION DE PAVIMENTOS

La gestión de pavimentos se realiza en dos niveles principales, los cuales son interactivos entre sí y están definidos según el área que debe ser analizada, y el tipo de datos que son necesarios para generar los modelos de predicción del deterioro de las estructuras a lo largo del tiempo. Estos niveles de la gestión de pavimentos son la *Gestión a Nivel de Proyecto* y la *Gestión a Nivel de Red*.

2.5.1.1 Gestión de Pavimentos a Nivel de Proyecto

En este nivel, la gestión lo que pretende es analizar el pavimento de una vía en particular, de manera que se pueda determinar la alternativa óptima para la construcción de una nueva estructura, o bien el tipo de acciones de mantenimiento necesarias, y los momentos en que éstas han de aplicarse a un pavimento existente.

Para realizar una gestión a nivel de proyecto se necesitan datos específicos de secciones del pavimento, como por ejemplo:

- ✓ Cargas que recibe (o recibirá) el pavimento.
- ✓ Factores ambientales que lo afectan (o lo afectarán).
- ✓ Características de los materiales que lo constituyen (o constituirán).
- ✓ Propiedades de su base, sub-base y subrasante.
- ✓ Variables de construcción y mantenimiento.
- ✓ Costos.

El análisis a nivel de proyecto debe generar una serie de alternativas de construcción y/o mantenimiento, las cuales han de evaluarse técnica y económicamente, de forma que al final se pueda seleccionar aquella que minimice los costos totales del ciclo de vida del pavimento, tomando en cuenta los de construcción así como los de operación de los usuarios, fijando una serie de estándares que han de satisfacerse y que tienen que ver con el comportamiento estructural y funcional del pavimento a través del tiempo.

2.5.1.2 Gestión de Pavimentos a Nivel de Red

A nivel de red la gestión de pavimentos busca desarrollar un programa prioritario y organizado para el mantenimiento, rehabilitación y construcción de pavimentos, en base a la disponibilidad presupuestaria del ente administrador de la red vial de una región o país, para un período determinado.

Dentro de esta gestión pueden distinguirse dos sub-niveles que comprenden: la selección de proyectos, en la cual se toman decisiones de asignación de fondos para proyectos o grupos de ellos; y el sub-nivel de programa, en el cual se cuenta con un presupuesto establecido que debe repartirse en una red determinada.

La gestión a nivel de red involucra decisiones para la rehabilitación o mantenimiento de la red como un todo, por lo cual los modelos deben ser diseñados con el fin de optimizar el uso de los fondos disponibles. Debe considerarse para este propósito la serviciabilidad de los pavimentos existentes o el porcentaje de pavimentos deficientes, datos que deben ser recolectados en campo usando metodologías adecuadas. Entre las actividades que comprende la gestión a nivel de red tenemos:

- ✓ Identificación de aquellas vías en las que debido a su estado actual, las actividades de mantenimiento o mejora podrían ser consideradas como prioritarias dentro de la red de caminos.
- ✓ Generación de diferentes alternativas de tratamiento en aquellas vías que serán intervenidas, seleccionando adecuadamente variables como el período de análisis, tasa de descuento, nivel de calidad mínimo de pavimento, etc. de manera que se pueda realizar un conveniente análisis técnico-económico en base al cual han de tomarse las decisiones.
- ✓ Desarrollo de un programa de largo plazo para el mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos de la red, así como de nuevas construcciones.

2.6 MODELACION DE DETERIORO DE PAVIMENTOS

Los modelos de deterioro son por lo general expresiones matemáticas que representan la evolución del estado del pavimento en el tiempo en base al conocimiento de sus condiciones en el momento de la puesta en servicio y de realización del análisis. Además permiten diagnosticar el efecto de las actividades de mantenimiento a corto y largo plazo, con el objetivo de estimar con mayor precisión el momento de aplicación de actividades de conservación y conocer el nivel de deterioro resultante después de la misma y su progresión en el tiempo.

2.6.1 TEORIA DE MODELOS DE DETERIORO

Los modelos de deterioro son modelos de predicción que permiten ser utilizados en las siguientes actividades:

- ✓ Estimar las condiciones del pavimento en un futuro.
- ✓ Reconocer el tipo de acción de mantenimiento y rehabilitación, y el momento en el que se debe realizar.
- ✓ Optimizar el programa de mantenimiento o de rehabilitación en uno o varios años
- ✓ Analizar el impacto de cierto programa de mantenimiento en las condiciones futuras del pavimento
- ✓ Conocer el costo de ciclo de vida del pavimento.
- ✓ Retroalimentar el proceso de diseño del pavimento.

A continuación se hacen una breve descripción, por medio de un diagrama de flujo que indica el desarrollo de los modelos.

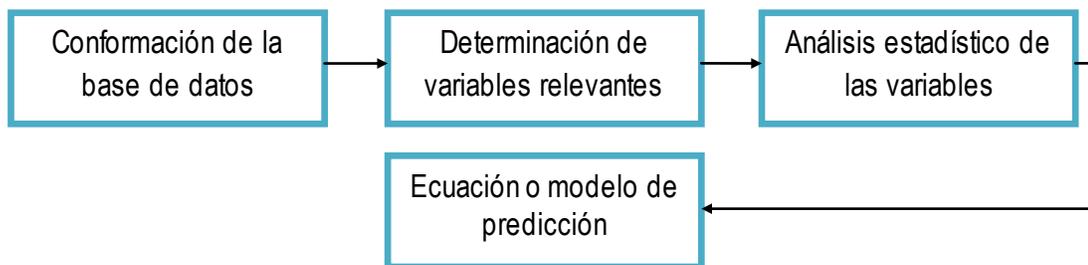


Figura 2.47: Procedimiento para la creación de un modelo de deterioro.

2.6.2 CLASES Y TIPOS DE MODELOS

Los métodos de proyección de condiciones se pueden agrupar en dos categorías básicas (Robinson et al, 1998):

2.6.2.1 *Determinista.*

Donde la predicción del comportamiento se prevé como un valor exacto sobre la base de funciones matemáticas o de deterioro observado medido. (Extrapolación lineal, regresión (empírico), distribución de probabilidad, mecanicista-empírico).

2.6.2.2 Probabilistas.

Condición que se prevé como una función de probabilidad de una serie de condiciones. (Markoviano).

2.6.3 TECNICAS PARA DESARROLLAR MODELOS

Existen muchas técnicas para el desarrollo de modelos de deterioro, las más utilizadas son: extrapolación lineal, regresión (empírico), distribución de probabilidad, mecanicista-empírico y markoviano. La precisión de los modelos es un punto de gran importancia y dependerá del uso que se desee dar a los resultados. Los modelos para nivel de proyecto necesitan mayor precisión que los para nivel de red. A continuación se describen brevemente las principales técnicas para desarrollar modelos.

2.6.3.1 Extrapolación lineal.

Este método se basa en la extrapolación lineal de los dos últimos puntos de la condición del pavimento, sus principales características son:

- ✓ Es aplicable sólo a secciones individuales de pavimentos y no puede usarse en otras secciones.
- ✓ Se requiere al menos una medición de la condición del pavimento además de la realizada al final de la etapa de construcción (Figura 2.48)
- ✓ Asume que las cargas de tránsito, los niveles de mantenimientos y tasas de deterioro se mantendrán en el futuro, por lo tanto, no es precisa para periodos largos de tiempo. En el

caso de aplicar este tipo de modelos en nuestro país es este punto especialmente importante dada la variabilidad principalmente de las cargas y actividades de mantenimiento.

- ✓ No es aplicable predecir tasas de deterioros de pavimentos recién construidos ó que hayan sufrido recientemente una rehabilitación mayor.
- ✓ Para una sección de pavimento específica, los factores de suelo de cimentación, clima, estructura de pavimentos y tránsito pasado se consideran explícitamente en el análisis.

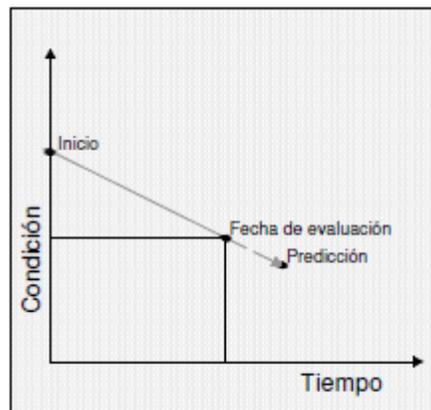


Figura 2.48: Extrapolación lineal.

2.6.3.2 Regresión.

El análisis de regresión es usado para establecer una relación empírica entre dos o más variables. Cada variable es descrita en términos de media y su variación. Los distintos tipos de variación se describen a continuación.

Regresión lineal entre dos variables, se describe con el modelo siguiente:

$$Y_i = a + b x_i + \text{error}$$

Regresión lineal múltiple, en este caso se asume que la variable dependiente es una función lineal de las variables independientes y se describe:

$$Y = a + b_1.x_1 + b_2.x_2 + \dots + \text{error}$$

Regresión no lineal, se puede utilizar cuando la relación entre la variable dependiente y la independiente es no lineal. Una relación no lineal puede ser analizada como un modelo lineal transformando la variable dependiente.

2.6.3.3 Distribución de probabilidad.

La condición de un pavimento, como PCI, IRI, etc. puede ser tratada como una variable aleatoria con una probabilidad asociada a sus valores. Una distribución de probabilidades describe la probabilidad asociada con todos los valores de la variable aleatoria. Por ejemplo: si la variable aleatoria es PCI, entonces la distribución de probabilidad puede ser descrita como la función de distribución acumulada de la Figura 2.49.

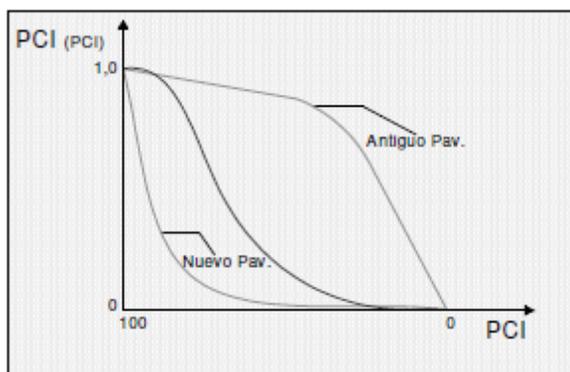


Figura 2.49: Distribución de probabilidades.

En la figura anterior, el eje vertical es la probabilidad de que el PCI sea igual o menor que un determinado valor de PCI. Esta figura presenta además distribuciones acumuladas en diferentes puntos de la vida del Pavimento y podría representar la probabilidad en el tiempo de un determinado valor de PCI, la que se conoce como curva de supervivencia.

2.6.3.4 Modelos Empíricos.

Con esta técnica modelos siguen modelos estadísticos que se basan en información observada y subjetiva; normalmente sobre un análisis estadístico del deterioro en tramos específicos y, por lo tanto, podrían no ser aplicables en condiciones distintas a las prevalecientes durante las observaciones. Usan modelos estadísticos tales como:

- ✓ Modelos estocásticos:
 - Regresiones lineales con una o varias variables
 - Regresiones no lineales con una o varias variables

- ✓ Modelos Probabilísticos:
 - La curva Survivor
 - Modelo Marcov
 - Modelo de Construcción
 - Modelo Semi-Marlov

Dentro del modelo empírico se procesa la información de acuerdo a los siguientes procesos:

1. Familiarización con la información.
2. Análisis y selección de la Información.
3. Construcción del modelo.
4. Análisis Estadístico.

2.6.3.5 Modelos Mecanicistas.

Este método se basa en la teoría mecanicista donde se utilizan parámetros basados en lo mecánico. En la modelación del deterioro de pavimentos este modelo busca obtener respuestas primarias tales como esfuerzos y deflexiones que se presentan en el pavimento, cuando este está en una condición crítica sometido a cargas de tráfico tanto estáticas como dinámicas.

Los modelos mecanicistas tienen fundamento en teorías del comportamiento de pavimentos con la validez ampliamente reconocida, sin embargo, estos modelos requieren de una gran cantidad de datos de entrada, entre los cuales se encuentran parámetros difíciles de obtener en campo.

Para el desarrollo de este modelo se utilizan las siguientes teorías y análisis:

- ✓ Teoría de la capa elástica.
- ✓ Teoría Visco elástica.
- ✓ Mecánica de Fractura.
- ✓ Análisis de elementos finitos.

2.6.3.6 Modelos de Marcov

En la técnica Markoviana se utilizan matrices probabilísticas de transición, es decir, la información que utiliza es con variables que presentan el deterioro de un nivel a otro. En éste modelo se asume que la condición futura está en función de la condición presente y no depende del comportamiento en el pasado. Esta técnica está basada en determinar la probabilidad asociada con una sección de pavimento en un determinado estado de condición, ya sea que se queda en ese determinado estado o que se deteriora para pasar al siguiente estado, después de un determinado ciclo.

2.6.4 MODELOS DE DETERIORO DE PRIMERA Y SEGUNDA FASE.

Los pavimentos, en general, presentan dos fases de deterioro que claramente diferenciables (figura 2.49), estas son:

4. La primera fase, es aquella etapa del deterioro que se produce entre la puesta en funcionamiento de una vía, inmediatamente después de su construcción, y el momento en que se lleva a cabo en ella una reparación de importancia; son reparaciones de importancia:
 - ✓ Todas las actividades de restauración: cepillado, reparaciones de espesor parcial o total, reemplazo de losas, restablecimiento de la transferencia de carga entre losas, etc.
 - ✓ Los recapados (de asfalto o concreto).
 - ✓ Las reconstrucciones.

5. La segunda fase de deterioro es aquella etapa que va desde la realización de un mantenimiento de importancia en adelante. Al llevar a cabo una rehabilitación siempre se elimina o reduce el deterioro existente, o bien, se afecta a la progresión del mismo para el futuro (o ambos) por lo que el comportamiento del pavimento en la etapa posterior a la actividad de mantenimiento es, por lo general, diferente al de la primera fase.

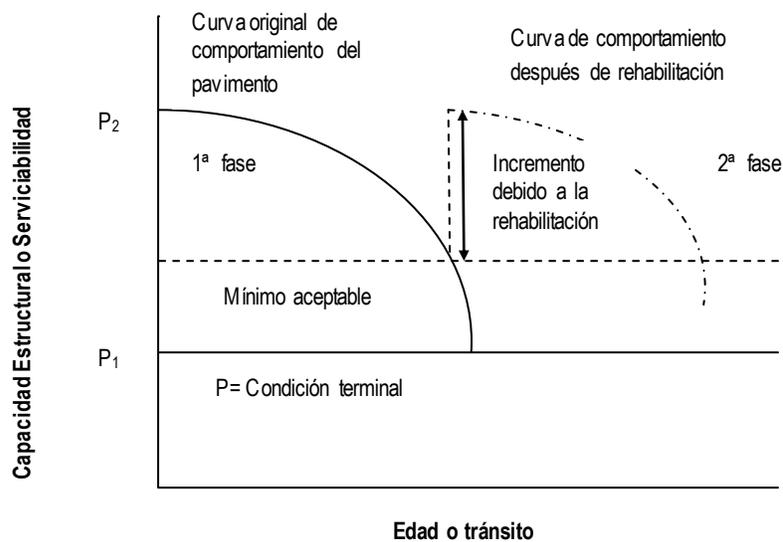


Figura 2.50: Esquema de deterioro de pavimentos de 1ª y 2ª fase..

2.6.5 MODELOS DE DETERIORO AGREGADOS E INCREMENTALES.

De acuerdo a la forma de predicción que presentan los modelos es posible diferenciar dos variedades, estos son:

- ✓ Modelos de deterioro agregados (acumulados), son aquellos que para predecir el un deterioro futuro requieren conocer por completo la historia previa del comportamiento del pavimento, es decir se necesita saber de datos tales como tasa de crecimiento de

tránsito a lo largo de la vida del pavimento (medida o estimada), tránsito medio diario anual al inicio del servicio del pavimento (agrietamiento, deterioro de juntas, escalonamiento si existe, etc.), en muchos casos esto no es posible y por una u otra razón sólo se dispone de datos parciales.

- ✓ Modelos de deterioro de tipo incremental, a diferencia de los agregados, no requieren conocer la historia previa para predecir los comportamientos futuros, sino que permiten hacerlo en base a un conjunto de ecuaciones y operaciones lógicas, necesitando conocer sólo el estado o condición actual del pavimento (medida de terreno), además de las características estructurales y climáticas existentes, y el tránsito que circula en el año de evaluación por dicho pavimento. Los modelos incrementales presentan algunas ventajas en relación a los modelos agregados, algunas de estas son:
 - a) Los modelos agregados para realizar alguna predicción requieren conocer por completo la historia previa del pavimento. Los modelos incrementales, en cambio, no necesitan tanta información histórica, dado que predicen a partir de la condición actual y futura de dichas variables, eliminando así los errores asociados al desconocimiento de los datos originales o a la estimación de condiciones pasadas.
 - b) La etapa de un modelo a condiciones locales puede ser más precisa si éste se divide en etapas (inicio y progresión), ya que así puede predecirse por separado el deterioro al inicio y la progresión del mismo, situación que adquiere importancia en el caso de aquellos deterioros que en su primeros años tienen un

brusco aumento, para luego estabilizarse en una progresión mucho menor a la del principio.

- c) Por último la modelación incremental se puede adaptar mejor que la agregada para predecir el deterioro luego de aplicar acciones de conservación. Sobre todo en aquellos casos en que se afecta la progresión del deterioro futuro porque el modelo incremental lo puede incorporar de inmediato, en cambio el agregado requiere un ajuste indirecto.

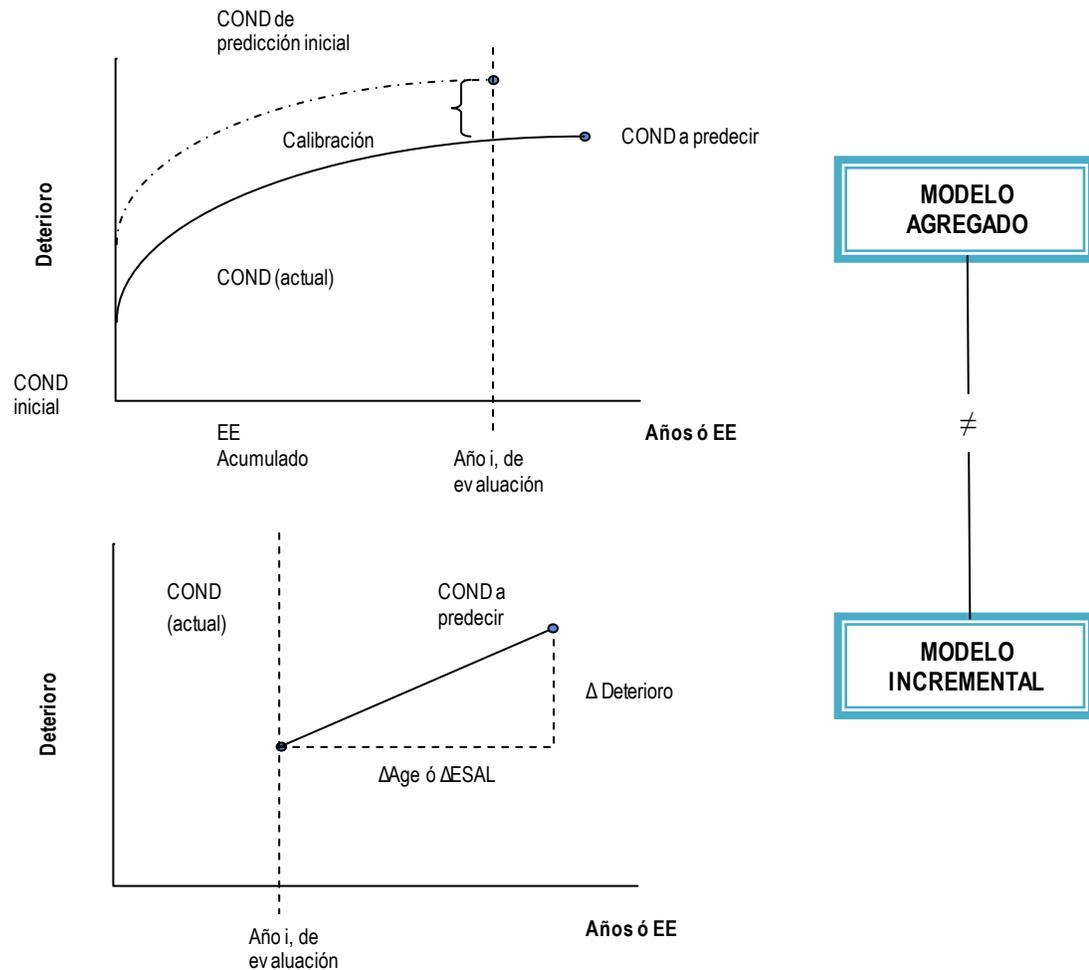
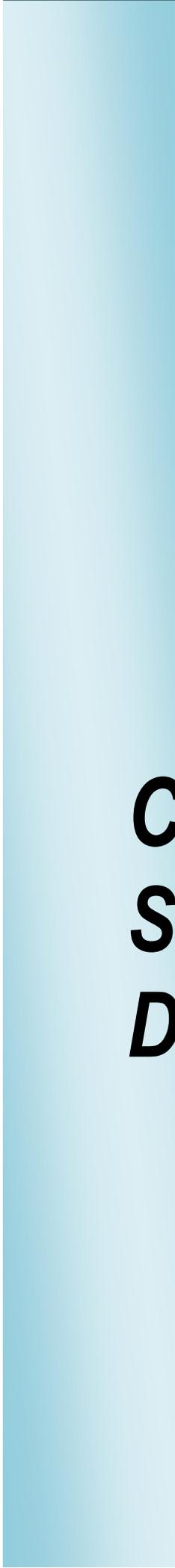


Figura 2.51: Diferencias entre modelos agregados e incrementales [Vidal, 1998]



***CAPITULO III
SISTEMAS DE GESTION
DE PAVIMENTOS***

3.1 SISTEMAS DE GESTION DE PAVIMENTOS

Los sistemas de gestión de pavimentos son un conjunto de procedimientos y herramientas que tienen como propósito asistir a estas organizaciones en la aplicación sistemática de procesos relacionados con este aspecto. Entre las principales componentes de un sistema de gestión pueden mencionarse: un conjunto de programas de cómputo para la información requerida por el sistema; herramientas de análisis para la predicción del deterioro de pavimentos; evaluación económica de proyectos carreteros, y la formulación de programas.

En términos generales, los sistemas de gestión de pavimentos son conjuntos de procedimientos y herramientas que tienen como propósito asistir a las organizaciones operadoras de carreteras en la aplicación sistemática de procesos relacionados con la gestión de pavimentos, particularmente la identificación de alternativas técnica y económicamente óptimas para la conservación de la red en el corto y mediano plazos, así como la formulación de programas de mantenimiento anuales y/o multianuales.

De acuerdo con las recomendaciones de la Norma ASTM E1166 – 00, la adopción de un sistema de gestión de pavimentos involucra la integración de las siguientes componentes [ASTM, 2003]:

- 1) **Sistema de referencia:** Se refiere a un método único y estable para la identificación y referencia espacial de los tramos que constituyen la red de carreteras, así como de la información sobre las características y el estado físico de los mismos. Entre los métodos más utilizados pueden mencionarse el sistema arco-nodo, el cadenamamiento, y las coordenadas geográficas

2) **Información requerida por el sistema:** Normalmente, los sistemas de gestión utilizan datos pertenecientes a las siguientes categorías:

- a. *Inventario de la red:* el cual comprende la clasificación funcional, longitud, número de carriles, ancho de carril y hombros, pendiente y curvatura de cada uno de los tramos; diseño estructural de la sección, incluyendo espesores y propiedades de los materiales de las capas constitutivas; características del drenaje e historial de reparaciones.
- b. *Estado del pavimento:* expresado en términos de la irregularidad de la superficie de rodamiento; presencia y magnitud de deterioros; deflexiones y otros parámetros de la capacidad estructural del pavimento; espesores y propiedades reales de las capas constitutivas; resistencia al deslizamiento y textura y estado del drenaje
- c. *Características del tránsito:* volumen, composición vehicular y cargas por tipo de vehículo
- d. *Datos climatológicos:* entre los cuales pueden mencionarse precipitación, humedad, promedios de temperatura y rangos de variación de la misma
- e. *Costos:* incluyendo, por una parte, los costos de construcción, mantenimiento, rehabilitación y modernización de los pavimentos, y por otra, los costos relacionados con el uso de la infraestructura por parte de los usuarios, es decir, costos de operación vehicular, costos asociados con el valor del tiempo de pasajeros y la demora de mercancías, y costos de accidentes.

3) **Manejador de bases de datos:** Dependiendo del tamaño de la red por analizar, el volumen de información requerido por los sistemas de gestión de pavimentos puede llegar a tener una magnitud considerable, por lo que en la mayoría de los casos, implica el uso de un manejador de bases de datos y de procedimientos computarizados para el almacenamiento, consulta y análisis de la información. Como consecuencia de la vinculación de las carreteras con el entorno y el desarrollo de tecnologías, como los sistemas de posicionamiento global y los sistemas de información geográfica, en los últimos años se ha observado una tendencia mundial hacia el uso de bases de datos georreferenciadas como respaldo para el desarrollo de sistemas de gestión de pavimentos.

4) **Herramientas de análisis:** Se refieren a un conjunto de modelos matemáticos que se utilizan como apoyo para las siguientes tareas:

- a. Predicción del deterioro del pavimento a lo largo de su vida útil, y estimación de los efectos de las acciones de conservación
- b. Evaluación económica de proyectos de conservación y mejoramiento para tramos específicos, así como de políticas aplicables a toda la red o a partes de ella. Para este propósito se utilizan métodos como el análisis del ciclo de vida o el de costo-beneficio
- c. Definición de prioridades con respecto a los requerimientos de conservación y mejoramiento de la red, a través del análisis de proyectos candidatos, y la programación de los trabajos. Usualmente, los algoritmos para definir prioridades

utilizan criterios como el estado del pavimento, tasa de deterioro del mismo, y volumen de tránsito, entre otros

- d. Optimización de los programas de conservación con objeto de maximizar los niveles de desempeño del pavimento o la rentabilidad de las inversiones correspondientes. En la mayoría de los casos, los modelos de optimación utilizan técnicas de programación matemática
- e. Evaluación del impacto de distintas estrategias de conservación y niveles de disponibilidad de recursos en el desempeño de la red

De acuerdo con la Norma ASTM E 1166 – 00, la puesta en operación de un sistema de gestión de pavimentos requiere un estudio previo en el que se evalúe su compatibilidad con otros procesos institucionales existentes; su utilidad real en la planeación y programación de los trabajos de conservación y desarrollo de la red; y su aceptación por parte de los responsables de la gestión de los pavimentos al interior de la organización operadora.

Asimismo, se requiere un plan en el que se definan el equipo y programas de cómputo; equipo de medición; personal y estructura organizacional necesarios para la operación del sistema, así como un programa para su implantación por etapas. El plan debe incluir también, procedimientos para la recopilación; ingreso; validación y actualización de información; generación de informes; y la revisión, calibración y mejoramiento de los modelos del sistema.

3.1.1. EL SIGESVIES EN LA GESTIÓN DE PAVIMENTOS

En nuestro país, a través del FOVIAL (Fondo de Inversión Vial), se ha adoptado para la priorización de las inversiones en materia de conservación vial el Sistema de Gestión de la Infraestructura Vial de El Salvador (SIGESVIES), Implementado en el Ministerio de Obras Públicas con el apoyo del consorcio Israelí – Salvadoreño: TNM – Consultora Técnica, S.A. de C.V.

Este Sistema ha sido implementado con el objeto de contar con una herramienta que tenga la habilidad de apoyar la planificación de las intervenciones a realizar en las carreteras a nivel de mantenimiento, rehabilitación y construcción, y que además permite priorizar estas intervenciones sobre una base eminentemente técnica, de tal forma que los usuarios obtengan los mayores beneficios considerando las restricciones presupuestarias que pudieran darse.

El sistema opera sobre la base de la información del inventario vial, tomando en cuenta la inspección y recolección detallada de los diferentes elementos de la carretera, es decir:

1. Conociendo las características generales de las vías,
2. Su condición superficial,
3. Su capacidad estructural, (espesores de la estructura del pavimento),
4. Comodidad del usuario al hacer uso de las carreteras (rugosidad, deflexiones),
5. Niveles de tráfico.

Lo anterior permite determinar las intervenciones requeridas para llevar la red a un nivel de servicio determinado, asignando los recursos disponibles, a aquellas secciones de las carreteras que sean de mayor beneficio para los usuarios. Para su correcta operación se necesita mantener un inventario actualizado de las vías que forman la red vial nacional, en este se toman datos que reflejan sus características, tanto estructurales como funcionales.

El SIGESVIES, permite realizar la priorización a través de tres formas:

1. Sobre la base del Índice de Condición Global (OPI), mediante el cual se fijan estándares deseados en la red vial, y se establecen los requerimientos financieros para lograr alcanzar dichas metas.
2. Sobre la base del Incremento de Beneficio/Costo (IBC), donde dada una asignación presupuestaria, asigna los recursos a aquellos tramos donde se obtendrán los mayores beneficios para los usuarios.
3. Sobre la base de los Costos de la Agencia. Esta modalidad permite buscar las alternativas más económicas para los distintos tramos de la red, sin importar la cuantificación de beneficios.

Las priorizaciones se están llevando a cabo, actualmente, sobre la base del Incremento de Beneficio/Costo (IBC).

3.1.2. EL HDM-4 EN LA GESTIÓN DE PAVIMENTOS

El HDM-4 es una herramienta de gestión vial, incorpora nuevas alternativas para los análisis y toma en cuenta una mayor diversidad de variables, lo cual vuelve más frágil su implementación en diversas realidades. De hecho, entidades financieras internacionales como el Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo, lo usan para la evaluación de factibilidades en los países sujetos a créditos. En la Gestión de pavimentos el HDM-4 realiza las siguientes funciones:

- ✓ **Planificación**, consiste en el análisis de un sistema de carreteras en su conjunto, definiéndose presupuestos a medio y largo plazo, y estimándose gastos de desarrollo y conservación de carreteras bajo distintos escenarios presupuestarios.
- ✓ **Programación**, consiste en el desarrollo de programas plurianuales de obras tanto de construcción como de conservación de tramos de la red, que generalmente están condicionados por limitaciones presupuestarias, teniendo que definirse las actuaciones a realizar en función de un análisis costo - beneficio.
- ✓ **Preparación**, en este nivel se define en detalle cómo se llevarán a cabo los distintos tipos de obras a ejecutar sobre un tramo de carretera.
- ✓ Por último se encuentran las **Operaciones**, consiste en el desarrollo de las tareas definidas en los pasos definidos anteriormente, y realización de un seguimiento detallado de los trabajos realizados.

En la Figura 3.1 se aprecia el esquema del HDM-4 en la gestión de pavimentos

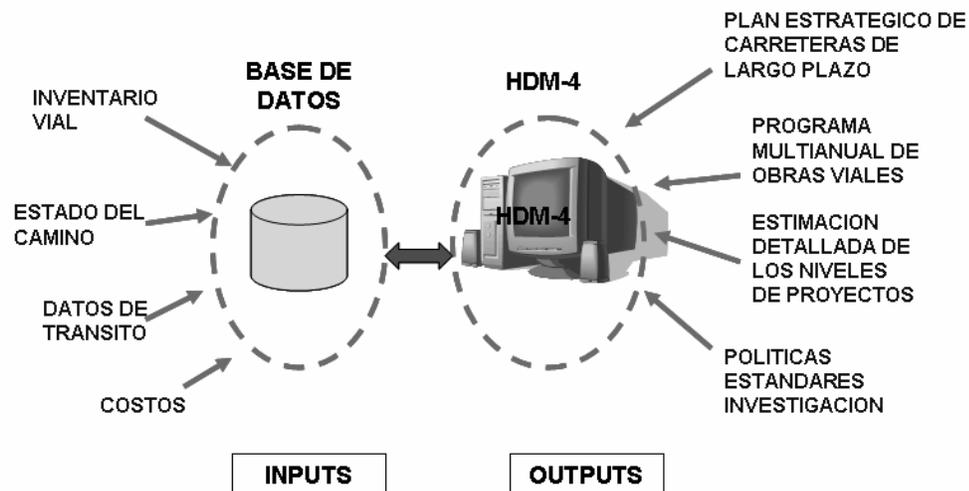


Figura 3.1: El HDM-4 en la Gestión de Pavimentos.

El HDM-4 es una herramienta de ayuda al gestor de una red de carreteras, que le permite de una manera analítica identificar dónde resulta más rentable (socialmente) invertir, para conseguir maximizar el beneficio de la red de carreteras para el conjunto de la sociedad.

Así, a través de las distintas funcionalidades de la herramienta se pueden analizar los resultados de distintas alternativas en la planificación de redes de carreteras. Se pueden analizar los resultados de diferentes programas de actuación en una determinada red y se pueden llegar a definir trabajos a realizar maximizando el beneficio de los mismos.

3.1.2.1 Aplicaciones

Una de las mayores virtuales del modelo HDM-4 dentro de la gestión vial, es la amplitud de sus campos de aplicación, los cuales se pueden dividir de la siguiente manera: *Planificación, Evaluación Técnica y Evaluación Económica.*

- ✓ **Planificación:** Dentro de esta etapa, la importancia del modelo se manifiesta al servir como herramienta para la justificación de inversiones mediante un proceso analítico, ya que permite prever las necesidades físicas y financieras para las actividades futuras de conservación, sirviendo como ayuda en la elaboración de estrategias de desarrollo y/o mantenimiento cuando existen restricciones presupuestarias.

- ✓ **Evaluación Técnica:** Se utiliza para comparar alternativas de diseño y planes de mantenimiento, calcular el tipo y extensión del deterioro en los pavimentos, así como los efectos que se obtienen en la condición de éstos mediante la aplicación de las actividades de conservación.

- ✓ **Evaluación Económica:** Mediante la aplicación de indicadores económicos como la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN), se puede conocer la alternativa con mayores beneficios para un proyecto, mientras que a nivel de red, se logra seleccionar estrategias de desarrollo y mantenimiento, acordes a las políticas del administrador vial y a la disponibilidad de recursos.

3.1.2.2 El Sistema HDM-4

El funcionamiento del sistema se basa en las relaciones físicas y económicas derivadas de un extenso estudio sobre el deterioro de las carreteras, el efecto de la conservación de las mismas y los costos de operación de los vehículos. Fundamentalmente, se basa en los siguientes modelos para el cálculo de las mejores alternativas de conservación y mejora de los distintos tramos de carreteras evaluados en un determinado análisis. Estos modelos son:

- ✓ ***Deterioro de la Carretera y Efectos de las Obras (RDWE – Road Deterioration and Works Effects)***: Estos modelos permiten predecir, para un período de análisis definido por el usuario, la evolución del estado físico de las carreteras en función de las solicitaciones impuestas por el tránsito, de las condiciones climatológicas, y del tipo de pavimento; así mismo, los modelos estiman los efectos de las obras de conservación y mejoramiento más usuales. El HDM-4 incorpora modelos para distintos tipos de pavimentos, tanto flexibles como rígidos.
- ✓ ***Efectos para los Usuarios (RUE – Road User Effects)***: Son los utilizados para calcular los efectos del estado físico y las condiciones de operación de las carreteras sobre los usuarios de las mismas, en términos de indicadores como los costos de operación vehicular y los tiempos de recorrido. A su vez, se emplean para obtener los beneficios derivados de las inversiones en proyectos carreteros.
- ✓ ***Efectos Sociales y Medioambientales (SEE – Social and Environment Effects)***: Grupo de modelos destinados a determinar los efectos de la condición de los pavimentos en aspectos como la tasa de accidentalidad, consumo de energía asociado con la operación del tránsito, equipo de construcción, y la emisión de contaminantes.

Mediante el uso de estos modelos la herramienta calcula, para cada año del período de evaluación, para cada tramo de carretera y para cada alternativa o estrategia de conservación, las condiciones de la carretera y los recursos utilizados para la conservación con cada estrategia, así como las velocidades de los vehículos y los recursos físicos consumidos por la operación de vehículos.

Una vez estimadas las cantidades físicas necesarias para construcción, las obras y operación de vehículos, se aplican los precios y costos unitarios especificados por los usuarios para determinar los costos económicos de las distintas alternativas. Luego se hace el cálculo de los beneficios relativos de las diferentes alternativas, seguido del cálculo del valor actual y de la tasa de rentabilidad. Por último queda comparar los valores actuales de cada alternativa para obtener cuál es la mejor solución desde el punto de vista de lograr un menor costo del transporte para el conjunto de la sociedad.

El análisis del costo global de cada alternativa se obtiene considerando por un lado los costos de la administración de carreteras (costos de construcción y de conservación) y por otro los costos de los usuarios (costo de operación de los vehículos, costos del tiempo, costo de los accidentes). La integración de todos estos costos se muestra en la figura 3.2

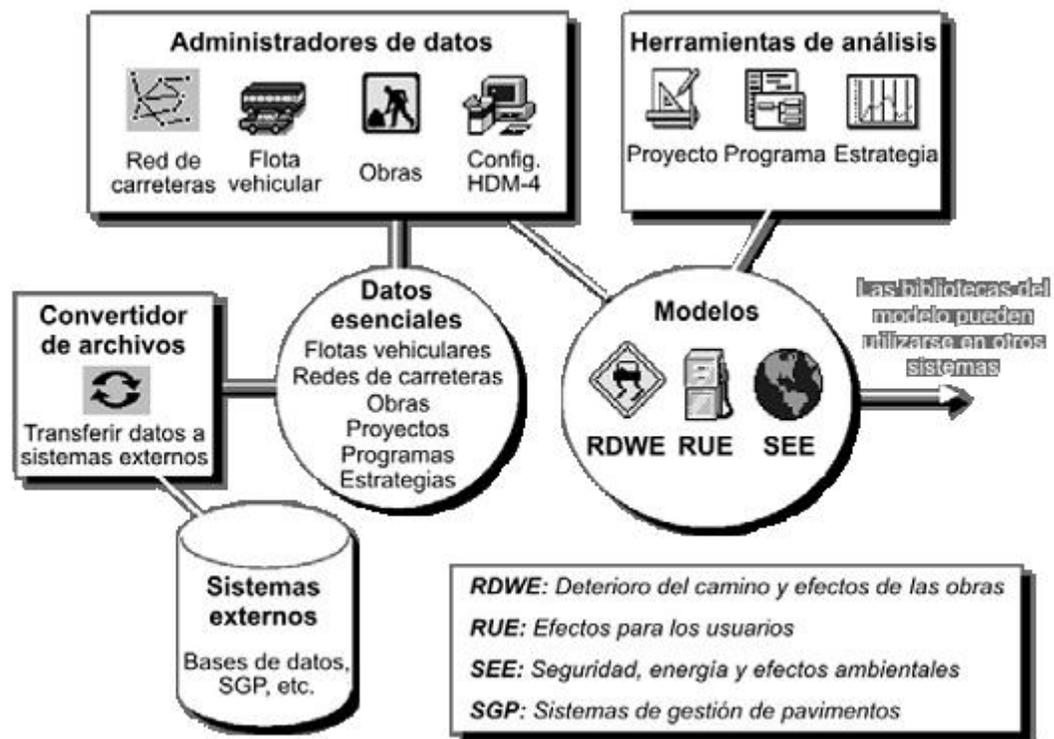


Figura 3.2: Arquitectura del sistema HDM-4 [Kerali, 2000]

Los modelos antes citados se integran dentro de la herramienta y están complementados por módulos auxiliares, que permiten al usuario de la aplicación gestionar la información referente a la red de carreteras, el parque de vehículos y los estándares de conservación y mejora. La aplicación permite obtener informes de distinto tipo sobre la evolución del estado de la carretera, las necesidades de inversión anual, etc.

Por último la aplicación permite exportar e importar datos para integrar la misma con otras herramientas de gestión (tal es el caso del SIGESVIES, el cual se describió anteriormente).

3.1.2.3 Modelos de Cálculo

a) Modelo Económico

El modelo de evaluación económica se basa en minimizar los costos totales del transporte para la sociedad. En la figura 3.3 se muestra la variación de los costos tanto del usuario de la carretera como de la administración, en función del estado de la misma. Se observa del punto de costo mínimo de la sociedad, correspondiente al valor mínimo de la función suma de los costos de la administración y de los usuarios.

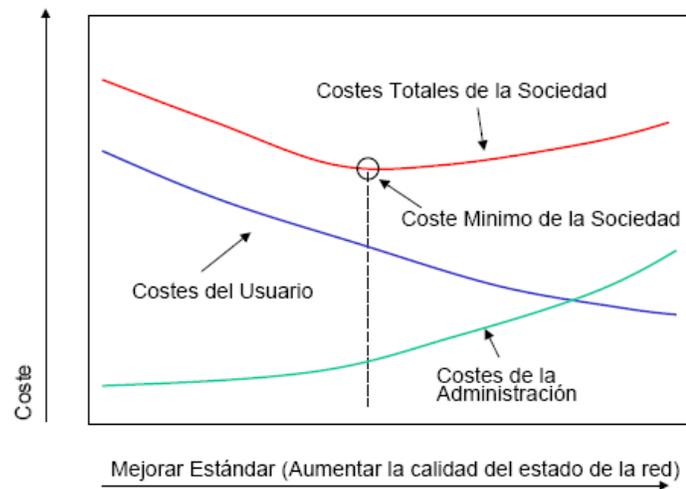


Figura 3.3: Evolución de los costos de la sociedad.

b) Modelo de Deterioro de la Carretera y Efectos de las Obras

En el caso del pavimento, la evaluación del estado se hace partiendo de las características del pavimento, del estado del mismo en la fecha actual y de las condiciones ambientales y de tráfico.

Para cada año se van calculando repetidamente los efectos de los distintos deterioros que se van produciendo sobre el pavimento, y el efecto de estos deterioros sobre la regularidad (IRI) de la

vía. Así se obtiene el valor de regularidad final para cada año, a continuación se analizan las distintas alternativas de conservación de dicho tramo, función del estado de la carretera, y se calcula el estado final del pavimento después de haber realizado las labores de conservación correspondientes. Realizando este proceso para los distintos años de estudio se obtiene la evolución del estado de la vía para el período de análisis. En la figura 3.4 se muestran los distintos factores que influyen en el modelo de cálculo de deterioros del pavimento.

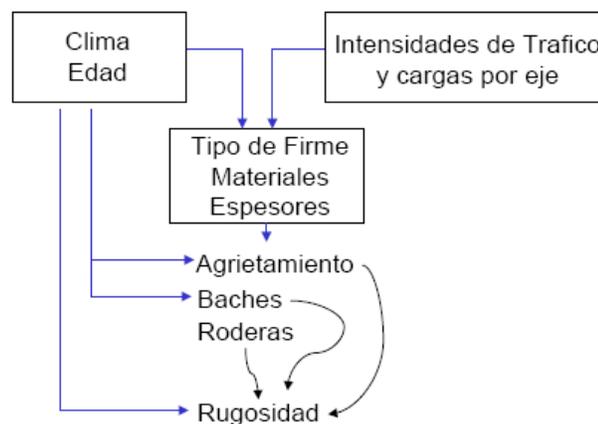


Figura 3.4: Modelo de deterioro de carreteras.

c) Modelo de Costos de los Usuarios (Operación de los Vehículos)

Para evaluar los costos de usuario se consideran tres posibles costos:

- ✓ Costo de operación de los vehículos (VOC): Estos costos se desglosan en consumo de combustible, lubricantes, desgaste de neumáticos, reparación de los vehículos (mano de obra y materiales), depreciación del valor del vehículo.
- ✓ A estos costos se deben añadir los costos del valor del tiempo (tiempo de los pasajeros y tiempo de la carga) y los costos de los accidentes.

El método de obtener el valor económico del costo de los usuarios, se basa en calcular la velocidad media de circulación para cada tramo de carretera, y partiendo de esa velocidad de circulación obtener los gastos materiales de los vehículos, evaluar económicamente estos gastos materiales utilizando los costos unitarios de los distintos materiales, añadir los costos del tiempo y los accidentes para finalmente obtener los costos totales de los usuarios. (Ver figura 3.5)

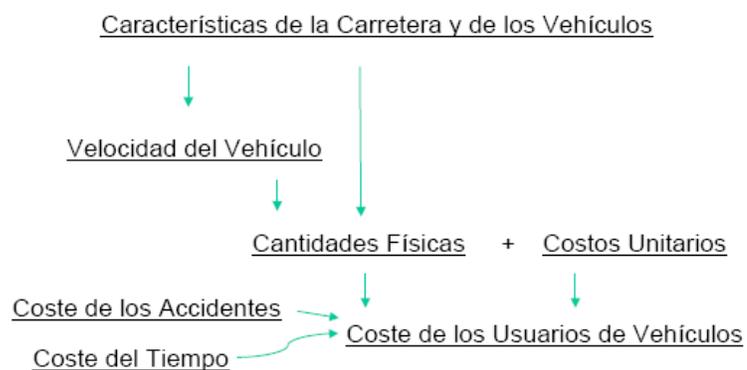


Figura 3.5: Costos totales de los usuarios

Otra de las componentes más importantes del HDM-4 está constituida por las herramientas de análisis o aplicaciones del sistema, las cuales tienen como propósito evaluar proyectos, programas y estrategias de conservación y mejoramiento de carreteras, y la optimización de programas en presencia de restricciones presupuestales. A continuación se describe brevemente cada de las aplicaciones específicas disponibles en el HDM-4 [Kerali, 2000].

1. **Análisis de proyectos.** Se refiere a la evaluación de alternativas de proyecto para la conservación y mejoramiento de un conjunto de tramos, durante un periodo de análisis determinado. El sistema compara las alternativas empleando indicadores de rentabilidad

económica, los cuales obtiene a partir de los costos y beneficios anuales de cada alternativa.

2. **Análisis de programas.** Consiste básicamente en jerarquizar una lista de proyectos candidatos de acuerdo con su nivel de rentabilidad, a fin de obtener un programa de obra anual o multianual que cumpla con las restricciones presupuestales de la organización en el periodo considerado.

En términos generales, el análisis de programas permite obtener una combinación de opciones de proyecto que maximizan el rendimiento económico de las inversiones, tomando en cuenta las limitaciones de recursos existentes.

3. **Análisis de estrategias.** Tiene como propósito evaluar políticas de largo plazo para la conservación y mejoramiento de una red o subred de carreteras. Entre los problemas específicos que pueden resolverse con este tipo de análisis se encuentra el cálculo de los montos de inversión necesarios para lograr un determinado nivel de servicio en la red, determinar el estado futuro de la red para los niveles de inversión actuales, y evaluar estándares de conservación, entre otros.

De lo expuesto en este inciso, y con referencia a la descripción de los sistemas de gestión de pavimentos presentada en 3.1, se puede concluir que el HDM-4 abarca las componentes relativas a las *herramientas de análisis*; es decir, modelos y procedimientos para predecir del deterioro de pavimentos; la evaluación de políticas y proyectos de conservación; mejoramiento, formulación y

optimación de programas de obra; y evaluación del impacto de distintas estrategias de desarrollo carretero en el comportamiento de la red.

Por lo anterior, el HDM-4 puede considerarse un producto de gran utilidad para la integración de sistemas de gestión de pavimentos, ya que provee varias de las componentes más importantes de los mismos.

Sin embargo, es necesario enfatizar que el HDM-4 no puede constituir por sí sólo un sistema de gestión de pavimentos al carecer de componentes esenciales, como el manejador de bases de datos y de otras que no pueden implementarse a través de un sistema de cómputo; por ejemplo sistema de referencia o los procedimientos y previsiones institucionales para levantamiento y actualización de datos.

3.1.2.4 Información Necesaria para Incorporar al Sistema

La utilización del sistema HDM-4 como herramienta de ayuda para la definición de estrategias, programas y proyectos de conservación, conlleva una serie de trabajos previos de incorporación de datos al sistema.

Fundamentalmente se deben disponer de información sobre:

- ✓ *Los tramos de carretera que forman la red, será necesario disponer de datos sobre sus características geométricas, su estado de deterioro, y su nivel de tráfico y las previsiones de crecimiento del mismo así como su distribución horaria.*

- ✓ *La composición del parque de vehículos*, definiéndose para los distintos tipos, las características físicas y de utilización así como la valoración económica de los distintos componentes del vehículo y el valor del tiempo de los usuarios de los mismos.
- ✓ *Los estándares de conservación y mejora de las carreteras*, definiéndose para los mismos cuáles son los efectos sobre el estado de la carretera, y una valoración económica de su costo unitario.
- ✓ Por último debe disponerse de información sobre las *características climáticas de la zona en estudio*.

3.1.2.5 Pasos Prácticos para la Aplicación del HDM-4

El modelo HDM-4 necesita de los siguientes grupos de información, para poder llevar a cabo un análisis económico de la conservación y planificación de una red de carreteras.

- ✓ Red de Carreteras. Recopilación de información referente a las características geométricas de los tramos analizados, a su estado actual (Regularidad superficial, deterioros y capacidad estructural) y a las características del tráfico (intensidades y distribución por tipos de vehículos)
- ✓ Parque de Vehículos. Análisis de información referente a las características de los distintos automóviles existentes en la red, definiéndose tanto sus características técnicas como los costos derivados de su uso.

- ✓ Estándares. Estudio de distintas alternativas de posibles actuaciones en la carretera, determinándose junto con ellas, distintas políticas de actuación así como los costos de las mismas.

Los datos requeridos por el modelo provienen de diversas fuentes:

- ✓ Datos generales de las carreteras, como lo son sección transversal, tráfico, sección estructural, descriptivos de la red de carreteras, etc.
- ✓ Características del estado de la carretera, datos provenientes de campañas de auscultación, siendo estos: datos de regularidad, textura, ahuellamiento, entre otros.
- ✓ Por último, los datos referentes a diversas posibles políticas de actuación, clasificación del parque de vehículos, costos de operación de vehículos, etc.

3.1.2.6 Niveles de Información

El modelo HDM-4 utiliza el concepto de “Niveles de Calidad de la Información”, contenido en el informe INU 77 del Banco Mundial: “Information Systems for Road Management: Draft Guidelines on System design and Data Issues”. En este se reconoce que diversas áreas de una administración vial requieren diferentes tipos de datos, y aunque algunos de ellos pueden ser de uso común, el nivel de detalle, precisión y escala requerido generalmente varía entre las aplicaciones.

3.1.2.6.1 Niveles de Funcionales

La clasificación de la información de acuerdo a niveles funcionales es la siguiente:

- ✓ Sectorial. Aquí se toma el sistema vial como un todo, sin hacer distinciones espaciales, excepto para respetar algunas divisiones geográficas. Este es el nivel que usa el gobierno y el público para los presupuestos y estadísticas sobre cobertura, extensión y niveles de servicio.
- ✓ Red. En este nivel las carreteras se visualizan como un conjunto de enlaces con sus correspondientes características físicas, de demanda de tráfico, funcionales y jurisdiccionales.
- ✓ Proyecto. Este es el apropiado durante las etapas de diseño y construcción. El principal objetivo es la selección de la solución apropiada y la identificación de su ubicación y extensión. La cantidad de detalles necesarios para especificar el trabajo a realizar depende de la complejidad de la obra y el nivel de riesgo aceptable.
- ✓ Operaciones. Requiere información de inventario de personal, materiales, equipos y dispositivos de control, indicadores de productividad y funcionamiento, desembolsos y progreso físico.
- ✓ Investigación. Los datos necesarios son más detallados que en los niveles de proyecto y operaciones, generalmente son específicos para el estudio y sirven para establecer factores de calibración, pueden usarse en análisis de proyectos.

3.1.2.6.2 Nivel de Detalle en los datos

Como puede observarse en la clasificación en niveles funcionales, el grado de detalle de los datos aumenta progresivamente, desde las estadísticas empleadas en el nivel sectorial, pasando por la planificación, programación y diseño hasta llegar a la investigación. De igual manera, los métodos para la recolección de datos se hacen más complejos para lograr esa mayor calidad en la información. Esto nos lleva a una segunda definición de niveles de calidad de la información; la cual tiene en consideración los rangos de requisitos de información así como las metodologías empleadas en la recolección de datos.

- ✓ Nivel I: Es el más completo en cuanto a detalles, se usa para investigación fundamental y como referencia para otros métodos de medición. Se puede usar además en investigaciones de campo, para el diagnóstico de problemas y para proyectos con diseños de alto nivel. Requiere una alta capacitación de personal y una buena disponibilidad de recursos institucionales para poder ejecutar sus métodos de recolección de datos.

- ✓ Nivel II: Posee el grado suficiente de detalle para modelos de programación bastante elaborados y para métodos de diseño estándar. Es suficiente para apreciar el desempeño y beneficios económicos de diferentes alternativas técnicas. Por lo general, utiliza métodos de captura automática de datos para inventarios a nivel de red y para la programación en dicho nivel.

- ✓ Nivel III: Sirve en modelos de planificación y para modelos estándares de programación con cobertura para toda la red vial. En diseño, satisface métodos sencillos como los basados en catálogos con pocos datos de entrada; es aplicable también en diseño de puentes y caminos con bajo volumen de tráfico. La recolección de datos se puede hacer con métodos semiautomáticos o mediante la combinación de métodos automáticos y manuales.

- ✓ Nivel IV: Representa estadísticas resúmenes básicas de inventario, desempeño y utilización de interés para proveedores y usuarios. Refleja los métodos más simples para la recolección de datos, ya sea manualmente o con ayuda de mecanismos semiautomáticos. Las mediciones efectuadas son directas pero aproximadas, siendo adecuadas para administraciones pequeñas que cuentan con escasos recursos.

3.1.2.6.3 Niveles Usados en Análisis HDM-4

El nivel de calidad de información que se considera suficiente para un Análisis de Proyecto es el Nivel II, mientras que en los Análisis de Estrategia y de Programa se usa generalmente un Nivel III.

***CAPITULO IV
MODELOS DE
DETERIORO DE LOS
PAVIMENTOS POR HDM-4***

4.1. MODELOS DE DETERIORO DE PAVIMENTOS EN HDM-4

En el desarrollo de los modelos de deterioro del HDM-III se adoptó un enfoque *empírico estructurado*, el cual consistió en identificar la forma funcional y las principales variables a partir de fuentes externas, y en evaluar sus impactos utilizando diversas técnicas estadísticas. De esta manera, se logró combinar en las relaciones obtenidas las bases teóricas y experimentales de los modelos mecanicistas con los comportamientos observados en estudios empíricos. Puesto que los modelos de deterioro del HDM-III constituyeron la base para la integración de los modelos correspondientes en el HDM-4, estos últimos mantuvieron el carácter empírico estructurado de los primeros.

A fin de ampliar el rango de aplicación de los modelos a regiones con condiciones distintas a las de los sitios en los que se desarrollaron los estudios empíricos considerados, se ha incorporado a las distintas relaciones una serie de factores de calibración diseñados para modificar la escala de los resultados.

Desde el punto de vista de la naturaleza de los resultados pronosticados, los modelos de deterioros del HDM-4 se dividen en dos tipos, *absolutos* y *de incrementos*. Los modelos absolutos predicen la magnitud de los deterioros al final de un determinado periodo, en tanto que los modelos de incrementos calculan el cambio en la magnitud con respecto a un valor inicial. En términos generales, los modelos de deterioro para pavimentos asfálticos se clasifican como modelos de incrementos.

La forma de los modelos es incremental, es decir que predicen el cambio en la condición del pavimento a lo largo de un cierto incremento de tiempo como función de la condición actual del pavimento, de sus características estructurales y de las sollicitaciones externas (tránsito y condiciones climáticas), tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$\Delta(\text{deterioro futuro tras incremento de tiempo}) = f(\text{condición actual, cargas y volumen de tránsito, resistencia del pavimento, colima y mantenimiento aplicado})$$

Dentro de la estructura de HDM-4 se mencionaron tres modelos como los que trabaja el programa.

- ✓ Deterioro de Carretera y Efecto de las Obras (RDWE)
- ✓ Efectos para los Usuarios (RUE)
- ✓ Efectos Sociales y Medioambientales (SEE)

El modelo que trabaja con el deterioro de pavimentos es el RDWE y lo hace por medio de los modelos empíricos y mecanicistas y se basan en parámetros que son difíciles de cuantificar en el terreno de trabajo. Los modelos empíricos se basan en análisis estadísticos que utilizan la información obtenida de la observación del deterioro del pavimento y es difícil de aplicar a otros escenarios que no presenten las mismas condiciones con que se hizo el análisis.

Para minimizar el problema Paterson (1987) utilizó un método empírico estructural para generar los modelos que se trabajaron en HDM III. De esta forma se hacía un estudio de la forma funcional y las variables primarias de los impactos. Así, los modelos resultantes tenían una ventaja ya que trabajaban con las bases teóricas y experimentales de los modelos mecanicistas y el comportamiento observado con las técnicas empíricas.

La misma línea de trabajo se utilizó para los modelos de HDM-4 y sus características hacen parte de lo que es el modelo RDWE que dentro de sus variables de trabajo.

4.2. FACTORES QUE INCIDEN EN LA CONFIABILIDAD DE LOS MODELOS DE DETERIORO

Entre los principales factores que determinan el deterioro de los pavimentos, pueden mencionarse:

- ✓ Aspectos climatológicos
- ✓ Solicitaciones del tránsito
- ✓ Historial de reparaciones del pavimento
- ✓ Diseño geométrico
- ✓ Diseño estructural

En los siguientes párrafos se describen a grandes rasgos las variables utilizadas por el HDM-4 para modelar el impacto de los factores anteriores.

4.2.1. FACTORES CLIMATOLOGICOS

El HDM-4 incorpora al análisis los aspectos climatológicos mediante parámetros relacionados con la humedad y la temperatura, los cuales se establecen a partir de las Tablas 4.1 y 4.2. Para caracterizar las condiciones de humedad se utilizan variables que describen la precipitación y la humedad libre en la zona de estudio, mientras que las condiciones de temperatura se especifican con base en promedios anuales, rangos de variación mensual y número de días con temperaturas por arriba de un cierto límite.

Específicamente, el sistema considera los siguientes parámetros relacionados con la humedad, además de la precipitación media mensual:

- ✓ *Índice de humedad.* Este parámetro está basado en el índice de Thornthwaite e indica que tan seco o húmedo es una zona climática determinada.
- ✓ *Duración de la estación seca.* Este indicador divide al año en dos estaciones y se indica como fracción del mismo.

En lo que se refiere a la temperatura, incluyendo a la temperatura media mensual, el HDM-4 utiliza las siguientes variables:

- ✓ *Rango promedio de temperaturas.* Es el rango que comprende todas las temperaturas medias mensuales del año, o la diferencia entre la máxima y la mínima temperatura media mensual, de cada uno de los meses del año.
- ✓ *Días con temperaturas mayores a 32° C.* Número de días en el año, en los cuales la temperatura ambiente excede los 32° C.

Tabla 4.1: Clasificación por humedad.

CATEGORIA	PRECIPITACION MEDIA ANUAL (mm)
Árido	< 300
Semiárido	de 300 a 800
Subhúmedo	de 800 a 1600
Húmedo	de 1500 a 3000
Muy húmedo	> 2400

Tabla 4.2: Clasificación por temperatura.

CATEGORIA	PROMEDIO ANUAL DE RANGOS DE TEMPERATURA (mm)
Tropical	20 a 35
Subtropical Cálido	- 5 a 45
Subtropical Frío	- 10 a 30
Templado Frío	- 20 a 25
Templado con Congelamiento	-40 a 20

4.2.2. SOLICITACIONES DE TRANSITO

El HDM-4 utiliza los siguientes parámetros para representar el tránsito:

- 1) Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA). En el caso de caminos con un carril por sentido, se calcula como el total del tránsito aforado en los dos sentidos del tramo en estudio, dividido entre los 365 días del año. En carreteras con más de un carril por sentido, suele calcularse el TPDA que corresponde a cada sentido.
- 2) Composición Vehicular. Se expresa en términos de los porcentajes de participación de los diferentes tipos de vehículos que utilizan el camino, con respecto al TPDA.
- 3) Tasa de Crecimiento. Normalmente, corresponde a un porcentaje de incremento anual del TPDA.
- 4) Número Total de Ejes. Es el número total de ejes que cruzan determinada sección del tramo en estudio durante un año. Se calcula con la expresión:

$$YAX = \sum_{k=1}^k \frac{T_k \cdot NUM_AXLES_k}{ELANES * 10^6}$$

Donde:

- YAX: número total anual de ejes
- K: número de tipos de vehículo considerados
- T_k: volumen anual de tránsito del vehículo tipo
- NUM_AXLES_k: número de ejes por vehículo tipo *k*
- ELANES: número efectivo de carriles en la sección Carretera

- 5) Ejes Equivalentes. En el HDM-4 se definen como el número total de aplicaciones de un eje sencillo dual estándar de 80kN, que provocarían el mismo daño al camino, durante un año, que los ejes del vehículo considerado. Para su cálculo se utilizan factores de carga de eje equivalente estándar (ESALF, por las siglas Equivalent Standard Axie Load Factor), los cuales se calculan con la expresión:

$$ESALFK = \prod_{i=1}^{I_k} \frac{P_{ki}}{100} \prod_{j=1}^{J_k} \frac{AXL_{kj}^{LE}}{SAXL_j}$$

Donde:

- ESALF_k: factor de eje de carga equivalente estándar para el vehículo tipo *k*, en ejes equivalentes.
- I_k: número de subgrupos *i* (definidos por rangos de carga) para el vehículo tipo *k*. Nótese que *i* puede representar a cada vehículo individual.
- P_{ki}: porcentaje de unidades en el subgrupo *i* del vehículo tipo *k*. Si *i* representa cada vehículo individual, entonces P_{ki}= 100%.
- LE: exponente de equivalencia de carga. El valor por omisión utilizado es 4.0.

- J_k : número de ejes sencillos para el vehículo tipo k .
- AXL_{kj} : carga promedio en el eje j del rango de carga i en el vehículo tipo k .
- SAX_{Lj} : Carga estándar del eje tipo j , por ejemplo, 6.6 t para eje sencillo con rueda sencilla, 8.16 t para eje sencillo con rueda doble, etc.

El total anual de ejes equivalentes, se calcula como:

$$YE4 = \sum_{k=1}^k \frac{T_k ESALF_k}{ELANES * 10^6}$$

Donde:

- YE4: número anual de ejes equivalentes (millones por carril).

4.2.3. HISTORIAL DE REPARACIONES

Se refiere a las acciones de mantenimiento, rehabilitación y construcción que se han efectuado en el camino a lo largo del tiempo. El HDM-4 toma en cuenta este factor mediante los siguientes parámetros relacionados con la antigüedad de los trabajos:

AGE1: Tiempo transcurrido en años desde el último tratamiento preventivo, sello, sobre capeta, reconstrucción, o construcción nueva.

AGE2: Tiempo transcurrido en años desde el último sello, sobre carpeta, reconstrucción o construcción nueva.

AGE3: Tiempo transcurrido en años desde la última sobre carpeta, reconstrucción o construcción nueva.

AGE4: Tiempo transcurrido en años desde la última reconstrucción o construcción nueva.

4.2.4. DISEÑO GEOMETRICO

En este rubro se incluyen parámetros como los anchos de carril y hombros, el alineamiento horizontal (expresado en términos de la curvatura media del tramo, y el promedio de sobre-elevación en curvas), y el alineamiento vertical (caracterizado por el número de ascensos y descensos en el tramo, y el desnivel medio del mismo).

4.2.5. CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES DEL PAVIMENTO

La capacidad estructural del pavimento se define mediante variables como el número estructural, deflexiones, espesores de capas, tipos de material y rigidez de la subrasante.

4.3. TIPOS DE PAVIMENTOS CONSIDERADOS.

Los modelos de deterioro del HDM-4 permiten analizar el comportamiento de una amplia gama de pavimentos asfálticos e hidráulicos. Para ello, se utilizan variantes de los modelos específicos en la estimación de cada tipo de daño, o se modifican los coeficientes de los mismos. El HDM-4 clasifica los pavimentos asfálticos en función del tipo de superficie y del tipo de base, como puede apreciarse en la Tabla 4.3 y en la cual se resaltan los pavimentos que nos conciernen en esta investigación.

Tabla 4.3: Clasificación de los pavimentos en el HDM-4

Clase de Superficie	Tipo de Pavimento	Tipo de Superficie	Tipo de Base	Descripción
Bituminoso	AMGB	AM	GB	Mezcla asfáltica sobre base granular
	AMAB		AB	Mezcla asfáltica sobre base asfáltica
	AMSB		SB	Mezcla asfáltica sobre base estabilizada
	AMAP		AP	Mezcla asfáltica sobre pavimento asfáltico
	STGB	ST	GB	Tratamiento superficial sobre base granular
	STAB		AB	Tratamiento superficial sobre base asfáltica
	STSB		SB	Tratamiento superficial sobre base estabilizada
	STAP		AP	Tratamiento superficial sobre pavimento asfáltico
Hidráulico	JPGB	JP	GB	Concreto hidráulico con juntas sobre base granular
	JPAB		AB	Concreto hidráulico con juntas sobre base asfáltica
	JPSB		SB	Concreto hidráulico con juntas sobre base estabilizada
	JRGB	JR	GB	Concreto hidráulico con refuerzo discontinuo sobre base granular
	JRAB		AB	Concreto hidráulico con refuerzo discontinuo sobre base asfáltica
	JRSB		SB	Concreto hidráulico con refuerzo discontinuo sobre base estabilizada
	CRGB	CR	GB	Concreto hidráulico con refuerzo continuo sobre base granular
	CRAB		AB	Concreto hidráulico con refuerzo continuo sobre base asfáltica
	CRSB		SB	Concreto hidráulico con refuerzo continuo sobre base estabilizada

4.4. MODELOS DE DETERIOROS EN HDM-4 PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES

El HDM-4 modela el deterioro de pavimentos mediante los siguientes tipos:

4.4.1 DETERIOROS SUPERFICIALES

En esta categoría se incluyen:

- ✓ Agrietamiento
- ✓ Desprendimientos o peladuras
- ✓ Baches
- ✓ Desintegración de borde.

De los deterioros anteriores, los tres primeros se caracterizan por dos fases, denominadas de inicio y de progreso. La fase de inicio se refiere al lapso de tiempo previo al desarrollo de un determinado tipo de deterioro. La fase de progreso comprende el periodo durante el cual se incrementa el área afectada y la magnitud del deterioro. La desintegración de borde se modela considerando únicamente la fase de progreso.

4.4.2 DETERIOROS RELACIONADOS CON LA DEFORMACION DEL PAVIMENTO

En el HDM-4, la deformación de la estructura del pavimento se modela con:

- ✓ Ahuellamientos
- ✓ Irregularidad

Se considera que este tipo de deterioros varían en forma continua, por lo que sólo se modelan mediante ecuaciones de progreso.

4.4.3 DETERIOROS RELACIONADOS CON LA TEXTURA SUPERFICIAL

Están relacionados con la capacidad del pavimento para evitar el deslizamiento de vehículos, particularmente en presencia de agua sobre la superficie. Para evaluar el estado del pavimento en este rubro, el HDM-4 utiliza los siguientes indicadores:

- ✓ Profundidad de la textura
- ✓ Resistencia al deslizamiento

Los parámetros anteriores también varían en forma continua, por lo que, como las ahuellamientos o la irregularidad, sólo se modelan mediante ecuaciones de progreso.

El HDM-4 modela cada uno de los deterioros anteriores en forma separada, sin embargo, en última instancia, combina los resultados para obtener un pronóstico de la irregularidad del pavimento.

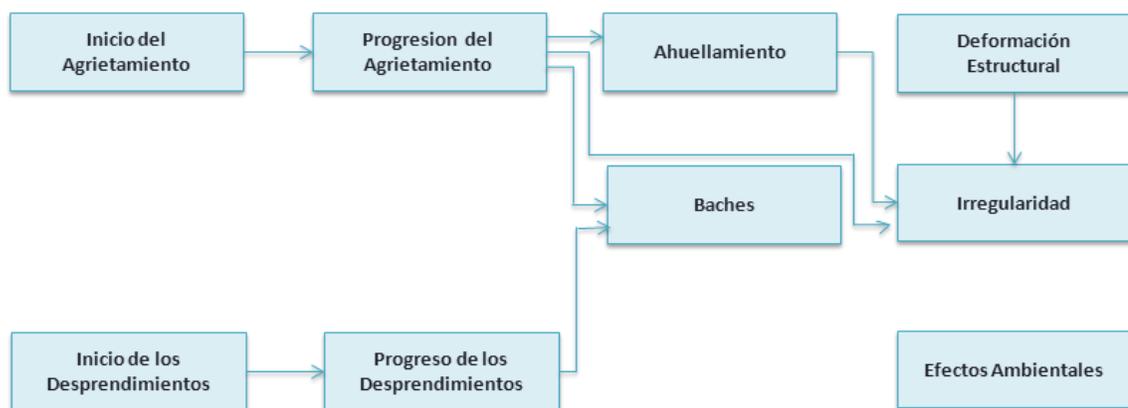


Figura 4.1 Interacción entre los modelos de deterioro del HDM-4 para Pavimentos Asfálticos

4.4.4 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

La aplicación de los modelos de deterioro incluye, también, una estimación de la pérdida de capacidad estructural del pavimento en el tiempo y del deterioro del drenaje. En la Figura 4.1 se muestran las interacciones entre los modelos utilizados para predecir los tipos de deterioro considerados y en la Figura 4.2 el procedimiento a seguir para la predicción de deterioro.

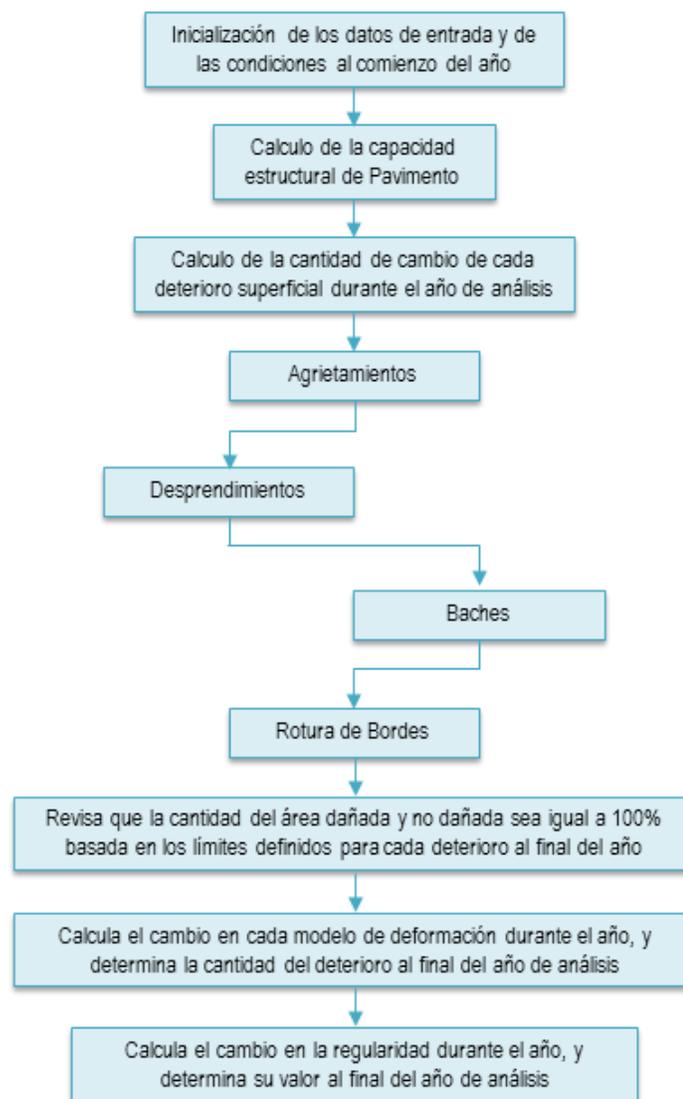


Figura 4.2 Procedimiento para la predicción de deterioro.

El HDM-4 calcula el deterioro de pavimentos sobre una base anual, antes de analizar los efectos de las acciones de conservación y mejoramiento propuestas por el usuario. En términos generales, la estimación de afectación anual puede expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Condición}_b = \text{condición}_a + \Delta\text{condición}$$

$$\text{Condición}_{prom} = 0.5 (\text{condición}_a + \text{condición}_b)$$

Donde:

Condición_b : condición al final del año de análisis

Condición_a : condición al inicio del año de análisis

Δcondición : cambio de la condición en el año de análisis

Condición_{prom}: condición promedio en el año de análisis

El procedimiento de cálculo involucrado en la predicción del deterioro puede dividirse las siguientes fases: a) Cálculo de la capacidad estructural del pavimento; b) Evaluación del cambio en los deterioros superficiales; c) Obtención del área dañada; d) Cálculo del cambio en la profundidad de ahuellamientos; e) Obtención del IRI al final del año.

4.4.4.1 Capacidad Estructural del Pavimento.

La resistencia del pavimento se basa en el concepto del número estructural, (SNP), el cual se ha derivado del número estructural modificado. En el número estructural, cada capa tiene un aporte de resistencia al pavimento; la resistencia disminuye mientras más inferior sea la capa.

El número estructural en el HDM-4 se calcula de la siguiente manera:

$$SNP_s = SNBASU_s + SNSUBA_s + SNSUBG_s$$

$$SNBASU_s = 0.0394 \sum_{i=1}^n a_{is} h_i$$

$$SNSUBA_s = 0.0394 \sum_{j=1}^m a_{js} \left[\frac{b_0 e^{-b_3 z_j}}{-b_3} + \frac{b_1 e^{-b_2 + b_3 z_j}}{b_2 + b_3} - \frac{b_0 e^{-b_3 z_{j-1}}}{-b_3} + \frac{b_1 e^{-b_2 + b_3 z_{j-1}}}{b_2 + b_3} \right]$$

$$SNSUBG_s = b_0 - b_1 e^{-b_2 z_m} - b_3 e^{-b_3 z_m} - 3.511 \log_{10} CBR_s - 0.85 (\log_{10} CBR_s)^2 - 1.43$$

Donde:

- SNP_s : Número estructural ajustado en la estación s¹
- $SNBASU_s$: Contribución de la capa superficial y de base para la estación s
- $SNSUBA_s$: Contribución de la Sub-base, o de distintas capas de relleno seleccionadas para la estación s
- $SNSUBG_s$: Contribución del terreno natural para la estación s
- N : Número de capas de base y superficiales (i=1,2,..., n)
- a_{is} : Coeficientes de capa i de base o superficial para la estación s
- h_i : Espesor de la capa i de base o superficial (mm)
- m : Número de capas de sub-base y de relleno seleccionadas (j=1,2,..., n)
- z : Profundidad medida en la parte más alta de la sub-base (mm)
- z_j : Profundidad a la parte más baja de la capa j ($z_0=0$)
- CBR_s : VRS del terreno natural *in situ* para la estación s
- a_{js} : Coeficientes de capa para sub-base, o seleccionada de relleno en la estación s

¹ El sistema considera dos estaciones, seca y húmeda

b_0, b_1, b_2, b_3 : Coeficientes del modelo

La ecuación anterior:

$$S_{NSUBG_s} = b_0 - b_1 e^{-b_2 x_{1m}} e^{-b_3 x_{1m}} 3.511 \log_{10} CBR_s - 0.85 (\log_{10} CBR_s)^2 - 1.43$$

Predice los valores negativos para la contribución de la plataforma de base debajo CBR = 3. Esto es diferente a HDM-III donde los valores fueron fijados a 0 y refleja el impacto perjudicial de plataformas de base débiles en funcionamiento del pavimento.

Tabla 4.4: Coeficientes de resistencia de las capas de pavimento.

CAPA	TIPO DE CAPA	CONDICION	COEFICIENTE
Superficie	ST	Usualmente 0-2	$a_1 = 0.20$ a 0.40
	AM	$h_i < 30$ mm, baja estabilidad y mezclas en frío	$a_1 = 0.20$
		$h_i > 30$ mm, $MR_{30} = 1500$ Mpa	$a_1 = 0.30$
		$h_i > 30$ mm, $MR_{30} = 2500$ Mpa	$a_1 = 0.40$
		$h_i > 30$ mm, $MR_{30} = 4500$ Mpa	$a_1 = 0.45$
Base	GB	Por defecto	$a_1 = (29.14 CBR - 0.1977 CBR^2 + 0.00045 CBR^3) 10^{-4}$
		$CBR > 70$, subbase cementada	$a_1 = (29.14 CBR - 0.1977 CBR^2 + 0.00045 CBR^3) 10^{-5}$
		$CBR < 60$, max carga de eje 80 kN	$a_1 = 0$
	AB, AP	Agregado de granulometría gruesa con alta dureza	$a_1 = 32$
	SB	Cal o cemento	$a_1 = 0.075 + 0.039 UCS - 0.00088 (UCS)^2$
Sub base		Granular	$a_1 = -0.075 + 0.184 (\log_{10} CBR) - 0.0444 (\log_{10} UCS)^2$
		Cementado $UCS > 0.7$ Mpa	$a_1 = 0.14$

Fuente: *Watanatada et al. (1987)*

Nota:

- La tabla reproduce la información de la fuente, a excepción del coeficiente granular de la base inferior
- Si el usuario obtiene un valor de CBR para una capa estabilizada (cal o cemento), el coeficiente granular correspondiente debe ser utilizado.
- La fuerza compresiva sin límites (UCS) obtenida en el MPa en 14 días
- MR_{30} es el módulo resistente por la prueba indirecta de tensión a 30°C

Tabla 4.5: Coeficientes de número estructural ajustados al modelo

TIPO DE PAVIMENTO	b_0	b_1	b_2	b_3
Todos los tipos de pavimentos	1.6	0.6	0.008	0.00207

4.4.4.2 Efectos estacionales y de drenaje

A fin de considerar las variaciones en la resistencia del pavimento provocadas por cambios estacionales, el HDM-4 toma en cuenta en los modelos de deterioro tanto factores climáticos como el estado del drenaje. Como parámetro representativo de la capacidad estructural del pavimento se utiliza la resistencia anual promedio, la cual se estima a partir de los valores correspondientes a las estaciones seca y húmeda, como se indica a continuación:

$$SNP = f_s SNP_d$$

$$f_s = \frac{f}{1 - d + d(f^p)^{\frac{1}{p}}}$$

Donde:

SNP : Número estructural ajustado promedio anual

SNP_d : Número estructural en la estación seca

- f : Relación entre el número estructural de la estación húmeda y la seca
- d : Duración de la estación seca como parte del año
- p : Exponente del número estructural (depende del modelo que se utilice: inicio agrietamiento, deformación estructural, etc.)

Tabla 4.6: Valores de exponente p para calcular SNP

DETERIORO	MODELO	p
Grietas	Iniciación de grietas estructurales	2
Ahuellamiento	Densidad inicial	0.5
	Deformación estructural	1
rugosidad IRI	Componente estructural	5

Cuando se conoce únicamente el valor del número estructural de una estación, el HDM-4 utiliza la siguiente ecuación para calcular la relación entre el SNP de la estación seca y la de la estación húmeda; esta expresión se aplica para cada año del periodo de análisis, tomando en cuenta factores como precipitación, estado del drenaje y agrietamiento:

$$f = K_f \left[1 - \frac{1 - e^{-\alpha_1 MMP}}{\alpha_1} \right] \left[1 + \alpha_2 DF_a (1 + \alpha_3 ACRA_a + \alpha_4 APOT_a) \right]$$

Donde:

- f : Relación entre el número estructural de la estación húmeda y la seca
- MMP : Precipitación media mensual
- DF_a : Factor del drenaje al inicio del año
- $ACRA_a$: Área total de agrietamiento al inicio del año de análisis
- K_f : Factor de calibración
- a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 : Coeficientes

Tabla 4.7: Valores de coeficientes por defecto para cociente estacional SNP

COEFICIENTE	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Valor por defecto	- 0.01	10	0.25	0.02	0.05

El factor de drenaje, DF , representa la condición del drenaje; dentro del software, este factor se introduce mediante valores cualitativos (excelente, bueno, regular, etc.), en función de los cuales se selecciona un valor apropiado para DF . Este factor también depende del tipo de dren más común en el tramo analizado.

La capacidad estructural del pavimento también puede definirse en el programa a través de valores de deflexión medidos con Viga Benkelman o con deflectómetro de impacto.

El HDM-4 utiliza la siguiente expresión para calcular el valor del número estructural a través de la medición de la deflexión.

$$SNP_s = 3.2(DEF_s)^{-0.63} + dSNPK \quad \text{Para bases no estabilizadas}$$

$$SNP_s = 2.2(DEF_s)^{-0.63} + dSNPK \quad \text{Para bases estabilizadas}$$

Donde:

SNP_s : Número estructural ajustado en la estación s

DEF_s : Deflexión de la viga Benkelman bajo una carga de 80kN, con una presión de llanta de 520kPa, y una temperatura promedio del asfalto de 30°C para la estación s

Cuando se desea usar el valor de la deflexión medida con el deflectómetro de impacto el HDM-4 utiliza la misma ecuación anterior pero con el dato medido en el centro del deflectómetro a 700kPa. Este valor se considera equivalente a la deflexión medida con viga Benkelman.

4.4.4.3 Agrietamiento

Es uno de los deterioros más importantes en los pavimentos asfálticos. La fatiga y el envejecimiento son dos de los principales factores que contribuyen a la generación de este tipo de afectación. La propagación del agrietamiento puede acelerarse debido al envejecimiento y al ingreso de agua en las grietas ya producidas; lo cual se traduce también en un deterioro de las capas subyacentes. El análisis del agrietamiento está conformado por dos etapas: la de inicio y la de progreso; además, el HDM-4, considera dos tipos de agrietamiento, el llamado agrietamiento *estructural*, y el agrietamiento *transversal por temperatura*. El primero, se subdivide en *agrietamiento total*, independientemente de su magnitud y agrietamiento ancho, sólo considera grietas mayores de 3 mm. Y el segundo, son las grietas debidas a cambios de congelamiento y deshielo, condiciones que no son realidad en ninguna zona de nuestro país, por lo que se excluyen del análisis de los modelos de deterioro.

En el caso en que no exista una carpeta colocada previamente y para bases no estabilizadas, el HDM-4 utiliza la siguiente ecuación para calcular el inicio del deterioro.

Inicio del agrietamiento total:

$$ICA = K_{\sigma i \alpha} CDS^2 a_0 e^{\alpha_1 NVP + \alpha_2 \frac{YE4}{NVP^2}} + CRT$$

Inicio del agrietamiento ancho:

$$ICW = K_{\sigma iw} MAX (a_0 + \alpha_1 ICA), \alpha_2 ICA$$

Donde:

<i>ICA</i> :	Tiempo en años para el inicio del agrietamiento total
<i>ICW</i> :	Tiempo en años para el inicio del agrietamiento ancho
<i>CDS</i> :	Indicador de defectos de la construcción para superficies asfálticas
<i>YE4</i> :	Número anual de ejes equivalentes
<i>SNP</i> :	Número estructural promedio
<i>CRT</i> :	Retardo en la aparición de grietas debido al mantenimiento

Progreso del agrietamiento total:

$$dACA = K_{cpa} \frac{CRP}{CDS} Z_A a_0 a_1 \delta t_A + SCA^{a_1 - 1} a_1 - SCA$$

Progreso del agrietamiento ancho:

$$dACW = K_{cpw} \frac{CRP}{CDS} Z_W a_0 a_1 \delta t_W + SCA^{a_1 - 1} a_1 - SCW$$

$$\delta t_W = \text{MAX } 0, \text{MIN } AGE2 - ICW, 1$$

Donde:

<i>dACA</i> :	Incremento en el área del agrietamiento total durante el año de análisis
<i>dACW</i> :	Incremento en el área del agrietamiento ancho durante el año de análisis
<i>ACA_a</i> :	Área del agrietamiento total al inicio del año de análisis
<i>ACW_a</i> :	Área del agrietamiento ancho al inicio del año de análisis
δt_a :	Fracción del año de análisis, en la cual ocurre el progreso del agrietamiento total
δt_w :	Fracción del año de análisis, en la cual ocurre el progreso del agrietamiento ancho

AGE2:	Edad del pavimento desde el último resello, sobre-carpeta, reconstrucción o nueva construcción
ICA:	Tiempo para el inicio del agrietamiento total
ICW:	Tiempo para el inicio del agrietamiento ancho
CRP:	Retardo en el progreso del agrietamiento, debido al tratamiento preventivo

4.4.4.4 Bache

Un bache se desarrolla por lo regular en una superficie agrietada o con desprendimientos. La presencia de agua acelera su formación y provoca un debilitamiento de la estructura del pavimento. El HDM-4 expresa los baches en términos de baches unitarios con un volumen de 10ℓ (área circular de 0.1 m² y profundidad de 10 cm).

Inicio de baches:

$$IPT = K_{rid} a_0 \frac{1 + a_1 HS}{1 + a_2 CDB \quad 1 + a_3 YAX \quad (1 + a_4 MMP)}$$

Donde:

<i>IPT</i> :	Tiempo entre el inicio del agrietamiento ancho o los desprendimientos y la aparición de baches, en años
<i>HS</i> :	Espesor total de las capas asfálticas
<i>CDB</i> :	Indicador de defectos de la base
<i>YAX</i> :	Número anual de ejes de todos los vehículos motorizados
<i>MMP</i> :	Precipitación media mensual
<i>K_{rid}</i> :	Factor de calibración del modelo inicio de baches

El HDM-4 calcula por separado los tiempos de aparición de los baches por agrietamientos y por desprendimientos.

Progreso de los baches:

En el análisis del progreso de los baches, el HDM obtiene también por separado las cantidades que corresponden a los distintos precursores de este fenómeno, en este caso agrietamiento, desprendimientos y ensanchamiento de los baches existentes. El progreso de los baches puede aminorarse mediante la ejecución oportuna de acciones de conservación, por lo que este factor se toma en cuenta con el parámetro TLF.

El HDM utiliza las siguientes expresiones para la estimación del progreso de baches:

$$dNPT_t = K_{pp} a_0 ADIS_t (TLF) \frac{1 + a_1 CDB) 1 + a_2 YAY (1 + a_3 MMP}{(1 + a_4 HS)}$$

$$dNPT = \sum_{t=1}^3 dNPT_t$$

Donde:

- $dNPT_t$: Incremento en el número de baches por kilómetro, derivados del deterioro tipo I, (agrietamiento ancho, desprendimientos, ensanchamientos) durante el año de análisis
- $ADIS_t$: Porcentaje de área con agrietamiento ancho o desprendimientos, o número de baches al inicio del año de análisis
- TLF : Factor tiempo, debido al mantenimiento de baches
- $dNPT$: Número total de baches generados en el año de análisis

K_{pp} : Factor de calibración del modelo de progreso de baches

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 : Coeficientes que dependen del tipo de pavimento y del origen de los baches

4.4.4.5 Desprendimiento de Borde.

El desprendimiento de borde puede ser definido como la pérdida de la carpeta de rodadura y de los materiales base del borde del pavimento

$$dVEB = K_{eb} a_0 PSH (AADT)^2 ESTEP S^{a_1} a_2 + \frac{MMP}{1000} 10^{-6}$$

Y

$$PSH = \text{MAX} \text{ MIN} \text{ MAX} a_3 + a_4 CW_i \frac{CW_{max} - CW}{a_5} 1, 0$$

Donde:

dVEB pérdida anual de material de borde (m³/km)

PSH porción de tiempo de uso de hombro como pista.

AADT tráfico promedio diario anual (veh/day)

ESTEP diferencia de elevación del hombro con el pavimento (mm)

MMP precipitación mensual en temporada lluviosa (mm/mes)

S velocidad promedio de tráfico (km/h)

CW Ancho de carril (m)

CW_{max}

K_{eb} factor de calibración para progresión de desprendimiento de borde

Los valores por defecto propuestos de los coeficientes a_0 a a_5 para desprendimiento de bordes son dados en la siguiente tabla:

Tabla 4.8: Valores por defecto de coeficientes del modelo de desprendimiento de borde.

TIPO DE PAVIMENTO	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
AM GB	50	-1	0.2	2.65	-0.425	10
AM AB, AM SB, AM AP	25	-1	0.2	2.65	-0.425	10
ST GB	75	-1	0.2	2.65	-0.425	10
ST AB, ST SB, ST AP	50	-1	0.2	2.65	-0.425	10

4.4.4.6 Área dañada y no dañada

En los modelos de deterioro del pavimento, es importante asegurar que los porcentajes de área dañada y no dañada sumen el 100% de la superficie de rodamiento en cualquier año de análisis. Para propósitos del modelo, los cuatro tipos de deterioro superficial (agrietamiento, desprendimiento, baches y rotura de bordes), se convierten en áreas de superficie equivalente, y se asume que son mutuamente excluyentes, por lo que la suma de los porcentajes de área afectados por los cuatro deterioros con el de área no dañada, debe ser igual a 100%.

Conforme avanza el deterioro de un pavimento, el agrietamiento y los desprendimientos pueden convertirse en baches y los desprendimientos pueden dar lugar a agrietamiento. Para tomar en cuenta estos fenómenos y para garantizar que los porcentajes de área dañada y no dañada sumen 100%, el HDM- 4 reclasifica los tipos de daño en función de su evolución, de manera que, por ejemplo, parte del agrietamiento ancho puede convertirse en baches.

Esta redistribución se basa en las siguientes premisas:

- ✓ El agrietamiento se desarrolla, en primera instancia, en una área no dañada pero si ésta no existe, del área de desprendimientos si es mayor que cero. Las zonas agrietadas pueden desarrollar baches, pero no desprendimientos.
- ✓ Los desprendimientos pueden aparecer a partir del área no dañada. Una zona con desprendimientos también puede agrietarse, lo que no significa que el desprendimiento desaparezca físicamente.
- ✓ Los baches pueden resultar únicamente de áreas agrietadas, con desprendimientos o no dañadas; y a menos de que sea reparada, el área con baches no se puede convertir en agrietamiento, desprendimiento o área no dañada.
- ✓ El porcentaje de área con baches tiene un límite máximo de 10% de la superficie total del pavimento, ya que arriba de este límite la superficie de la carpeta no llega a definirse bien, y la función de rugosidad pierde validez.
- ✓ La rotura de borde puede desarrollarse únicamente a partir del área agrietada, con desprendimientos o de área no dañada, y a menos que sea reparada, un área con rotura de borde no se puede convertir en baches, agrietamiento, desprendimientos ni área no dañada.

4.4.4.7 Ahuellamiento

El deterioro conocido como *ahuellamiento* o *ahuellamientos*, consiste en la deformación permanente y no recuperable a lo largo del tiempo de las distintas capas del pavimento; la cual se manifiesta como depresiones en las huellas de las llantas de los vehículos. El HDM-4 estima la

profundidad de ahuellamientos después de calcular los cuatro tipos de deterioros superficiales y de redistribuir las áreas dañadas. La profundidad total de ahuellamientos se basa en la suma de las siguientes componentes:

- ✓ Densificación inicial
- ✓ Deformación estructural
- ✓ Deformación plástica
- ✓ Uso de llantas con aditamentos

Densificación inicial:

Este fenómeno se relaciona con el grado de compactación relativa de la base, sub-base y capas de relleno (COMP). Dicho parámetro se introduce como parte del segmento carretero; cabe destacar que la densificación inicial sólo se modela para el año que sigue a la construcción de la base de un pavimento; no se toma en cuenta para superficies con más de un año de antigüedad.

Esta componente de la profundidad de ahuellamientos se calcula como:

$$RDO = K_{rid} \alpha_0 (YE4 \cdot 10^6)^{(\alpha_1 + \alpha_2 DEF)} SNP^{\alpha_3} COMP^{\alpha_4}$$

Donde:

<i>RDO</i> :	Profundidad de las ahuellamientos debidas a la densificación inicial
<i>YE4</i> :	Número anual de ejes equivalentes (millones/carril)
<i>DEF</i> :	Deflexión promedio medida con viga Benkelman
<i>SNP</i> :	Número estructural ajustado del pavimento
<i>COMP</i> :	Compactación relativa (%)
<i>K_{rid}</i> :	Factor de calibración para la densificación inicial

Tabla 4.9: Valores por defecto para modelo de densificación inicial

TIPO DE PAVIMENTO	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
AM GB, AM AB, AM SB, ST GB, ST AB, ST SB	51740	0.09	0.0384	-0.502	-2.3
AM AP, ST AP	0	0	0	0	0

La densificación inicial solamente aplica a construcciones nuevas o reconstrucciones que involucre la construcción de una capa nueva de base (esto es, cuando AGE4=0), para un periodo de tiempo de un año. AGE4 es definido como sigue:

AGE4 edad transcurrida en años desde la última reconstrucción (incluyendo la base) o construcción nueva.

Deformación estructural:

Esta componente de las ahuellamientos, se modela en el HDM-4 bajo dos condiciones:

Deformación estructural sin agrietamiento:

$$\Delta RDST_{uc} = K_{rst} (a_0 SNP^{a_1} YE4^{a_2} COMP^{a_3})$$

Deformación estructural después del agrietamiento:

$$\Delta RDST_{crk} = K_{rst} (a_0 SNP^{a_1} YE4^{a_2} MMP^{a_3} ACN^{a_4})$$

Donde:

$\Delta RDST_{uc}$: Incremento de la profundidad de ahuellamientos debido a la deformación estructural sin agrietamiento, en el año de análisis

$\Delta RDST_{crk}$: Incremento de la profundidad de ahuellamientos debido a la deformación estructural cuando ya existe agrietamiento, en el año de análisis

MMP: Precipitación media mensual

- ACX_a : Área del agrietamiento indexado (se refiere a un parámetro que se calcula mediante una ponderación del agrietamiento total y el agrietamiento ancho), al inicio del año de análisis
- SNP : Número estructural ajustado
- $YE4$: Número anual de ejes equivalentes
- K_{rst} : Factor de calibración para la deformación estructural

El incremento anual de deformación estructural se calcula así:

Si, $ACRA = 0$

Tenemos $\Delta RDST = \Delta RDST_{UC}$

Si, $ACRA > 0$

Tenemos $\Delta RDST_{UC} + \Delta RDST_{crk}$

Donde:

$\Delta RDST$ total del incremento de deformación estructural en el año de análisis (mm)

Tabla 4.10: Valores por defecto de coeficientes para el modelo de deformación estructural.

	TIPO DE PAVIMENTO	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Sin agrietamiento	Todos	44950	-1.14	0.11	-2.3	
Después de agrietado	Todos	0.0000248	-0.84	0.14	1.07	1.11

Deformación plástica:

Incluye al parámetro CDS, el cual indica si la carpeta es susceptible a este tipo de deterioro. Asimismo, se requiere conocer la velocidad media del tránsito pesado en el tramo en estudio (**Sh**), la cual constituye un parámetro esencial para la estimación de la deformación plástica que a su vez, es uno de los factores más importantes en la generación de las ahuellamientos.

A fin de estimar con precisión la deformación plástica se utilizaron los modelos de velocidad descritos en la parte de la documentación relativa a los efectos sobre los usuarios, lo que hizo necesarios realizar un análisis a los modelos de velocidad que en un principio no fueron considerados. El incremento anual en la profundidad de ahuellamientos debido a la deformación plástica se obtiene como:

$$\Delta RDPD = K_{rpd} CDS^3 \alpha_0 YE4Sh^{a_1} HS^{a_2}$$

Donde:

$\Delta RDPD$:	Incremento en la deformación plástica durante el año de análisis
CDS:	Indicador de defectos en la construcción de superficies asfálticas
YE4:	Número anual de ejes equivalentes
Sh:	Velocidad de los vehículos pesados
HS:	Espesor total de las superficies asfálticas
K_{rpd} :	Factor de calibración de la deformación plástica

Tabla 4.11: Valores por defecto de coeficientes para el modelo de deformación plástica.

TIPO DE CAPA DE RODADURA	a0	a1	a2
AM	245	-0.78	0.71
ST	0	-0.78	0.71

Uso de llantas con aditamentos:

La componente debida al uso de llantas con aditamentos no se utiliza, ya que solamente aplica para vehículos con clavos en las llantas para facilitar su desplazamiento en superficies cubiertas de nieve, condición poco común en las carreteras salvadoreñas.

Profundidad total del ahuellamiento:

Si la edad de la construcción del pavimento es menor o igual a un año, entonces:

$$\Delta RDM = RDO + \Delta RDPD + \Delta RDW$$

De otra manera:

$$\Delta RDM = \Delta RDST + \Delta RDPD + \Delta RDW$$

Donde:

ΔRDM : Incremento en la profundidad media de las ahuellamientos en ambas huellas, en el año de análisis

RDO : Profundidad de ahuellamientos debida a la densificación inicial en el año de análisis

$\Delta RDST$: Incremento en la profundidad de ahuellamientos debida a la deformación estructural en el año de análisis

- $\Delta RDPD$: Incremento en la profundidad de ahuellamientos debida a la deformación plástica en el año de análisis
- ΔRDW : Incremento en la profundidad de ahuellamientos debida a la deformación por el uso de llantas con aditamentos

La profundidad total media de ahuellamientos para cualquier año es:

$$RDM_b = \text{MIN } RDM_a + \Delta RDM_b, 100$$

Donde:

- RDM_b : Profundidad media de ahuellamientos en ambas huellas al final del año de análisis
- RDM_a : Profundidad media de ahuellamientos en ambas huellas al inicio del año de análisis

Según los estudios que generaron los modelos del HDM-4, (ver capítulo 3), para calcular la rugosidad debida a la profundidad de ahuellamientos se correlacionó la desviación estándar de está, como el parámetro usado para la predicción del IRI.

Desviación estándar de la profundidad del ahuellamiento.

De acuerdo con los estudios tomados en cuenta para el desarrollo de los modelos de deterioro del HDM-4, la irregularidad del pavimento se correlaciona con la desviación estándar de la profundidad de ahuellamientos, la cual se calcula con la expresión:

$$RDS_b = \text{MAX } 0.3, (0.9 - 0.04RDM_b) RDM_b$$

Donde:

- RDS_b : Desviación estándar de la profundidad de ahuellamientos al final del año de análisis
- RDM_b : Profundidad media de ahuellamientos al final del año de análisis

4.4.4.8 Irregularidad (IRI)

El HDM-4 calcula el incremento anual del IRI mediante la integración de cinco componentes: pérdida de capacidad estructural, agrietamiento, deformación permanente o ahuellamientos, baches y efectos ambientales. A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas por el sistema para el cálculo de cada componente.

Componente estructural

$$\Delta RI_s = a_0 e^{m.R_g m.AG.E^3} (1 + SNPK_b)^{-5} YE4$$

Con

$$SNPK_b = \text{MAY } SNPK_a - dSNPK, 1.5$$

Y

$$dSNPK = K_{SNPK} a_0 \text{ MIN } a_1, ACX_2 \text{ HSNEW} + \text{MAY } \text{MIN } ACX_2 - PACX, a_2, 0 \text{ HSOLD}$$

Donde:

- ΔRI_s : Incremento de la irregularidad debido a la pérdida de capacidad estructural durante el año de análisis
- $dSNPK$: Reducción en el número estructural debido al agrietamiento

$SNPK_b$:	Número estructural ajustado, al final del año de análisis
SNP_a :	Número estructural ajustado, al inicio del año de análisis
ACX_a :	Área del agrietamiento indexado (asigna a diferentes pesos al área de agrietamiento total y al área de agrietamiento ancho), al inicio del año de análisis
$PACX$:	Área del agrietamiento indexado de la capa superficial anterior
$HSNEW$:	Espesor de la carpeta mas reciente
$HSOLD$:	Espesor de la carpeta o carpetas anteriores
$AGE3$:	Edad del pavimento desde la colocación de la ultima sobre-carpeta
$YE4$:	Número anual de ejes equivalentes
m :	Coefficiente del medio ambiente
K_{gm} :	Factor de calibración para el coeficiente del medio ambiente
K_{snpk} :	Factor de calibración para SNPK

Tabla 4.12: Valores prefijados para el coeficiente ambiental m

CLASIFICACION DE LA HUMEDAD	CLASIFICACION DE LA TEMPERATURA				
	TROPICAL	SUB-TROPICAL CALIENTE	SUB-TROPICAL FRIO	TEMPERATURA FRIA	TEMPERATURA MUY FRIA (CONGELAMIENTO)
Árido	0.005	0.010	0.015	0.025	0.040
Semi Árido	0.010	0.015	0.025	0.035	0.060
Sub Húmedo	0.020	0.025	0.040	0.060	0.100
Húmedo	0.025	0.030	0.060	0.100	0.200
Per Húmedo	0.030	0.040	0.070		

Componente debida al agrietamiento

El incremento de la irregularidad debido al agrietamiento es:

$$\Delta RI_c = \alpha_0 \Delta ACRA$$

Donde:

ΔRI_c : Incremento de la irregularidad debido al agrietamiento durante el año de análisis

$\Delta ACRA$: Incremento del área total agrietada durante el año de análisis

Componente debida a las ahuellamientos

El incremento de la irregularidad provocado por el aumento en la profundidad del ahuellamiento es:

$$\Delta RI_r = \alpha_0 \Delta RDS$$

Donde:

ΔRI_r : Incremento de la irregularidad relacionado con las ahuellamientos durante el año de análisis

ΔRDS : Incremento de la desviación estándar de la profundidad de ahuellamientos durante el año de análisis

Componente debida a baches

El efecto que producen los baches en la rugosidad depende del número de vehículos que realmente los golpean, el cual a su vez depende del volumen del tránsito y de la libertad de maniobra. Esta última se obtiene como:

$$FM = \text{MAX} \text{ MIN } 0.25 \text{ CW} - 3, 1, 0 \quad \text{MAX} \quad 1 - \frac{AADT}{5000}, 0$$

Y

$$\Delta RI_t = \alpha_0(\alpha_1 - FM) \text{ NPT}_a \text{ TLF} + \frac{\Delta \text{NPT} \text{ TLF}^{\alpha_2}}{2} - \text{NPT}_a^{\alpha_2}$$

Donde:

<i>FM:</i>	Libertad de maniobra
<i>CW:</i>	Ancho de calzada
<i>AADT:</i>	Tránsito diario promedio anual
ΔRI_t :	Incremento de la irregularidad debido a los baches durante el año de análisis
ΔNPT :	Incremento en el número de baches por km durante el año de análisis
NPT_a :	Número de baches por kilómetro al inicio del año de análisis
<i>TLF:</i>	Factor de tiempo debido al mantenimiento de baches

Componente debida a efectos ambientales

El incremento en el IRI debido a las condiciones ambientales es generado, entre otros factores, por variaciones en la humedad y temperatura de la zona de estudio, y se calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta RI_{\varepsilon} = m K_{gm} RI_{\alpha}$$

Donde:

ΔRI_{ε} :	Incremento de la irregularidad debido a los efectos climáticos durante el año de análisis
RI_{α} :	Irregularidad al inicio del año de análisis
m :	Coefficiente ambiental
K_{gm} :	Factor de calibración para el componente de efectos ambientales

Incremento total de la rugosidad

El incremento total de la irregularidad del pavimento es:

$$\Delta RI = K_{gp} \Delta RI_{\alpha} + \Delta RI_{\varepsilon} + \Delta RI_{\gamma} + \Delta RI_{\tau} + \Delta RI_{\varepsilon}$$

La irregularidad al final del año de análisis esta dado por:

$$RI_{\beta} = \text{MIN } RI_{\alpha} + \Delta RI, a_0$$

El promedio anual del IRI se obtiene como:

$$RI_{av} = 0.5(RI_{\alpha} + RI_{\beta})$$

Donde:

ΔRI :	Incremento total de la irregularidad durante el año de análisis
K_{gp} :	Factor de calibración para el progreso de la irregularidad
RI_{β} :	Irregularidad del pavimento al final del año de análisis
RI_{α} :	Irregularidad del pavimento al inicio del año de análisis
RI_{av} :	Promedio de la irregularidad para el año de análisis
a_0 :	Limite máximo de irregularidad permitido por el HDM-4, (por omisión=10)

4.4.4.9 Profundidad de la Macrotextura

La textura del pavimento es quizá la variable más importante que determina la magnitud de las fuerzas laterales y longitudinales que definen la interacción de los vehículos, con el pavimento. Una superficie tiene dos tipos de textura: microtextura y macrotextura; la primera, determina la máxima resistencia al deslizamiento que proporciona un pavimento seco; mientras que la macrotextura caracteriza la capacidad drenante de la superficie del pavimento.

La macrotextura es relevante para el cálculo de las velocidades del tránsito y, como se ha mencionado, para la estimación de las fuerzas involucradas en la interacción vehículo-pavimento.

El modelo para la predicción de la macrotextura es el siguiente:

$$\Delta TD = K_{td} \left(ITD - TD_a - \alpha_0 ITD \log_{10} \frac{ITD - TD_a}{10} \right)^{\alpha_0 ITD} + \Delta NELV$$

Donde:

ΔTD :	Incremento en el desgaste de la macrotextura durante el año de análisis
ITD :	Profundidad de la macrotextura cuando se construyó la superficie
TD_a :	Profundidad de la macrotextura al inicio del año de análisis
$\Delta NELV$:	Número de pasadas de vehículos ligeros durante el año de análisis (un vehículo pesado equivale a 10 pasadas de un vehículo ligero)
K_{td} :	Factor de calibración para la profundidad de la textura

4.4.4.10 Resistencia al deslizamiento

Este modelo está influenciado fuertemente por la microtextura, que es una medida del grado de pulido de una superficie del pavimento o del agregado y de la superficie. El modelo propuesto de la resistencia al deslizamiento es como sigue

$$\Delta SFC_{50} = K_{sfc} a_0 \text{MAX } 0, \Delta QCV$$

Donde:

ΔSFC_{50} Incremento del coeficiente de la fuerza de fricción durante el año del análisis, medido en 50 kilómetros por hora

ΔQCV Incremento anual en el flujo de vehículos comerciales (veh/carril/día)

K_{sfc} Factor de calibración para el modelo de resistencia al deslizamiento.

El valor por defecto del coeficiente a_0 para una mezcla en caliente de concreto asfáltico corresponde a -0.663×10^{-4} .

4.5. MODELOS DE DETERIOROS EN HDM-4 PARA PAVIMENTOS RIGIDOS

La forma funcional general de los modelos de deterioro de concreto es la siguiente:

$$\text{Deterioro} = (\text{Tráfico o Edad})^a (b\text{Diseño}^c + d\text{Subrasante}^e + f\text{Clima} + h\text{Material}^i)$$

Donde a hasta i son constantes determinadas de las ecuaciones de regresión, Tráfico, Edad, etc. son las principales variables incluidas en el modelo.

Dichos modelos abarcan numerosas actividades de restauración y recapados, para los cuales ha sido posible formular modelos de escalonamiento de juntas, deterioro de juntas, agrietamiento, deterioro de grietas y reflexión de grietas. A continuación se entrega la lista de los modelos actualmente disponibles para pavimentos rígidos.

- a) Pavimento de Concreto simple con juntas JPCP
 - ✓ Escalonamiento de juntas con barras de traspaso de carga
 - ✓ Escalonamiento de juntas sin barras de traspaso de carga
 - ✓ Despostillamiento de juntas transversales
 - ✓ Agrietamiento Transversal
 - ✓ IRI, Índice de rugosidad internacional

b) Pavimento de concreto reforzado con juntas JRCP

- ✓ Escalonamiento de juntas con barras de traspaso de carga
- ✓ Escalonamiento de juntas sin barras de traspaso de carga
- ✓ Despostillamiento de juntas transversales
- ✓ Agrietamiento Transversal
- ✓ IRI, Índice de Rugosidad Internacional

c) Pavimento de concreto continuamente reforzado CRCP

- ✓ Fallas
- ✓ Serviciabilidad
- ✓ IRI, Índice de Rugosidad Internacional

Lo que se resume en la tabla 4.13

Tabla 4.13: Modelos de deterioro en HDM-4

Deterioro	Unidades de medida	Tipo de capa de rodadura
Grietas	Porcentaje de losas agrietadas	JP
	Numero por milla	JR
Escalonamiento	Pulgadas	JP Y JR
Despostillamiento	Porcentaje de juntas despostillada	JP Y JR
Falla por fatiga	Numero por milla	CR
Pérdida de serviciabilidad	Adimensionales	JR Y CR
Rugosidad	Pulgadas por milla (o km)	JP, JR Y CR

4.5.1 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

Las variables primarias usadas para modelar el funcionamiento de pavimentos concretos se pueden considerar bajo características estructurales del pavimento, la condición, la historia, el tráfico, la geometría del camino y ambiente. Las características del camino al principio del año del análisis son cualquier dato de entrada si es el primer año del análisis o el primer año después de la construcción, o de otra manera del resultado de los trabajos del mantenimiento y de la mejora del año pasado.

$$(\text{CONDITION})_t = f[(\text{TIME}), (\text{TRAFF}), (\text{STRENGTH}), (\text{ENVIRON}), \text{ETC.}]$$

(CONDITION) _t	condición en un tiempo <i>t</i>
(TIME)	tiempo transcurrido a partir de la construcción del pavimento
(TRAFF)	tráfico acumulado desde el año de la construcción de pavimento
(STRENGTH)	parámetros de esfuerzo de pavimentos
(ENVIRON)	parámetros relacionados clima/ambiente

- **Características Estructurales**

En esta sección se describen los principales datos estructurales para pavimentos que serán necesarios para predecir el deterioro de los pavimentos de concreto. Esto incluye lo siguiente:

- Propiedades de los materiales
- Condiciones de Drenaje
- Eficiencia de Transferencia de Carga
- Ensanchamiento de Carriles Exteriores

Propiedades de los Materiales

Modulo de Elasticidad del Concreto (E_c)

El modulo de elasticidad del concreto representado por (E_c) puede ser obtenido a partir de un análisis de mediciones de deflexiones o de ensayos de laboratorios (por ejemplo, de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM C469). Así mismo puede ser estimado de una correlación de esfuerzo a la compresión del concreto por medio de la ecuación siguiente (Pauw, 1960):

$$E_c = 57000 f'_c{}^{0.5}$$

Donde:

- E_c : Módulo de Elasticidad del concreto (psi)
- f'_c : Esfuerzo a la compresión del concreto (psi), determinado utilizando el procedimiento *AASHTO (T22-92)*, *AASHTO (T140-92)* o *ASTM C39*

El valor de Modulo de Elasticidad del concreto utilizado en el modelo de deterioro de pavimento es de 5, 000,000 psi.

Modulo de Ruptura del concreto (MR28)

Las tensiones en pavimentos concretos son causadas principalmente por los efectos del tráfico y de la acción ambiental. El módulo de la ruptura es una medida de la fuerza flexural concreta en el abastecimiento de una resistencia continua a las tensiones. Durante la vida útil del pavimento los

niveles de tensión pueden exceder el módulo de la ruptura en ciertos puntos, estropeando la fatiga y agrietándose en las losas.

$$MR_{28} = RUP * \left(\frac{f_c}{f_c} \right)^{0.5}$$

Donde:

- MR*₂₈: Modulo de ruptura del concreto después de los 28 días (psi)
- F_c*: Esfuerzo a la compresión del concreto, en psi, determinado a partir de los procedimientos *AASHTO (T22-92)*, *AASHTO (T140-92)* o *ASTM C39*
- RUP*: Parámetro del modelo (varia entre 8 y 10, valor por defecto = 9)

El Modulo de Ruptura también puede estimarse usando el módulo de elasticidad del concreto, el cual puede ser obtenido a partir de resultados de ensayo con el Deflectómetro de Impacto (FWD) o ensayos de laboratorio. La ecuación empírica (*Foxworthy, 1985*) para estimar el Módulo de Ruptura es la siguiente:

$$MR = * \left(\frac{E_c}{10^6} \right) + 488.5$$

Donde;

- MR*: Modulo de Ruptura del concreto (psi)
- E_c*: Modulo de Elasticidad del concreto (psi)

Para los modelos de deterioro de pavimentos de concreto se considerara un módulo de ruptura (MR) a largo plazo. El valor para este periodo se estima con un incrementos del 11% del Modulo de Ruptura a los 28 días (MR₂₈).

Coefficiente Térmico del Concreto (α)

El coeficiente térmico de expansión es utilizado para determinar el albeo producido por esfuerzos en el pavimento de concreto cuando este se encuentra sujeto a diferentes temperaturas entre la parte superior e inferior de la losa. Los mayores esfuerzos ocurren en el borde de la losa, y podrían resultar en agrietamientos cerca del punto medio de la losa.

El coeficiente térmico de expansión varía según los factores como: relación Agua – Cemento, edad del concreto, proporción de la mezcla, humedad relativa y el tipo de agregado. Tabla 4.14 muestra los valores típicos de coeficiente térmico de concreto según el tipo de agregados. Usualmente para el análisis en pavimentos de concreto se considera un valor de 5.5×10^{-6} per °F.

Tabla 4.14: Valores típicos del coeficiente térmico del concreto.

Tipo de Agregado	Coefficiente Térmico del Concreto (α) (10^{-6} per °F)
Cuarzo	6.6
Arenisca	6.5
Grava	6.0
Gravito	5.3
Basalto	4.8
Piedra Caliza	3.8

Condiciones de drenaje

Se reconoce extensamente que el drenaje es un factor principal que influencia el funcionamiento de muchos pavimentos concretos. El agua que infiltra a través de las grietas y en los empalmes de las losas, dando lugar a menudo a la pérdida de soporte uniforme de la plataforma de base y a la dislocación del pavimento debido a la redistribución del material de la base/sub base.

El efecto del drenaje sobre funcionamiento del pavimento concreto se incorpora en los modelos de la deterioración HDM-4 con el uso de un coeficiente del drenaje (Cd). El coeficiente del drenaje es definido por la calidad del drenaje y el porcentaje del tiempo durante el año que la estructura del pavimento sería expuesta normalmente a los niveles de la humedad que se acercan a la saturación (AASHTO, 1986). La calidad del drenaje se basa en la velocidad a la cual el agua se quita de la estructura del pavimento, y se determina cerca:

Eficiencia de la transferencia de carga

La transferencia eficaz de las cargas del tráfico a partir de una losa a otra reduce niveles de tensión extensible en las losas y las deformaciones asociadas de las losas en los empalmes. Esta situación ayuda a disminuir la deterioración reduciendo el bombeo, la pérdida de soporte y la fractura de los bordes de la losa. La transferencia de la carga a través de empalmes transversales se puede efectuar con barras de pasador, dispositivo de seguridad agregado o una combinación de ambos mecanismos.

La transferencia de la carga en los empalmes se puede evaluar con el equipo tal como el FWD, colocando las deformaciones de los lados cargados y descargados del empalme. El porcentaje de la carga transferido a través de un empalme, denotado por el LT, se expresa como sigue:

$$LT = \frac{DEF_{unid}}{DEF_{loda}} * 100$$

Donde:

LT : porcentaje de transferencia de carga a través de la junta

DEF_{unid} : deflexión en el lado descargado de la junta (pulg)

DEF_{load} : deflexión en el lado cargado de la junta (pulg)

La eficacia de la transferencia de la carga se utiliza en el cálculo de la tensión máxima del sistema pasador-concreto. Teóricamente, si un pasador es el 100% eficiente es capaz de asignar la mitad de la carga aplicada a cada losa adyacente. Sin embargo, una reducción en eficacia de la transferencia de la carga ocurriría durante la vida del pavimento, cualquiera debido a la pérdida de enlace en la zona en donde el dispositivo de la transferencia de la carga se encaja en el bloque de cemento o debido a la deterioración del agregado

Eficiencia en la transferencia de carga entre la losa y el hombro

$$LTE_{sh} = \frac{STRESS_{unid}}{STRESS_{load}} * 100$$

Donde:

LTE_{sh} eficiencia en la transferencia de carga entre losa y hombro (%)

$STRESS_{unid}$ tensión en el lado descargado del empalme (psi)

$STRESS_{load}$ tensión en el lado cargado del empalme (psi)

Ensanchamiento de carriles exteriores

Se refiere a la construcción original que incorpore un carril más ancho adyacente a los hombros. La ventaja principal asociada a la disposición de un carril externo más ancho es reducción de tensión en el borde externo de la losa puesto que las cargas de la rueda se guardan en una distancia del borde del pavimento. Los efectos de carriles exteriores ensanchados sobre funcionamiento del pavimento concreto se consideran en los modelos de agrietamiento y escalonamiento.

4.5.2 ESCALONAMIENTO

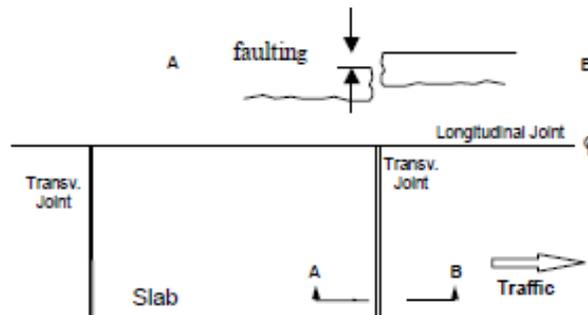


Figura 4.3 Esquema de Escalonamiento de losas para pavimentos de concreto hidráulico JPCP.

El modelo de este deterioro trabaja para concreto simple con dovelas o sin dovelas y considera las siguientes variables para su formulación:

Escalonamiento de juntas con barras de traspaso de carga

$$\begin{aligned}
 FAULT = & K_{jpf} NE^{0.25} 0.0628 1 - C_d + 3.673 \times 10^{-9} BSTRESS^2 + 4.116 \times 10^{-9} JTSPACE^2 \\
 & + 7.466 \times 10^{-10} FI^2 PRECIP^{0.5} - 0.009503BASE - 0.01917WIDENED \\
 & + 0.0009217AGE
 \end{aligned}$$

Donde:

<i>FAULT:</i>	Escalonamiento transversal promedio (m)
<i>Cd:</i>	Coefficiente de drenaje modificado por AASHTO
<i>NE4:</i>	Número de ejes sencillos equivalentes acumulados (ESALs) desde construcción (millones de ejes de 18kip (8,181.8 kg) por carril)
<i>BSTRESS:</i>	Máximo esfuerzo de resistencia del concreto, en el sistema dovela-concreto (psi-Pa). La combinación concreto y acero de refuerzo permite una mejora en la reacción del pavimento y por ende en el esfuerzo máximo que es capaz de resistir el sistema en conjunto.
<i>BASE:</i>	Tipo de base; 0 = no estabilizada, 1 = estabilizada
<i>FI:</i>	Índice de congelamiento (°F-días)
<i>JTSPACE:</i>	Distancia entre juntas transversales (m)
<i>PRECIP:</i>	Precipitación promedio anual (m)
<i>WIDENED:</i>	Carril ancho; 0 = No anchado, 1= Carril ancho o bermas hechas durante construcción, 0,5 = Bermas en concreto colocadas después de la construcción
<i>K_{jpdf}:</i>	Factor de calibración (defecto = 1,0)
<i>AGE:</i>	Número de años del pavimento desde la construcción. La edad del pavimento debe tenerse en cuenta pues a medida que pasa el tiempo los materiales se van alterando y perdiendo propiedades como resistencia entre otros

Escalonamiento de juntas sin barras de traspaso de carga

$$\begin{aligned}
 FAULT = & 25.4(NE4)^{0.25}MAX\ 0,0.2347 - 0.1516C_d - 2.88 \times 10^{-7} H_p^2 L^{0.25} - 0.0115BASE + 6.45 \\
 & \times 10^{-8}FI^{1.5}MMP^{0.25} - 0.002478(DAYS90)^{0.5} - 0.0415WIDENED
 \end{aligned}$$

Donde:

<i>FAULT:</i>	Escalonamiento transversal promedio, en mm
<i>NE4:</i>	Número de ejes sencillos equivalentes acumulados (ESALs)
<i>Cd:</i>	Coefficiente de drenaje modificado por AASHTO
<i>H_p:</i>	Espesor de losa, en mm
<i>L:</i>	Distancia entre juntas transversales, en m
<i>BASE:</i>	Tipo de base; 0 = no estabilizada, 1 = estabilizada
<i>FI:</i>	Índice de congelamiento (°F-días)
<i>MMP:</i>	Precipitación promedio mensual, en mm/mes
<i>DAYS90:</i>	Número de días con temperatura >32°C
<i>WIDENED:</i>	Carril ancho; 0 = No anchado, 1= Carril ancho o bermas hechas durante construcción

4.5.3. DESPOSTILLAMIENTO DE JUNTAS TRANSVERSALES (JPCP)

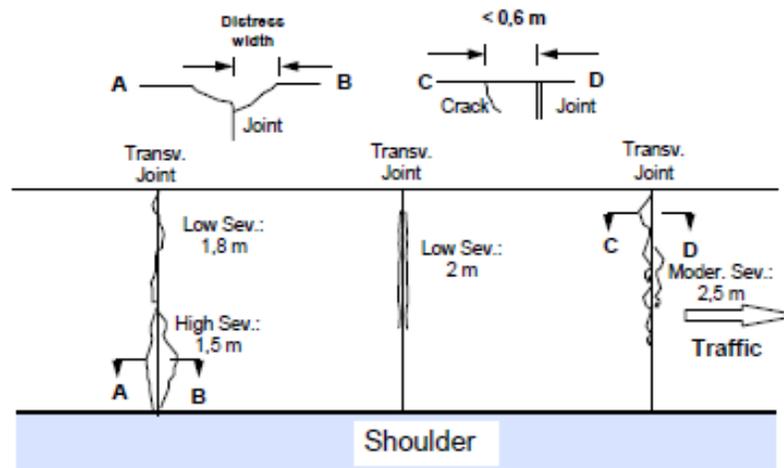


Figura 4.4 Esquema de Despostillamiento de juntas (JPCP)

HDM-4 predice el despostillado de juntas para concreto simple con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 SPALL = & K_{jps} AGE^2 JTSPACE 10^{-6} 549.9 - 895.7 LIQSEAL + PREFSEAL + 1.11 \\
 & \times 10^{-3} DAY90^3 + 375 DWLCOR + 29.01 - 27.6 LIQSEAL FI \\
 & - 28.59 PREFSEAL + 27.09 SILSEAL FI
 \end{aligned}$$

Donde:

- SPALL*: Porcentaje de juntas descascaradas
- AGE*: Edad en años desde la construcción
- JTSPACE*: Espaciamiento entre juntas promedio (m)
- LIQSEAL*: Presencia de líquido sellante en las juntas. Todas las juntas, ya sean de construcción y contracción deben sellarse para prevenir la entrada de agua bajo la losa.

HDM tiene en cuenta el sellante líquido (usualmente asfáltico) pero no lo considera en gran detalle, solo su presencia u ausencia, Así: 0 = No presente, 1 = Presente

PREFSEAL: Presencia de sellante preformado en las juntas. Existen diferentes tipos de sellantes, entre los cuales se tienen preformados de goma. HDM considera la presencia u ausencia de ellos, Así: 0 = No presente, 1 = Presente

DAYS90: Número de días con la temperatura media mayor a 90

DWLCOR: Protección a la corrosión de la dovela. La protección de las dovelas es tenida en cuenta dentro del programa a manera general, así:
0 = inexistencia de dovela o dovelas protegidas
1 = Dovelas no protegidas

FI: Índice de congelamiento (°F-días)

SILSEAL: Presencia de silicona en las juntas. Al igual que los sellantes, HDM tiene la posibilidad de especificar si las juntas tienen silicona para la protección de la losa del agua. Numéricamente: 0 = No presente, 1 = Presente

K_{jps}: Factor de calibración (defecto = 1,0)

4.5.4. AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL

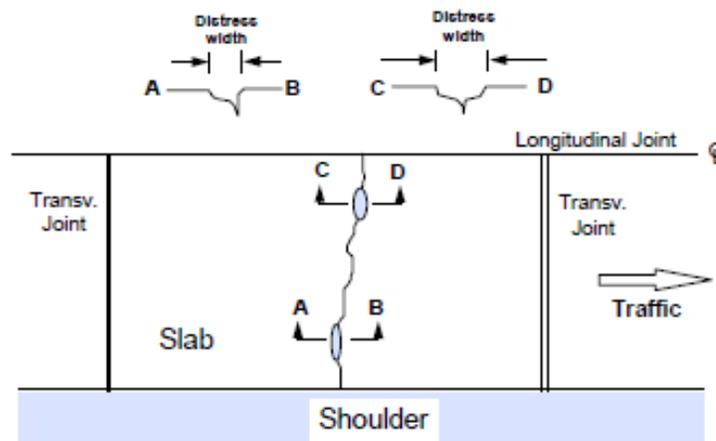


Figura 4.5 Esquema de agrietamiento transversal de losas de concreto hidráulico (JPCP).

Las grietas transversales se modelan en función del daño de la fatiga acumulada en las losas

$$PCRACK = K_{jpc} \frac{100}{1 + 1.41(FD)^{-1.66}}$$

Donde:

- PCRACK*: Porcentaje de losas agrietadas
- FD*: Daño de fatiga acumulado, adimensional
- K_{jpc}*: Factor de calibración (1,0 por defecto).

Determinación del daño de la fatiga

$$FD = \sum_{tg=1}^G \frac{n_{tg}}{N_{tg}}$$

Donde:

- FD Daño de fatiga acumulada
- tg Gradiente de temperatura
- n_{tg} Número carga de ejes equivalentes de 18 kips durante el gradiente de temperatura tg (ESALs por carril)
- N_{tg} Número máximo de repeticiones estándar de ejes equivalentes de carga de 18 kips durante el gradiente de temperatura tg antes de la falta flexural ocurre (ESALs por carril)

En este caso se considera que la falla por fatiga acumulada temperatura incluye fase de hielo y deshielo, por lo que no se considera por escapar de los objetivos de este trabajo.

4.5.5. IRI (Índice de Rugosidad Internacional)

El IRI es un Indicador del estado superficial del pavimento que se puede ver reflejado en su deterioro, el cual se define como de aceleraciones verticales no deseadas que sufre el usuario de una carretera al circular por ella, las cuales son provocadas por las desviaciones del perfil longitudinal real respecto al perfil teórico del proyecto. HDM-4 utiliza los deterioros de Juntas Despostilladas, Escalonamiento y Losas Fisuradas para modelar este indicador.

El IRI se modela con la siguiente ecuación:

$$RI_r = K_{jpr}(RI_0 + 2.6098 TFAULT + 1.8407 SPALL + 2.2802 \times 10^{-6} TCRACKS^3)$$

Donde:

R_t :	Regularidad en el tiempo t (pulgadas/milla – m/km)
R_{lo} :	Regularidad inicial en momento de construcción (m/km) (defecto = 98.9)
$TFAULT$:	Escalonamiento transversal total de juntas por milla (pulg/milla – m/km)
$SPALL$:	Porcentaje de juntas descascaradas
$TCRACKS$:	Número total de losas agrietadas por milla (#/km)
K_{jpr} :	Factor de calibración (defecto = 1,0)

Número total de losas agrietadas por milla:

$$TCRACKS = \frac{5280 PCRACK}{100 JTSPACE}$$

Donde:

$TCRACKS$:	Número total de losas agrietadas por milla (#/km), Al igual que con el escalonamiento, esta fórmula presentada es la conversión a (#/km),
$PCRACK$:	Porcentaje de losas agrietadas

4.6. SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS DE DETERIORO DE HDM-4

4.6.1 IMPORTANCIA DE LA SENSIBILIDAD DEL HDM-4.

Para conocer la incidencia de datos de entrada y parámetros de calibración de un modelo sobre indicadores técnicos y económicos del pavimento, proyectados en el tiempo, es necesario llevar a cabo una sensibilización de dichos parámetros. De esta manera es posible determinar a qué parámetros se debe dar mayor importancia durante la modelación. Luego, mediante una jerarquización de los resultados obtenidos en una sensibilización es posible definir el grado de importancia de cada parámetro sobre el desempeño del pavimento en el tiempo. Para aquellos parámetros con mayor incidencia sobre indicadores técnicos y económicos del pavimento será necesario realizar evaluaciones periódicas para controlar su evolución en el tiempo.

El HDM-4 incorpora un número importante de relaciones que modelan en forma muy detallada a distintos aspectos relacionados con el deterioro de los pavimentos; los costos de operación vehicular; la evaluación económica de proyectos; y la jerarquización y optimización de programas de obra. El nivel de detalle empleado por el HDM-4 permite modelar la mayoría de los factores que intervienen en la evaluación de los proyectos viales; por ejemplo, en lo que se refiere al deterioro de pavimentos, el sistema analiza prácticamente todos los indicadores que se emplean para caracterizar este fenómeno: irregularidad, deterioros superficiales, resistencia al deslizamiento, capacidad estructural, etc.

Sin embargo, para lograr este nivel de detalle, el HDM-4 utiliza un número muy importante de variables de entrada. A fin de ilustrar este hecho, considérese que la evaluación de un proyecto de conservación con tres posibilidades para un tramo carretero de concreto asfáltico, con una flota vehicular compuesta por cinco tipos de unidades requiere unos 800 datos de entrada. Si bien, para un alto porcentaje de estos datos pueden utilizarse como primera aproximación valores por omisión definidos dentro del HDM-4; es claro que aun la revisión de estos valores para verificar que se ajusten razonablemente a los datos reales, puede significar una tarea sumamente ardua. Por otro lado, algunas de las variables para las que no es recomendable utilizar los valores por omisión, como los espesores de las capas del pavimento, resultan muy difíciles de conseguir en forma directa.

De lo ya señalado se desprende la necesidad de estudiar la sensibilidad de los modelos internos del HDM-4, a fin de jerarquizar cada uno de los parámetros que intervienen en ellos de acuerdo con su impacto en los resultados del sistema, y generar un listado de las variables cuyos valores resulta indispensable obtener en campo o en gabinete, para garantizar que esos resultados correspondan a la realidad. El conocimiento de la sensibilidad del HDM-4 resulta de gran utilidad no sólo para optimizar los recursos disponibles para la recopilación de información, destinándolos a conseguir variables con mayor influencia en los resultados, sino también para encausar los esfuerzos que se emprendan para la calibración de los modelos bajo condiciones nacionales, actividad que resulta imprescindible si se desea que el sistema modele en forma fidedigna las condiciones de la red carretera.

4.6.2 TRABAJOS PREVIOS RELACIONADOS CON LA SENSIBILIDAD.

Dados los grandes volúmenes de información involucrados en la aplicación del modelo HDM, la sensibilidad del mismo ha sido una preocupación constante de sus promotores y usuarios, por lo menos en lo que se refiere a las ediciones representadas por el HDM-III y el HDM-4. En 1996, el Banco Mundial realizó un análisis de sensibilidad del HDM III [Archondo-Callao, 1996]. El informe correspondiente, que consta de una serie de gráficas en las que se ilustra el porcentaje de variación de los resultados originado por cambios en los datos de entrada, se enfoca principalmente al modelo de costos de operación vehicular, aunque también presenta algunos resultados relacionados con el cálculo de la tasa interna de retorno y el pronóstico del índice internacional de irregularidad (IRI).

Este análisis utiliza como medida de sensibilidad (cuantificación de sensibilidad) el concepto de *elasticidad del impacto*, el cual se define como la relación entre los porcentajes de cambio de un resultado específico y un dato de entrada. El análisis se basó en el enfoque *ceteris paribus*, que consiste en modificar cada parámetro por separado y obtener la sensibilidad correspondiente, manteniendo los demás parámetros constantes. Para caracterizar el nivel de influencia de cada variable, se definieron cuatro categorías de sensibilidad en función de la elasticidad del impacto, como se muestra en la Tabla 4.15

Tabla 4.15: Categorías definidas para el análisis de sensibilidad del HDM-4

NIVEL DE IMPACTO	CATEGORIA DE SENSIBILIDAD	ELASTICIDAD DEL IMPACTO
Alto	S – I	> 0.50
Moderado	S – II	0.20 – 0.50
Bajo	S – III	0.05 – 0.20
Muy Bajo	S – IV	< 0.05

La Tabla 4.16 reproduce los resultados que se obtuvieron en el análisis de sensibilidad de los modelos RDWE incluido en la documentación del HDM-4.

Tabla 4.16: Resultados del análisis de sensibilidad del HDM-4, para modelos RDWE [Bennett et al, 2000].

CATEGORIA DE SENSIBILIDAD	ELASTICIDAD DEL IMPACTO	PARÁMETRO	GRUPOS DE RESULTADOS CON MAYOR IMPACTO		
			COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO	REPOSICIÓN DE LA CAPA DE RODAMIENTO, Y DETERIOROS SUPERFICIALES	BENEFICIOS ECONÓMICOS DEBIDOS AL MANTENIMIENTO
S-I	> 0.50	Número estructural	o	o	o
		Número estructural modificado	o	o	o
		Volumen de tránsito			o
		Deflexión (con SN ²)	o	o	o
		Irregularidad	o		o
S-II	0.20 - 0.50	Cargas por año	o	o	o
		Edad		o	o
		Área de agrietamiento total		o	o
		Área de agrietamiento ancho		o	o
		Factor ambiental de la irregularidad	o		o
		Factor de Inicio del agrietamiento	o	o	o
		Factor de evolución del agrietamiento		o	
S-III	0.05 - 0.20	VRS de la subrasante (con SN)	o		
		Espesor de la capa de rodamiento (con SN)		o	o
		Número de ejes de vehículos pesados		o	o
		Área de baches	o	o	
		Media de la profundidad de ahuellamiento	o		
		Desviación estándar de la profundidad de ahuellamiento	o		
		Factor de evolución de la profundidad de ahuellamiento	o		
		Factor general de la irregularidad	o		o
S-IV	< 0.05	Deflexión (con SNC ³)		o	
		Compactación de la subrasante	o		o
		Precipitación (con K _{ge})	o		
		Área de desprendimientos		o	
		Factor de desprendimientos		o	

² Número estructural, por las siglas Structural Number.

³ Efectos del agrietamiento en el número estructural.

Nótese que aunque las metodologías empleadas para el cálculo de la sensibilidad del HDM-III y el HDM-4 no son comparables, y aunque existen diferencias importantes entre los modelos de deterioro de ambos sistemas, los resultados de los dos estudios involucran prácticamente as mismas variables, si bien con niveles de impacto distintos.

En el año 2002, el Instituto Mexicano del Transporte realizó un estudio exploratorio de la sensibilidad del HDM-4 [Solorio, *et a.*, 2002], en el cual se empleó el enfoque *ceteris paribus* y el concepto de elasticidad del impacto, con un porcentaje de variación de los datos de entrada del 20%. Para evaluar los resultados que se incluyeron en el análisis, se utilizó directamente el programa de cómputo, es decir, no se programó por separado ninguno de los modelos. El ejercicio comprendió la obtención de elasticidades de impacto para RUE y RDWE.

La sensibilidad de los modelos RDWE se exploró con las combinaciones de periodos de análisis, IRI inicial y volúmenes de tránsito que se indican en la Tabla 4.17. En todos los casos, la elasticidad del impacto se calculó con base en el resultado de referencia, la irregularidad al final del periodo de análisis considerado.

Tabla 4.17: Casos analizados en el estudio exploratorio de sensibilidad del IMT

CASO	PERIODO DE ANALISIS (AÑOS)	IRI INICIAL (m/km)	TPDA INICIAL (veh/día)
1	5	2	7500
2	5	4	3000
3	10	2	7500
4	10	4	3000

En la Tabla 4.18 se resumen los resultados del estudio exploratorio para los modelos RDWE. Como se observa en esta tabla, se obtuvieron en general distintos niveles de sensibilidad de los

parámetros para cada caso analizado. Puesto que las tres variables para definir los casos establecen en última instancia, condiciones específicas de deterioro de la carretera al momento de evaluar la sensibilidad de los modelos RDWE, puede concluirse que el impacto de los parámetros de estos sistemas varía con el nivel de deterioro del pavimento.

Tabla 4.18: Resultados obtenidos para los modelos RDWE en el estudio exploratorio de sensibilidad del IMT [Solorio, et al, 2002]

PARAMETRO	CATEGORIA DE SENSIBILIDAD				
	MAYOR	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
Factor de efectos estacionales (irregularidad)	S-I	S-III	S-IV	S-I	S-III
Factor de evolución de baches	S-I	S-IV	S-III	S-I	S-I
Factor de evolución de la irregularidad	S-I	S-III	S-III	S-I	S-II
Factor de evolución del agrietamiento ancho	S-I	S-IV	S-IV	S-I	S-IV
Factor de inicio del agrietamiento	S-I	S-IV	S-IV	S-I	S-IV
Factor de inicio del agrietamiento ancho	S-I	S-IV	S-IV	S-I	S-IV
Indicador de defectos para la base	S-I	S-IV	S-III	S-I	S-III
Indicador de defectos para la capa asfáltica	S-I	S-III	S-II	S-I	S-II
Irregularidad inicial (IRI)	S-I	S-I	S-I	S-II	S-I
Número efectivo de carriles	S-I	S-III	S-III	S-I	S-I
Número estructural	S-I	S-II	S-III	S-I	S-III
VRS de la subrasante	S-I	S-III	S-IV	S-I	S-IV
Factor ambiental (irregularidad)	S-II	S-III	S-III	S-II	S-II
Factor de evolución del agrietamiento total	S-II	S-IV	S-IV	S-III	S-II
Numero de baches	S-II	S-IV	S-IV	S-II	S-IV
Área con desprendimientos de agregados	S-III	S-III	S-IV	S-IV	S-III
Área total agrietada	S-III	S-IV	S-IV	S-III	S-III
Compactación relativa	S-III	S-III	S-III	S-III	S-III
Factor de deformación plástica (ahuellamiento)	S-III	S-III	S-IV	S-III	S-IV
Factor de retraso del agrietamiento	S-III	S-IV	S-IV	S-IV	S-III
Porcentaje de vehículos que utilizan llantas con clavos	S-III	S-III	S-IV	S-IV	S-IV
Área con rotura de borde	S-IV	S-IV	S-IV	S-IV	S-IV
Factor de deterioro estructural (ahuellamiento)	S-IV	S-IV	S-IV	S-IV	S-IV
Profundidad de la textura	S-IV	S-IV	S-IV	S-IV	S-IV
Profundidad de ahuellamiento	S-IV	S-IV	S-IV	S-IV	S-IV

El HDM-4 cuenta con modelos separados para el inicio y progresión de cada deterioro, las sensibilidades del Modelo de Deterioro y Efectos de Trabajos, RDWE, deben evaluarse basándose en los impactos sobre las condiciones físicas (necesidades de mantenimiento y rehabilitación) como también los costos y retorno económico, debido a que el comportamiento del camino también se ve influenciado.

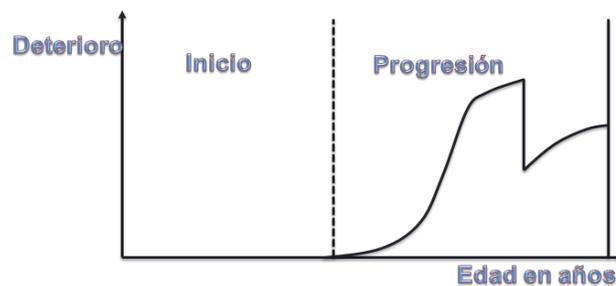


Figura 4.6: Esquema de progresión de deterioros en pavimentos.

Así mismo, para la sensibilidad, del Modelo de Deterioro y Efectos de Trabajo, RDWE, en la experiencia chilena²:

S-I

- ✓ Las variables más sensibles son los datos estructurales. Tránsito y rugosidad.
- ✓ Los datos estructurales afectan las alternativas de mantenimiento y rehabilitación.
- ✓ Variaciones en los volúmenes de tránsito afectan los entornos económicos.
- ✓ La rugosidad que afecta los ahorros de los usuarios, tiene un alto impacto en los resultados económicos y necesidades de rehabilitación.

² Curso Internacional de HDM-4 del 07 al 18 de mayo de 2001, expositor Ing. MSc. Andrés Roberto Caroca Baeza.

S-II

- ✓ Los factores de deterioro provocan un impacto moderado en los mantenimientos y rehabilitación.
- ✓ Variaciones en la edad de la superficie dan un impacto moderado en los mantenimientos y bajo en los retornos económicos.
- ✓ Variaciones en el total de grietas y las grietas anchas provocan un moderado impacto en los retornos económicos.

S-III

- ✓ La cantidad de bacheo y el volumen de vehículos pesados impactan directamente los baches. La presencia o no de baches den un moderado impacto en la alternativa de bachear.
- ✓ El promedio, la desviación y el factor de progresión del ahuellamiento dan un bajo impacto en intervenciones por agrietamiento, rugosidad y retornos económicos.
- ✓ El espesor de sello da un bajo impacto en los retornos económicos.

S-IV

- ✓ Variaciones en la compactación de la subrasante y precipitaciones den un bajo impacto en la programación de ahuellamiento y despreciable en las intervenciones y retornos económicos.
- ✓ Variaciones en la deflexión del pavimento provocan un impacto despreciable cuando el Número Estructural Modificado también es ingresado.

4.6.3 DATOS DE ENTRADA.

Los datos representan la información que describe el caso a analizar, requeridos al usuario. Un error en un dato significa que el modelo analizará un caso diferente, similar a lo que sería entregar una mala instrucción de vuelo. Los datos de entrada pueden provocar un impacto sustancial en la programación futura siendo a veces más importantes que la tasa de deterioro.

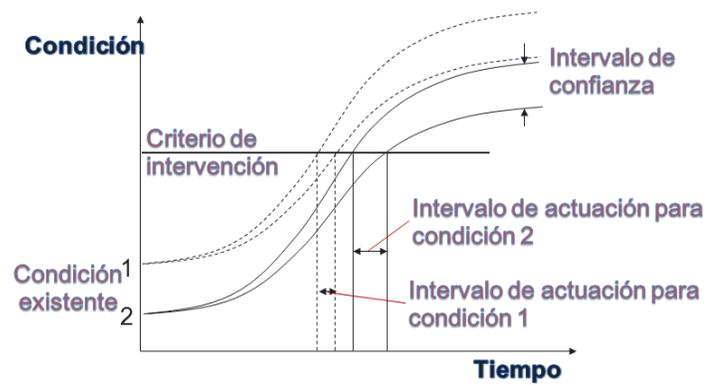


Figura 4.7: Impacto de los datos de entrada en la condición del pavimento.

Definir niveles en la calidad de la información permite estructurar la información requerida para la gestión, permitiendo así satisfacer las necesidades de toma de decisiones y métodos para la recolección y procesamiento de datos.



Figura 4.8: Pirámide de niveles de importancia en los datos de entrada.

En la gerencia del camino, cinco niveles se han identificado para el uso general:

- IQL-1 representa la investigación fundamental, el laboratorio, teórico o electrónico-tipo datos donde muchas cualidades pueden ser medidas o ser identificadas.
 - IQL-2 representa un nivel de detalle típico de muchos análisis de ingeniería para una decisión del nivel del proyecto.
 - IQL-3 es un nivel más simple de detalle, de típicamente dos o tres cualidades, que se pudo utilizar para las aplicaciones grandes de la producción como encuesta sobre el red-nivel o de donde están apropiados los métodos de colección de datos más simples.
 - IQL-4 es una cualidad del resumen o de la llave que se utiliza en el planeamiento, informes de la administración superior, o alternativamente en la colección de datos baja de esfuerzo.
 - IQL-5 representa un nivel superior tal como indicadores de funcionamiento dominante, que pudieron combinar típicamente las cualidades dominantes de varios fragmentos de información.
- Todavía niveles más altos pueden ser definidos cuando son necesarios.

CAPITULO V

CALIBRACIÓN

5.1. DEFINICIÓN DE CALIBRACIÓN

Calibrar un modelo de deterioro consiste en definir un procedimiento de cálculo de factores de calibración numéricos, que modifican la predicción del modelo ajustándolo de acuerdo a la información provista por bases de datos de pavimentos de una región o país. Esto se realiza a través de la minimización de la diferencia entre las predicciones del modelo y un conjunto de datos de deterioro medidos en terreno.

El objetivo de la calibración es obtener modelos de predicción ajustados, que ofrezcan estimaciones más realistas y confiables de los deterioros y que permitan establecer planes de conservación que tiendan a optimizar los recursos disponibles y minimizar el costo total de operación del camino (costo total = costo de operación vehicular + costo de conservación + costo exógeno).

La calibración de los modelos de deterioro puede realizarse a dos niveles: para un camino o pavimento específico, o bien para un grupo de caminos, es decir calibración a nivel de proyecto y calibración a nivel de red respectivamente.

5.2. LIMITACIONES Y APLICABILIDAD DE LA CALIBRACIÓN

Ya que los modelos de deterioro son desarrollados con una base de datos empírica determinada y bajo condiciones específicas de clima, tipo y forma, materiales, etc., al ser estos utilizados bajo condiciones distintas, pueden presentarse diferencias considerables entre los deterioros que el modelo predice y los que se observan en la realidad, para reducir estos errores ó para verificar si el modelo es inadecuado o incompleto, detectando posibles debilidades y limitaciones, los procedimientos de calibración o ajuste resultan muy útiles. Las causas de las diferencias son las siguientes:

- ✓ Errores en los datos observados: debido a inadecuadas técnicas de medición, mal registro de los datos ó toma datos que no correspondan.
- ✓ Errores en los datos estimados: en aquellos datos sobre los cuales no se disponga toda la información necesaria y deben ser estimados, el error en la estimación muy probablemente ocasiona error en la predicción.
- ✓ Condiciones diferentes a las originales del modelo: si el modelo se aplica fuera de su espacio de inferencia original.
- ✓ Modelo Inadecuado: si el modelo no contiene algunas variables que son claramente importantes, ya sea porque no resultaron estadísticamente significativas con los datos originales o porque un proceso de análisis poco profundo o incompleto no las tuvo en cuenta, esto puede ocasionar una mala predicción.
- ✓ Aleatoriedad del comportamiento de los materiales y las estructuras: siempre existe un cierto margen de error introducido por un comportamiento aleatorio o estocástico de los

materiales que componen las estructuras en el mundo real que genera dispersión en los resultados.

Para calibrar un determinado modelo de comportamiento de pavimentos es necesario contar con un conjunto de datos de deterioro que permitan reconstruir la curva de su comportamiento real, por lo que es conveniente que estos datos pertenezcan a un período más o menos prolongado de tiempo. La calibración, consiste entonces en encontrar factores (k_i) que logren el mejor ajuste entre las predicciones del modelo y los datos medidos en terreno [Videla et al 1995; Kannemeyer 1996].

Para poder efectuar este mantenimiento o rehabilitación de un pavimento en el momento oportuno es necesario predecir con la mayor precisión posible el comportamiento de estos a través del tiempo, lo que se logra realizando la calibración de las curvas de evolución del deterioro.

En la Fig. 5.1 se muestran curvas genéricas con el objetivo de comprender mejor y justificar los beneficios del proceso de calibración. La curva ajustada es la que pasa por el valor observado de deterioro. Las otras curvas corresponden a situaciones de sobrepredicción o subpredicción del deterioro.

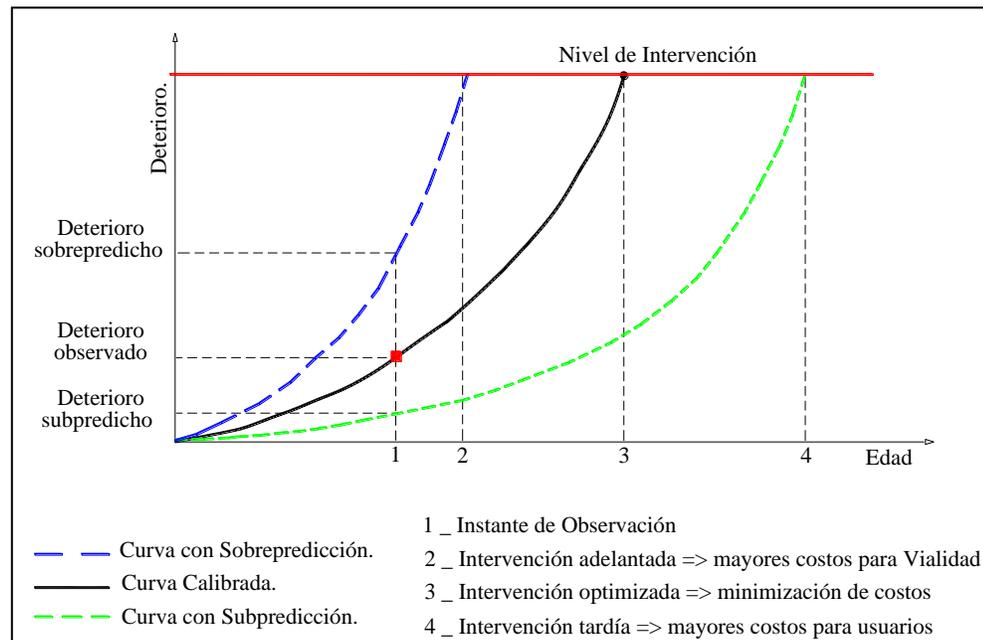


Figura 5.1. Comparación entre curvas de deterioro calibradas, con sobrepredicción y con subpredicción

Del esquema presentado en la Fig. 5.1 se deduce lo siguiente:

- ✓ En una curva con sobrepredicción, se estiman deterioros superiores a los que se presentan en la vida real de un pavimento, para un mismo instante. La sobrepredicción de deterioros genera mayores gastos de mantenimiento del pavimento, ya que las intervenciones se aplican antes de lo necesario.
- ✓ En una curva con subpredicción, por el contrario, se predicen deterioros inferiores a los que realmente se presentan, y las intervenciones se aplican tardíamente. En consecuencia los que se verán afectados, con mayores costos en este caso, son los usuarios del camino por el deficiente estado del mismo.

- ✓ Por último en una curva calibrada, se está en el caso ideal. Se rehabilita el pavimento en el momento oportuno, por lo que se logra la optimización de los recursos disponibles.

En definitiva, la calibración de modelos posibilita no sólo contar con ecuaciones que tengan una mejor predicción del deterioro a futuro, sino también optimizar los programas de conservación de carreteras, y profundizar el conocimiento del comportamiento real de los pavimentos a nivel local o regional.

5.3. CONCEPTO DE CONFIABILIDAD

Como con cualquier modelo, los modelos de HDM son una representación de la realidad y las predicciones de esta realidad dependen de una combinación de:

- ✓ Validez de las relaciones subyacentes del modelo basado de HDM;
- ✓ Exactitud y suficiencia de los datos de entrada;
- ✓ Factores de la calibración usados en el análisis.

5.3.1 PRECISIÓN Y SESGO

La única manera de evaluar la precisión de las predicciones del HDM es por la comparación de la predicción de los modelos de datos conocidos. Por ejemplo, podemos tener datos de rugosidades de una serie de pavimentos de edades conocidas. Utilizando HDM para predecir la condición de los pavimentos de edades similares con características similares cuando estos eran nuevos, podemos evaluar si HDM está dando predicciones apropiadas.

Hay dos consideraciones al comparar los datos observados y los datos previstos:

- ✓ **Sesgo:** Una diferencia sistemática que se plantea entre los valores observados y previstos. Por ejemplo, si las predicciones son siempre el 10 por ciento inferiores a los datos observados. La definición formal de sesgo es la diferencia entre la media pre vista y la media de los valores observados.

- ✓ **Precisión:** Una medida de cuan cerca están los datos observados y previstos. Es representada por la inversa de las varianzas ($\sigma_{\text{obs}}^2/\sigma_{\text{pre}}^2$), es decir, que se refleja en la dispersión cuando se trazan los datos previstos-observados. La precisión es influida por la variación estocástica inherente de la mayoría de los procesos naturales, errores de medición y de observación, y sin explicación de los factores omitidos desde las relaciones en el modelo.

La Figura 5.2 ilustra estos dos conceptos para cuatro escenarios:

- ✓ Bajo Sesgo - Alta precisión (véase la Figura 5.2A)
- ✓ Bajo Sesgo - Baja de precisión (véase la Figura 5.2B)
- ✓ Alta Sesgo - Alta precisión (véase la Figura 5.2C)
- ✓ Sesgo Alto - Bajo de precisión (véase la Figura 5.2D)

En la Figura 5.2 la elipse sombreada representa los datos observados que han sido ploteados junto a los datos previstos. La línea sólida a 45 ° es la línea de igualdad, cuando lo observado es igual a lo previsto.

Cuando hay bajo sesgo, los datos estarán alrededor, o cerca de, la línea de igualdad. Como se muestra en la figura 5.2A (Bajo Sesgo y Alta Precisión), cuando hay una alta precisión hay poca dispersión en los datos. Sin embargo, una reducción en la precisión ve un aumento en la dispersión y, por tanto, la desviación estándar (Figura 5.2B (Bajo Sesgo y Baja Precisión)).

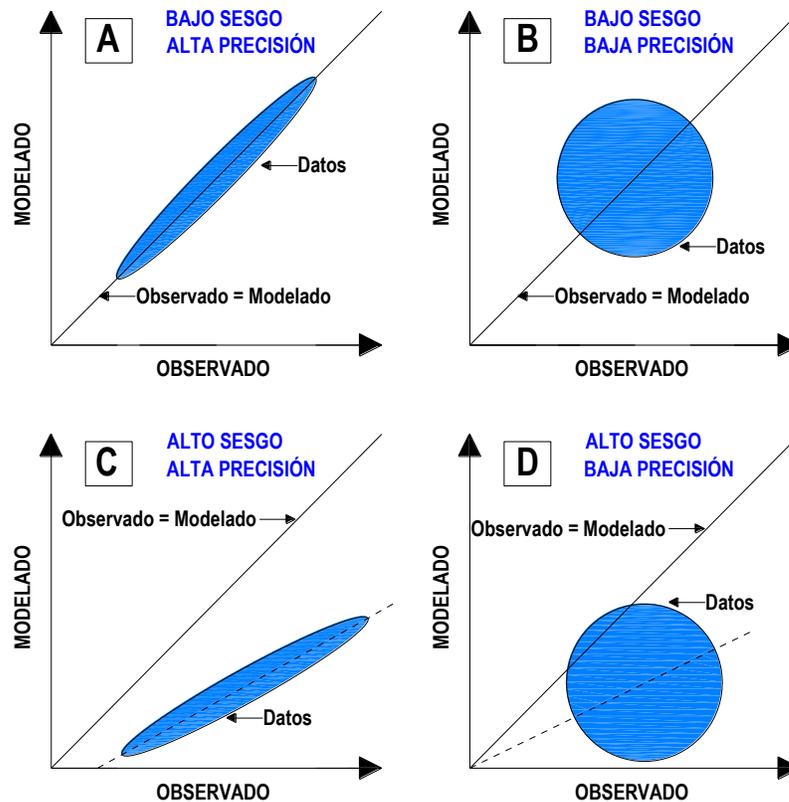


Figura 5.2 Ejemplo De Sesgo Y Precisión

Quando hay una alta precisión, el cambio de menor a mayor sesgo se observa que la pendiente de los datos observados es sistemáticamente diferente a la línea de igualdad. Esto se representa en la figura 5.2C (Alto Sesgo y Alta Precisión). Esta figura también muestra lo que sucede cuando existe, además, una diferencia sistemática, la pendiente de lo observado frente a la línea prevista no pasa por el origen.

La situación más difícil se ilustra en la Figura 5.2D (Alto Sesgo y Baja Precisión). En este caso, es a menudo difícil verificar la razonabilidad del modelo puesto que las diferencias podrían ser iguales debido a la escasa precisión en cuanto al sesgo.

NOTA 5.1 Consideraciones importantes:

- La calibración tiene que extenderse sobre la variedad llena de valores probablemente para ser encontrada
- El tamaño de muestra debe ser suficiente para descubrir la naturaleza de la tendencia y el nivel de precisión
- Una elevada r^2 (correlación) no siempre significa la exactitud alta, todavía puede haber tendencia significativa

5.3.2 FACTORES DE CORRECCIÓN

Existe el Sesgo a causa de las diferencias sistemáticas en lo observado contra los valores previstos. Los factores de corrección son usados para corregir estos sesgos. Como se muestra en la figura 5.3, existen dos tipos de factores de calibración: Rotación y Traslación. Una o ambas pueden estar presentes.

En el más simple de los casos, el sesgo puede ser expresado como la relación entre la media observada y la media prevista. Por lo tanto, el factor de corrección sería:

$$CF_{rot} = \frac{\textit{Media Observada}}{\textit{Media Prevista}}$$

Esto se conoce como factor de corrección de la rotación, ya que, como se ilustra en la Figura 5.3A, las predicciones son rotadas hacia abajo para que correspondan con los datos observados.

El factor de traslación es usado cuando existe una diferencia constante entre los valores observados y los previstos en todas las condiciones (ver Figura 5.3B). Un ejemplo de esto es cuando los costos de operación de los vehículos son sobreestimados ya que están indebidamente incluidos los gastos generales. En este caso el factor de corrección es:

$$CF_{trans} = \text{Media Observada} - \text{Media Prevista}$$

La Figura 5.3C muestra el tercer caso cuando existe una combinación de la rotación y la traslación.

5.3.3 PRECISIÓN EN LOS DATOS DE ENTRADA

El sesgo y la precisión también entran en juego en el establecimiento de los datos de entrada para HDM. Esto se debe a que cuando la cuantificación de los datos de entrada, se obtiene una muestra de mediciones cuyas propiedades se presume que son iguales que la de la población subyacente. El sesgo se expresa a menudo como:

$$\text{Sesgo} = \frac{\text{Media de Muestra}}{\text{Media de Población}}$$

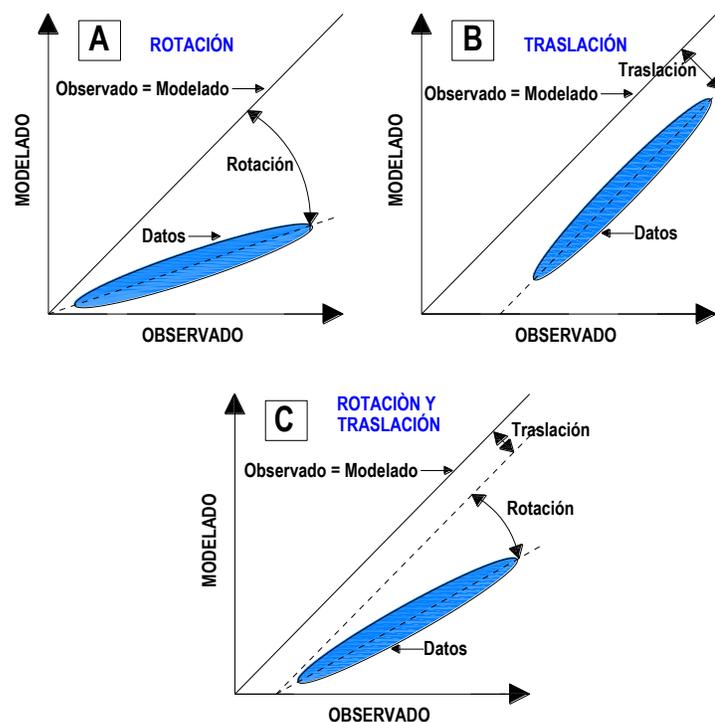


Figura 5.3 Factores De Corrección

Como se ilustra en la Figura 5.4, cuando la media de la muestra es diferente a la media de la población, la muestra es sesgada. Si la media es igual pero la varianza es diferente, es un problema con la precisión (ver Figura 5.5).

En la cuantificación de los datos de entrada el objetivo es garantizar que la distribución de los datos de muestra es similar a los de la población. Esto se consigue mediante la utilización de técnicas de muestreo estadístico que aseguran que existe un tamaño de muestra suficiente para limitar los errores de muestreo aleatorio.

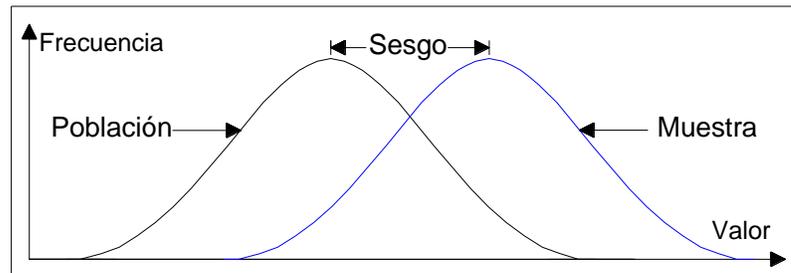


Figura 5.4 Sesgo en los Datos de Muestra

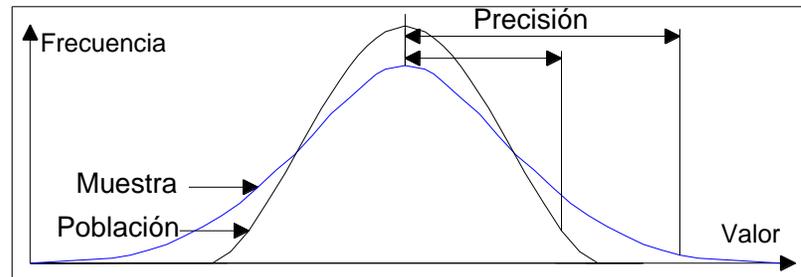


Figura 5.5 Precisión en los Datos de Muestra

NOTA 5.2 Precisión y Sesgo

- El objetivo principal es reducir al mínimo el sesgo.
- Siempre hay una compensación de beneficio/costo cuando se va a la precisión. La precisión alta es costosa y recurso intensivo mientras que las técnicas con costos menores por lo general causan la precisión inferior.
- Si el sesgo es bajo, uno puede aceptar por lo general datos de precisión inferiores ya que el medio observado y predicho será similar (ver figura 5.2-B). Si el sesgo es alto, es importante tener datos de precisión altos a fin de averiguar la naturaleza del sesgo (ver figura 5.2-C). El sesgo alto y los datos de precisión bajos (ver figura 5.2-D) hacen imposible aplicar exactamente el modelo.

5.3.4 LIMITES EN LOS SEGOS

Es importante que el sesgo en las predicciones del modelo se limitara a fin de garantizar que los resultados son correctos. Cada uno de los elementos de datos y los parámetros del modelo pueden tener sus propios sesgos, y los procesos que están modelados por HDM son complejos, es muy difícil determinar la tendencia neta de los efectos de los múltiples parámetros.

El objetivo de la calibración se define con respecto a la repercusión de un parámetro, pero muy aproximada con respecto a los efectos de todos los parámetros. Los objetivos de la calibración, con excepción de la falta fundamental de ajuste del modelo, son para reducir cualquier sesgo de las predicciones del modelo a niveles aceptables. Nivel 2, siendo de un nivel superior, se destina a producir menos residuos en el sesgo de las predicciones del modelo que de un nivel 1 de calibración.

Una calibración de nivel 3 tiene como objetivo mejorar tanto la precisión y el sesgo por la reconfiguración de una o más relaciones en el modelo. Por lo tanto, requiere un amplio alcance y la base de datos con el fin de detectar y determinar adecuadamente los muchos factores, los efectos e interacciones.

5.3.5 NIVELES DE CALIBRACION

Hay tres niveles de calibración de HDM, que implican bajos, moderados y grandes niveles de esfuerzo y recursos, como sigue:

- ✓ Nivel 1 – Aplicación Básica: Determina los valores de los parámetros básicos requeridos, adopta muchos valores por defecto, y calibra el más sensible a las mejores estimaciones de parámetros, mesa de estudios o encuestas sobre el terreno mínimo.
- ✓ Nivel 2 – Calibración: Requiere la medición de otros parámetros de entrada y moderada de las encuestas sobre el terreno de predicción clave para calibrar las relaciones a las condiciones locales. Este nivel puede dar lugar a una ligera modificación del modelo de código fuente.
- ✓ Nivel 3 – Adaptación: Lleva a cabo importantes estudios sobre el terreno y experimentos controlados para mejorar la relación existente predictivo o para desarrollar nuevas relaciones específicas a nivel local y de sustitución en el código fuente del modelo.

En términos de esfuerzo, estos tres niveles se pueden ver cómo semanas, meses y años. Un analista debe ser capaz de realizar una calibración de nivel 1 en alrededor de una semana. Para una calibración de nivel 2 hay un aumento en la cantidad de esfuerzo necesario para que se tome al menos un mes. Nivel 3 calibraciones exigen un compromiso a largo plazo de la recopilación de datos básicos por lo que su alcance se extiende durante un año o más. Cada análisis HDM requiere al menos un Nivel 1 de calibración.

Figura 5.6 ilustra este concepto de aumentar el esfuerzo y el aumento de los recursos. Es preciso tener presente que existe una relación directa entre el tiempo y el esfuerzo invertido en la creación de HDM y la fiabilidad y exactitud de sus resultados.

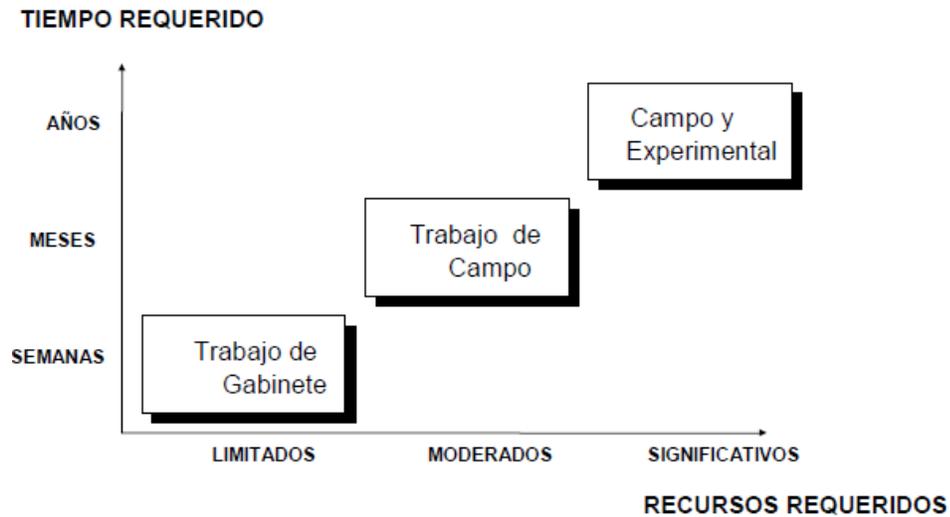


Figura 5.6 Recursos y el tiempo necesarios para las calibraciones.

Como se muestra en la Tabla 5.1, un concepto relacionado con una jerarquía de calibración con el aumento de los niveles de actividad se propuso por Curtayne et al. (1987) en cuanto a los Costos de Operación de los Vehículos (COV). Señalaron que las actividades de calibración se pueden basar en las fuentes de datos primaria y secundaria. Las fuentes primarias se basan en la comparación directa entre los costos y características de la carretera mientras que la fuente secundaria de datos proporcionan información sobre lo económico o las condiciones de operación de una región.

La calibración de los resultados de COV varía de la selección disponible de las relaciones sobre la base de pocos datos para la estimación de las relaciones locales, especialmente utilizando los datos recopilados. Las siguientes secciones describen los componentes de calibración de nivel 1 al nivel 3.

5.3.5.1 Nivel 1 - Aplicación

Para ejecutar HDM siempre es necesario llevar a cabo al menos un Nivel 1 de calibración, lo que puede considerarse como un conjunto de inversiones para el modelo. Una vez hecho esto, por lo general no necesita ser repetido en la mayoría de los archivos de datos de entrada durante las futuras aplicaciones en el mismo país, ya que muchos elementos de datos y la mayoría de los parámetros del modelo son relativamente estables en el tiempo.

Una calibración de nivel 1 se basa principalmente en fuentes secundarias, es decir, se trata de un estudio teórico. Por ejemplo, los parámetros de RUE se pueden calcular usando los datos desde las fuentes tales como las gubernamentales, publicaciones de la industria, las organizaciones o diversos informes RUE de los estudios anteriores. Para carreteras deterioradas, las fuentes estadísticas que incluyen el clima, el tráfico de la carretera y las condiciones estadísticas, geometría estándar, programas de mantenimiento y presupuestos.

Se puede suponer que la mayor parte de los parámetros del modelo HDM por defecto son adecuados para las condiciones locales de modo que sólo los más críticos deben abordarse.

Los siguientes datos de entrada deben obtenerse para un Nivel 1 de calibración:

- ✓ Los costos unitarios. (RUE y RDWE)
- ✓ Determinadas características de los vehículos representativos.
- ✓ Análisis económico de datos. (tasas de descuento y el período de análisis)

- ✓ Características del pavimento. (RDWE estudios)
- ✓ Composición del tráfico y las tasas de crecimiento.
- ✓ Tipo de clima regional.

Tabla 5.1 RUE datos de calibración y la jerarquía de las fuentes de recursos.

TIPO DE DATOS	FUENTES O NECESIDADES	AUMENTO DE LOS RECURSOS NECESARIOS		
Secundaria disponible	Publicaciones gubernamentales. Industria de los informes técnicos. RUE informes de investigación. Del fabricante de la literatura. Informes del consultor. Las organizaciones. Inventarios de las condiciones de la carretera.	Escoger primero los resultados de los estudios que corresponden a las condiciones locales.	Selecciones el conjunto de datos y los tipos de vehículos. Calibración de los Modelos mecanicistas debido a los cambios tecnológicos.	Examinar los valores de intersección y de pendiente para los tipos de vehículos disponibles con el costo y los datos de condición de la carretera.
Encuesta de calibración	La investigación en pequeña escala recolecta datos de costos de las empresas que operan a través de una amplia gama de características de la carretera. Personal con conocimientos de la industria. Las tasas de encuesta. Ruta de clasificación.	Confirmar valores de intersección y pendiente y evaluar las magnitudes. Determinar la utilización de vehículos por la edad y las condiciones de la carretera.	Presupuesto de los neumáticos y los costes de depreciación. Confirmar valores de pendiente para los costos totales.	Estimar la nueva relación real, especialmente para los costos de mantenimiento. Compara la predicción RUE con tasas.
Calibraciones Experimentales	Investigación a pequeña escala de rendimiento del vehículo y características de la carretera. Personal capacitado. Capacidad analítica.	Calibración de la velocidad.	Calibración del consumo de combustible.	Estimación de nuevas relaciones, por ejemplo, para la resistencia a la rodadura y la rugosidad de la carretera.

El HDM a menudo requiere una amplia gama de entrada de datos y parámetros de calibración, esto es lo más importante para establecer la necesidad de utilizar el Nivel 1 de Calibración, por lo que los valores por defecto del HDM deben ser de uso casi exclusivo.

5.3.5.2 Nivel 2 - Calibración

Un nivel 2 de calibración utiliza mediciones directas de las condiciones locales para verificar y ajustar la capacidad predictiva del modelo. Se requiere un mayor grado de recolección de datos y la precisión que el de un Nivel 1 de Calibración, y se extiende el ámbito de aplicación. Para RUE, se concentra en la velocidad, el consumo de combustible, el consumo de neumáticos, consumo de las partes y los costos fijos relacionados con la utilización de vehículos y la edad. Para RDWE, se concentra en los modos de inicio del deterioro superficial, progresión de ahuellamientos, y los efectos de mantenimiento, y mejora la estimación de los impactos ambientales. Para el análisis económico, esto destaca los datos de costos más cerca que los costos observados y nivel de precios mediante la recopilación de datos de encuestas. Con Nivel 2 de calibraciones, los datos de entrada poseen mayor detalle que los recogidos con Nivel 1.

5.3.5.3 Nivel 3 - Adaptación

Un nivel 3 de calibración generalmente comprende de dos componentes:

- ✓ Mejorar la recopilación de datos.
- ✓ La investigación fundamental.

Algunos elementos de datos se puede estimar con bastante precisión utilizando cuentas a corto plazo, por ejemplo, la distribución horaria del volumen de tráfico, sin embargo la fiabilidad es mucho mayor por la recogida de datos en más sitios en un periodo más largo.

La investigación fundamental considera las relaciones utilizadas en HDM. Esta estructura se compone de las encuestas sobre el terreno y los estudios experimentales realizados en virtud de las condiciones locales que conducen a otras relaciones. Por ejemplo, las funciones alternativas se pueden desarrollar para predecir el consumo de combustible o el deterioro de un pavimento nuevo y las funciones del efecto de mantenimiento para diferentes tipos de pavimento. Esta labor exige un gran compromiso con la buena calidad y buena estructura de investigación de campo y análisis estadísticos durante un período de varios años. Deterioro del pavimento es una investigación a largo plazo, por lo general requiere de un mínimo de 5 años.

5.3.6 ADAPTACION DE LOS DATOS AL MODELO

Los datos representan la información particular que describe la existencia del caso analizado y los insumos específicos para el modelo que son requeridos por el usuario. Los ejemplos incluyen el volumen de tráfico y su composición, la geometría vial, tipo de pavimento y condición, los costos unitarios, etc. Estos datos son, por lo tanto, fundamentalmente diferente de los parámetros internos y los coeficientes del modelo de simulación que requieren de calibración, un error en un dato significa que el modelo es analizado en un caso diferente del que se pretende, al igual que entrar en un destino equivocado en una instrucción.

Por ejemplo, la exactitud de los datos de entrada puede tener repercusiones importantes en el calendario de futuras intervenciones, a veces más importantes que la tasa de deterioro. Esto se debe a que el HDM utiliza modelos incrementales modelos y la condición existente es el punto de inicio para la elaboración de modelos. Esto se ilustra en la Figura 5.7 que muestra algunos criterios de intervención con una diferencia en la condición inicial, marcando diferentes momentos para intervenciones futuras.

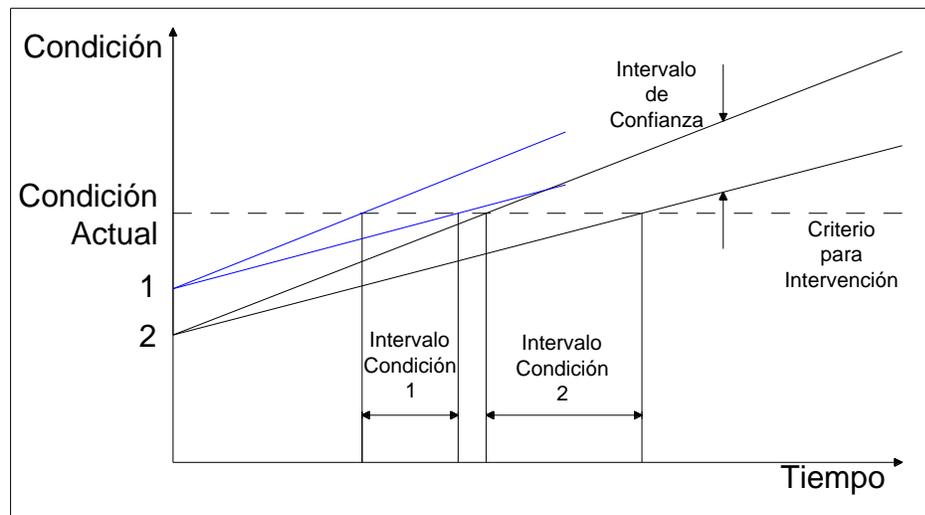


Figura 5.7 Efecto de la condición existente en provocar el mantenimiento.

Así como la información puede ser imprecisa o muy precisa, el modelo HDM puede funcionar, ya sea con información muy simple o una información mucho más detallada. Sin embargo, por la naturaleza de los modelos de simulación y el software, los parámetros de entrada del modelo son fijos y explícitos.

Por último, nos fijamos en cómo el usuario se encarga de las cuestiones relacionadas con la exactitud y la aproximación. Estos a menudo tienen importantes implicaciones para el funcionamiento de un sistema de gestión de carreteras, pero también tiene un impacto en la fiabilidad de los resultados y decisiones.



CAPITULO VI METODOLOGIA DE CALIBRACIÓN

6.1 INTRODUCCION A LA METODOLOGIA DE CALIBRACION.

Este capítulo se ha estructurado para proporcionar a un usuario final la metodología y procedimientos para realizar la calibración del nivel 2, esto también debe incluir la disposición y la supervisión de los segmentos de pavimentos de prueba requeridos para la calibración acertada de los modelos de deterioro en el país, para las variaciones y las diferencias regionales. Debe ser acentuado que el establecimiento de sitios de la calibración no está requerido necesariamente para la calibración del nivel 2.

Para calibrar un determinado modelo de deterioro es necesario un conjunto de datos de terreno que permita reconstruir la curva de comportamiento, debiendo abarcar un período más o menos prolongado. La calibración, para los modelos HDM-IV, consiste en encontrar los factores K_i que logren el mejor ajuste entre la curva del modelo y los datos medidos. Existe un programa computacional desarrollado por la Pontificia Universidad Católica de Chile, denominado "Sistema para la Auto calibración del Deterioro" o SAD (Gaete et al., 1991), que permite efectuar dicho ajuste minimizando la sumatoria de los cuadrados de las diferencias entre el modelo calibrado y los datos observados (SSD), según se muestra en la Figura 6.2. Sin embargo, dicho programa solo simplifica las acciones requeridas para el procedimiento (mínimos cuadrados), lo cual no lo hace indispensable.

Según la forma de obtención de los datos, pueden definirse dos metodologías de calibración. La primera consiste en ir registrando la evolución del deterioro de un mismo pavimento a lo largo de un intervalo relativamente prolongado (5 años, por ejemplo); se obtiene de esa forma un modelo

calibrado por tramo testigo. Pero deben registrarse datos por un período más largo aun si se pretende una buena confiabilidad en la predicción.

La segunda manera de efectuar la calibración es a través del método de "ventanas". Dicho método, ilustrado en la Figura 6.1, consiste básicamente en seleccionar una serie de tramos que tengan características similares pero edades diferentes, a fin de registrar el estado de deterioro de cada uno y reconstituir la curva de comportamiento. Se define como "tramo" un sector de camino que en toda su extensión presenta uniformidad en sus variables más representativas, como ser estructura, tránsito, geometría, etc. (Videla et al., 1992). Ejemplificando, supongamos que todos los tramos de tipo "A" tienen valores similares de tránsito, capacidad estructural, condiciones ambientales, etc. Cada tramo es una "ventana". Puede suponerse que los modelos de comportamiento de dichos tramos individuales serán muy parecidos, por lo cual podrían asimilarse a un pavimento único.

6.2 METODOLOGIA DE VENTANAS

La metodología denominada “ventanas”, que consiste en reconstruir la curva de evolución del deterioro de una categoría de caminos a partir de la observación de la condición de distintos caminos que tengan similares características (principalmente tránsito, capacidad estructural del pavimento y condiciones climáticas) pero con edades diferentes.

Para efectos de aplicación de esta metodología, el primer paso consiste en definir tramos homogéneos de caminos, en cuanto a sus variables más representativas (clima, estructura, tránsito, geometría). Cada uno de estos tramos se considera entonces, como una “ventana” en la curva de comportamiento de un sector que, junto con otras “ventanas”, puedan asimilarse al comportamiento en el tiempo de un pavimento único. A cada conjunto de tramos o “ventanas” que presentan uniformidad en sus variables representativas, se les denomina “categoría”. Cada categoría que se presente en la práctica, al aplicar esta metodología, contaría con sus propios factores de calibración k_i .

Para definir las variables principales del experimento, se debe analizar las ecuaciones de los modelos de comportamiento de pavimentos, estableciéndose que la evolución de los pavimentos en el tiempo depende, fundamentalmente, de cuatro variables globales: tránsito, edad del pavimento (desde su construcción o última rehabilitación), condiciones climáticas imperantes y capacidad estructural, las cuales definen tanto el inicio como la progresión del deterioro que en ellos se puede presentar, junto con la interacción entre las diferentes manifestaciones de daño y desgaste superficial.

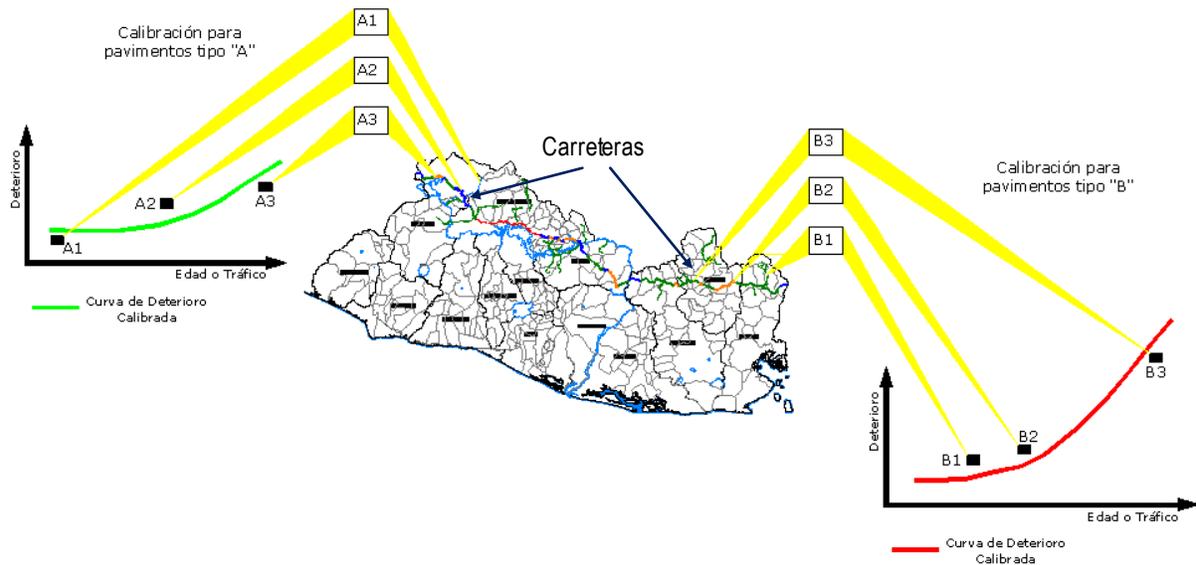


Figura 6.1 Metodología de Ventanas

De esta forma, se debe conformar el factorial del experimento, y para cada categoría, se recomienda incluir la mayor cantidad de tramos homogéneos con una rango amplio de edades, a fin de reconstituir curvas de comportamiento en un período extenso de vida del pavimento.

Una vez definido el factorial del experimento, se debe establecer un procedimiento de selección de tramos por categoría, que, a la vez debe compatibilizar simultáneamente dos criterios:

1. Contar con un número suficiente de tramos por celda a fin de disponer de una cantidad mínima de datos de deterioro para efectos de lograr una adecuada calibración de los modelos de predicción del comportamiento.

2. La amplitud de los rangos debe ser en lo posible lo suficientemente pequeña, para asegurar la mayor similitud y homogeneidad de las características para los distintos tipos de pavimento, y con ello asegurar una mayor confiabilidad de la calibración.

Con los tramos ya definidos se deberá proceder con la medición de los deterioros en el pavimento.

El objetivo principal de la metodología de medición es obtener un número suficiente de muestras que permita estimar el deterioro promedio con una confiabilidad aceptable y un rendimiento óptimo respecto de las mediciones en terreno. De esta forma, se debe realizar la inspección visual de deterioros y mediciones de ahuellamiento de los tramos finalmente utilizados.

Para llevar a cabo la calibración estadística de los modelos de comportamiento de pavimentos asfálticos, el procedimiento propuesto se basa, principalmente, en la determinación de factores que permitan lograr un mejor ajuste de las curvas de deterioro simulado a los datos de comportamiento real. Para ello, se siguieron dos procedimientos distintos, dependiendo si el factor a determinar correspondía a la fase de inicio o de progresión del deterioro.

El procedimiento propuesto para la calibración de los factores de inicio de deterioros superficiales, se basa en la obtención del cociente entre el año observado de aparición del deterioro y el año de aparición predicho por el modelo sin calibrar. Para el caso de los factores de progresión, la calibración se realiza mediante la minimización de los cuadrados de las diferencias de los datos estimados y los observados (SSD, Sum of Squared Differences).

Cabe señalar que se debe programar en planillas electrónicas cada una de las ecuaciones de los modelos de comportamiento, de modo de facilitar el proceso de calibración, encontrar las variables más sensibles de los modelos y detectar posibles errores en el software.

En otros países como Chile, cuyo trabajo en la gestión de carreteras y la utilización tanto del HDMIII como la del HDM-4, se ha validado la utilización de la metodología de las “ventanas”, pues permite obtener un rango amplio de datos de entrada, lo que de otra manera no sería posible dado lo exiguo del plazo impuesto. Lo anterior posibilita la modelación de diversos deterioros en forma simultánea, con curvas en un rango amplio de tiempo y para diversas estructuras de pavimento.

6.3 DEFINICION DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES

6.3.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES Y DISEÑO DEL FACTORIAL DEL EXPERIMENTO

Del análisis de las ecuaciones de los modelos de comportamiento de pavimentos asfálticos [Odoki y Kerali 2000], se puede establecer que la evolución de los pavimentos en el tiempo depende fundamentalmente de cuatro variables globales: tránsito, edad del pavimento (desde su construcción o última rehabilitación), condiciones climáticas imperantes y capacidad estructural, junto con la interacción entre las diferentes manifestaciones de daño y desgaste. Dichas variables definen tanto el inicio como la progresión del deterioro. Asimismo, la existencia de algunos tipos de deterioro influye considerablemente en la progresión de otros; por ejemplo, la pérdida de áridos y el agrietamiento resultan muy importantes en el futuro incremento de los baches, y éstos a su vez contribuyen a aumentar la rugosidad (Paterson, 1987).

Para seleccionar un conjunto de caminos que posean características similares, que garanticen cierta confiabilidad al evaluar su comportamiento, el primer paso que se debe realizar es la creación de una matriz que, mediante la combinación entre los distintos niveles de sus variables (las cuatro antes mencionadas, junto con una quinta variable encargada de diferenciar las estructuras originales de las rehabilitadas), permitiendo definir las distintas categorías de caminos que conformaron el *factorial del experimento* [de Solminihac 1987]. Para cada categoría se trata

de incluir la mayor cantidad de tramos homogéneos con edades lo más diferentes posible, a fin de reconstituir curvas de comportamiento con la mayor representatividad en el tiempo.

Una vez definidas las variables independientes (o factores) del estudio, se fijan los criterios que permitan determinar en cuántos niveles deben subdividirse cada una de ellas. De este modo, se establecen tres niveles para **el tránsito** (expresado en ejes equivalentes diarios) y **la capacidad estructural** (especificada a través de la deflexión en mm): alto, medio y bajo. Por otro lado se deben establecer tres **zonas térmicas** (alta, media y baja) que servirán para definir los niveles correspondientes al clima. **La edad del pavimento** puede clasificada en tres niveles: inicial, medio y final. Finalmente para la variable que define el tipo estructura se consideraron dos aspectos: el tipo de estructura (original o rehabilitada) y el tipo de capa de rodadura (mezcla asfáltica o concreto hidráulico, para nuestro caso). De esto ya se hablo ampliamente en la sección 4.2 de este documento.

6.4 METODOLOGIA DE SELECCIÓN DE TRAMOS MUESTRALES

6.4.1 CRITERIOS GENERALES A EMPLEAR

Una vez definido el factorial del experimento o variables independientes, corresponde fijar criterios que permitan determinar en cuántos niveles debe subdividirse cada una. En las variables de tipo numérico, tales como tránsito, deflexiones y edad, se han definido los niveles como subdivisiones continuadas del rango de valores que presenta la variable, es decir que coincide el límite superior de un nivel con el inferior del nivel consecutivo. Los "rangos por nivel" tienen como función delimitar el espacio de inferencia de los modelos para las distintas categorías, de modo de asegurar una cierta confiabilidad en la predicción de dichos modelos.

Se recomienda clasificar al tránsito según tres niveles: bajo, medio y alto. Un número inferior de niveles no refleja adecuadamente la amplia gama de valores que presenta esta variable, pero asumir más niveles implica la necesidad de contar con más datos, y además se reduce el número de tramos disponible dentro de algunas categorías. Para las deflexiones, el rango de valores es bastante más reducido que para el tránsito. Sin embargo, en este estudio se pudo comprobar que la variación relativa de las deflexiones tiene mayor influencia sobre la rugosidad del pavimento que la variación del tránsito, por lo cual debería subdividirse en al menos tres niveles (deflexión alta, media y baja). Más niveles no son convenientes por razones análogas al caso del tránsito.

La fijación de los niveles para tránsito y deflexiones se realiza mediante la metodología descrita en la Figura 6.2, considerando como criterios rectores, tanto el minimizar el error en la predicción,

como el contar con un número suficiente de tramos muestrales que permitan calibrar los modelos para distintas categorías.

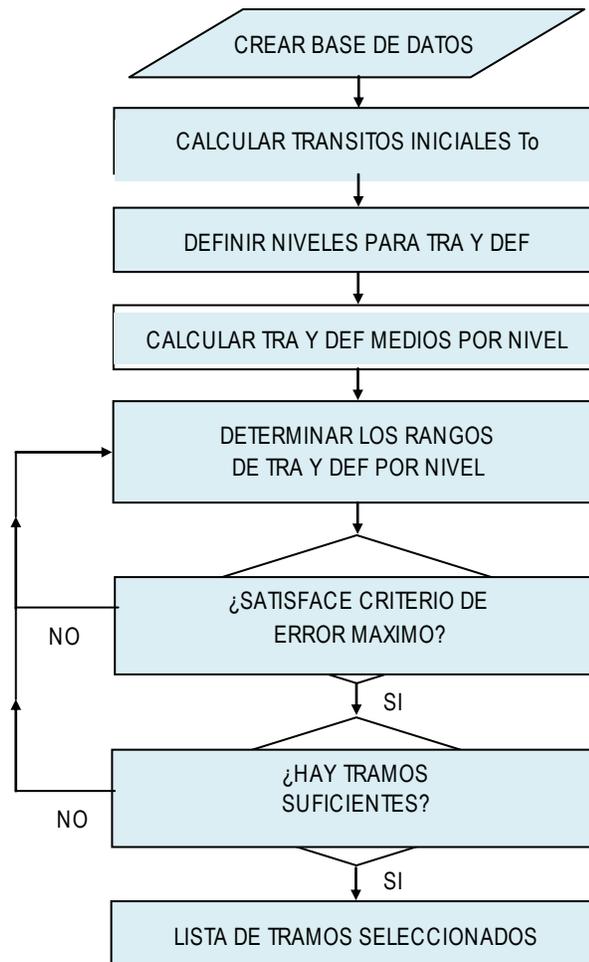


Figura 6.2 Diagrama de metodología de calibración.

Respecto a las otras variables, resultan también tres niveles para cada una (incluido el tipo de estructura, debido a la diferenciación por capas de rodadura en las estructuras originales). De esta manera, el diseño inicial del factorial queda tal cual se presentó en la Tabla 6.1. Dentro de la tabla, las categorías están definidas por las diferentes combinaciones entre niveles de las

variables dispuestas horizontalmente (tránsito, deflexión y clima); por consiguiente, cada categoría tiene tres celdas en la misma vertical. Cada una de esas celdas deberá contener tramos cuyas edades pertenecen a diferentes etapas en la vida de un camino.

Según la tabla 4.2, nuestro país se encuentra clasificado en la categoría de **Subtropical Cálido**; las tablas 6.1 y 6.2 presentan un ejemplo ilustrativo de lo que es el factorial del experimento; en ellas se clasifica el de acuerdo a la zonificación térmica realizada por el SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales).

Ya que el clima es el promedio de los eventos climatológicos que ocurren a diario en una región, la clasificación del SNET está dentro de lo expuesto en la tabla 4.2, y es de la siguiente forma:

De 0 a 800 metros (o sabana tropical caliente)

Promedio de temperatura disminuyendo con la altura de 27 a 22 ° C en las planicies costeras y de 28 a 22 ° C en las planicies internas. (A)

De 800 a 1,200 metros (sabana tropical calurosa)

Promedio de temperatura disminuyendo con la altura de 22 a 20 C en las planicies altas y de 21 a 19 C en las faldas de montañas. (M)

De 1,200 a 2,700 metros

De 20 a 16 ° C en planicies altas y valles, de 21 a 19 en faldas de montañas y de 16 a 10 C en valles y hondonadas sobre 1,800 metros. (B)

suficientemente distanciados en el tiempo. En definitiva, es el operador o encargado de la recolección de datos quien debe aceptar o desechar alguna categoría a efectos de la calibración analizando el caso particular, en base a disponibilidad de datos, importancia de la categoría en cuestión, etc.

El procedimiento de selección de tramos por categoría que debe compatibilizar simultáneamente dos criterios:

1. Contar con un número suficiente de tramos por celda para disponer de una cantidad mínima de datos de deterioro a efectos de lograr una adecuada calibración de los modelos de predicción de comportamiento;
2. La amplitud de los rangos debe ser en lo posible lo suficientemente pequeña, para asegurar la mayor similitud y homogeneidad de las características para los distintos tipos de pavimento, y con ello asegurar una mayor confiabilidad de la calibración.

6.4.2 RECOMENDACIONES PARA SELECCIÓN DE TRAMOS TESTIGOS.

En esta sección se dan recomendaciones para el establecimiento de los puntos de calibración. La sección de mínima recomendada a utilizar es de 300 m. Es posible tener longitudes mayores (por ejemplo, 600 m ó 1200 m) que se subdividan en 300 m de longitud. Si ya se tienen las longitudes de los tramos, es importante que estos sean homogéneos, como se explica en las secciones anteriores de este documento.

El tramo debe estar en una recta y la pendiente debe ser menor del 3%. El número de secciones depende de la situación particular del experto encargado de la labor, sino como mínimo, debe

utilizarse la matriz de diseño de la tabla 6.2, donde se compiló el supuesto de que hay un tipo de pavimento típico y tipo de superficie en la red.

Si más tipos de superficie o pavimento tipo existen en una red que se incluirán en el diseño de la matriz y que se traducirá en más secciones. Además, se debe tener en cuenta que el número de secciones puede ser reducida si los parámetros se superponen, por ejemplo con secciones de alta ahuellamientos y grietas.

Con el fin de calibrar la progresión de algunos modelos (por ejemplo, grietas y ahuellamientos) podría requerir la esterilización de algunas secciones, es decir, que ningún mantenimiento en las secciones que no sean relacionadas con la seguridad tales como el mantenimiento bache reparaciones.

El marcado de las secciones es crítico y varios métodos se podrían estudiar en particular:

- ✓ puesto de marcador de inicio y el final de las secciones;
- ✓ Marcas de pintura en la superficie;
- ✓ Grabación de video de las secciones, y
- ✓ Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de grabación de las secciones de inicio y fin.

El método elegido por el encargado debe depender de las condiciones y prácticas de la zona, pero se debe tener cuidado de que los artículos no están "perdidos", a raíz de acciones de repavimentación. El sistema también debe ser establecido para asegurar que el mantenimiento no se realiza en las secciones esterilizadas. Una regla general es siempre mantener archivo de todas las fotos, notas de campo y toma nota de la inspección en las secciones.

Es importante calibrar el modelo con el fin de lograr la simulación de la realidad. Por lo tanto, si este aspecto es una cuestión en una red en específico el espesor de a superficie se debe incluir en el diseño de la matriz. Esto necesariamente aumenta el número de secciones de calibración significativamente.

Tabla 6.3 Matriz de Diseño mínima para las secciones de calibración.

Parámetros	Número Mínimo de las Clases	Descripción de las Clases	Notas
Clima	2	El clima debe ser clasificado de acuerdo a las lluvias. Es necesario un clima similar dentro de una red sin distinción.	Para una categoría solamente puede existir un clima. Este Parámetro se convierte en absoluto.
Resistencia del Pavimento	2	Bajo y Alto (Un SNP=3 es un punto medio práctico)	Este parámetro sólo es aplicable a las autoridades que tienen una importante gama de pavimentos como un ligero Chip Seal para espesores de pavimentos de asfalto. En el caso de pavimentos de concreto hidráulico esto es más difícil de cuantificar.
Niveles de Tráfico	3	Bajo, Moderado y Alto (Rangos pueden variar de acuerdo al tráfico en la red. Un rango muy pequeño de 1000 veh/día no marcará una diferencia significativa)	Las clases de tráfico se determinarán tomando el rango de tráfico en una red y dividiéndolo en tres grupos. La división debe hacerse de acuerdo con una ponderación del kilometraje del vehículo.
Estado del Agrietamiento	2	Agrietado y No Agrietado	Preferentemente, las secciones agrietadas deben contener diversos grados de agrietamiento. Aplicable a ambos tipos de pavimentos incluidos en esta investigación.
Estado de las Ahuellamientos	2	Ahuellamientos > 6 mm y < 6 mm	Tenga en cuenta que para las secciones con ahuellamientos la profundidad del sello debe ser inferior a 50 mm (no aplicable a las secciones de asfalto)
Total del numero de Secciones	24 (hasta 48 según criterio)	Tanto el clima y la resistencia del pavimento no será utilizada por la algunas expertos.	

6.5 CONFORMACION DE LA BASE DE DATOS PARA EL ESTUDIO

6.5.1 MEDICIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE DETERIORO

Considerando que dentro del estudio serían utilizados además de los datos auscultados, datos medidos en proyectos anteriores, los cuales deberían de ser obtenidos y aprobados mediante la aplicación de rigurosos procedimientos estadísticos que garanticen la confiabilidad de la información, para que la variabilidad y dispersión de los datos recolectados en los tramos testigos nuevos sea lo menor posible, para garantizar que el nivel de confiabilidad de la información fuera similar a la de proyectos anteriores.

Debido a lo anterior, para recolectar la información de deterioro de los nuevos tramos, es necesario establecer una metodología de medición, que definiera desde la cantidad de muestras que debían ser medidas, hasta la forma como se recogerían en terreno los datos de cada tramo.

El objetivo principal de la metodología de medición es obtener un número de muestras que permita estimar el deterioro promedio con una confiabilidad aceptable y un rendimiento óptimo de medición en terreno.

A manera de ejemplo se muestra una tabla con los datos que inicialmente pueden tomarse como punto de partida en base al inventario vial que se tenga:

Tabla 6.4 Ejemplo de ubicación de rutas de análisis.

RUTA	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TOPONIMIA INICIAL	TOPONIMIA FINAL	PROG INIC (Km)	PROG INIC (Km)

A partir de la tabla 6.4, se configura una nueva tabla ampliada, que contendrá la información incluida en la siguiente tabla

Tabla 6.5 Información a incorporar en la base de datos ampliada.

Información primaria		Información secundaria
Tránsito	TMDA, clasificación vehicular, tasas de crecimiento, factores de equivalencia	Distribuciones por carril, distribuciones de carga por sentidos
Estructura	Espesor, ancho y longitud de losas, presencia de pasadores, módulo de rotura del concreto, tipo de base y tipo de suelo de fundación	Diámetro y protección de pasadores, módulos de elasticidad del concreto y acero, coeficientes térmico y de retracción del concreto, módulo de elasticidad de la base y módulo de reacción de la subrasante
Misceláneos	Drenaje utilizado, edad del pavimento	Tipo de sello en juntas, separadores en armaduras continuas
Climáticos	Temperatura media anual y precipitaciones anuales	Índices de congelamiento y de Thornthwaite, cantidad de días con temperaturas superiores a 32 °C, rango de temperaturas, gradientes térmicos en espesores de losas
Indicadores de Deterioro	Escalonamiento y deterioro de juntas transversales, grietas transversales, fallas en CRCP, e irregularidad longitudinal (IRI)	Fisuras y grietas longitudinales, de esquina, de durabilidad, tipo mapa, etc. Descascaramiento y pérdida de material superficial.

La tabla 6.5 establece una diferencia entre datos primarios y datos secundarios, en el sentido que si bien toda la información es requerida por los modelos de predicción del HDM-4, la determinación precisa de algunos datos es notablemente más importante e incidente sobre los

resultados de la predicción, en relación con otros datos. De allí que se deba establecer un orden de prioridades para la recopilación de información.

6.5.2 METODOLOGÍA ESTADÍSTICA PARA RECOLECTAR DATOS DE DETERIORO

Entre las actividades de especial interés en la metodología a emplear para el muestreo estadístico del deterioro en los pavimentos, se describe brevemente a continuación.

Con el propósito de racionalizar el mecanismo de toma de datos de deterioro en terreno, considerando que la inspección visual del deterioro en pavimentos es una operación lenta y minuciosa, que insume importantes cantidades de tiempo y recursos humanos, se decidió utilizar un procedimiento estadístico para determinar qué cantidad del tramo debía inspeccionarse por kilómetro. Para ello se utilizó como base estudios de países como Chile, que ha realizado campañas de este tipo para fines similares de los que busca esta investigación.

En base a los resultados obtenidos en los estudios mencionados, para el caso específico de pavimentos de concreto hidráulico, se llega a la conclusión que resulta suficiente muestrear un sector de pavimento del orden de 140 m continuos por carril, cualquiera fuese el tipo de pavimento de concreto hidráulico (con juntas, simple o reforzado, o bien continuamente reforzado). De esta manera, se trabaja con un tamaño de muestra correspondiente a un 14% de la superficie total del pavimento, lo cual permite estimar con una confiabilidad del orden del 90% o superior el promedio kilométrico de los distintos tipos de deterioro presentes en la carretera.

Como algunos tramos tienen una longitud bastante importante (hasta 30 km), se recomienda asimismo, establecer rangos para determinar qué cantidad de kilómetros se inspeccionaría en cada caso en función de la longitud total del tramo, de manera de compatibilizar confiabilidad y economía de recursos. En base a estudios similares de calibración de modelos de deterioro HDM-III realizados en Chile, se definió la cantidad de kilómetros a muestrear por tramo de acuerdo al siguiente criterio:

- Si la longitud del tramo es inferior a 2 km se inspecciona todo el tramo
- Si el tramo tiene entre 2 y 10 km de longitud, se inspecciona 1 de cada 2 km (el 50 % del tramo)
- Si el tramo tiene más de 10 km, se inspeccionan 2 km consecutivos cada 5 km (el 40% del tramo)

A partir de la aplicación de este procedimiento, según la experiencia, se cuenta con buena cantidad de información sobre el estado de los pavimentos inspeccionados. El deterioro superficial de los pavimentos (fisuras, saltaduras, peladuras, etc.) ha sido registrado en planillas diseñadas a tal efecto.

Tabla 6.6: Ejemplo Valores promedio de deterioro para subtramos y tramos de rutas nacionales.

CODIGO	DENOMINACION DE LA RUTA	SECTOR INSPECCIONADO	%L GTMA	%L G L/O	N° GT MA	JT DMA	EJT Abs	%L Gmp	%L PRS	%L PAH	IRI (m/km)	
CA08	Tramo Ateos - Armenia	Km 42: Zacacoyo										
		km 44:---										
Promedios de deterioro para la CA08, Tramo Ateos - Armenia												
CA10	Tramo -----	----										

Promedios de deterioro para la CA10, ----												

%L

GTMA porcentaje de losas con grietas transversales, severidad media o alta**%L G L/O** Porcentaje de losas con grietas longitudinales u oblicuas, sev. Media o alta**N° GT****MA** Número promedio de grietas transversales de media o alta severidad por losa**JT DMA** Porcentaje de juntas deterioradas con severidad media o alta**EJT Abs** Promedio de valores absolutos de escalonamiento en juntas transversales**%L Gmp** Porcentaje de losas con agrietamiento tipo mapa**%L PRS** Porcentaje de losas con pérdida de recubrimiento superficial**%L PAH** Porcentaje de losas reparadas con parches asfálticos o de concreto hidráulico**IRI (m/km)** Irregularidad longitudinal IRI (m/km) promedio de los tramos

La tabla 6.5 muestra un ejemplo de valores promedio de deterioro para subtramos y tramos de rutas nacionales ubicadas en la zona de análisis.

Lograr una base de datos definitiva se obtiene solo mediante un largo proceso de clasificación y depuración de la información recolectada. La base de datos definitiva se configura en una planilla Excel, conteniendo toda la información disponible que sea necesaria para correr los modelos del HDM-4, incluyendo datos históricos de tránsito y de estado del pavimento que hayan sido recopilados como información de archivo. A partir de esta base de datos se confeccionan las planillas de ingreso de datos compatibles con el programa HDM-4.

Adicionamos dos ejemplos de tablas para procesamiento de información, la tabla 6.6 corresponde al tránsito acumulado de los tramos seleccionados y la tabla 6.7 a la información de los valores de algunos parámetros climáticos que tienen incidencia sobre los modelos de deterioro del HDM-4, para las principales ciudades cercanas a las rutas inspeccionadas.

Tabla 6.7 Datos de tránsito para las rutas inspeccionadas.

RUTA	DENOMINACION DEL TRAMO	TMDA	%VEH PESADOS	INFORMACION PROVISTA POR:
CA08	Tramo Ateos - Armenia	---	---	---

Tabla 6.8 Parámetros climáticos en ciudades cercanas a las rutas observadas.

CIUDAD	SONSONATE	ARMENIA	LA LIBERTAD
Precipitación anual (mm)	--	--	--
Días con T° > 32 °C	--	--	--

6.5.3 DATOS A RECOLECTAR

Respecto a los datos a recolectar podemos decir:

Importancia: los datos recogidos deben tener una influencia directa en el producto o la salida requerida del sistema;

Conveniencia: a las necesidades y a los recursos de la corriente disponibles. Las compensaciones necesitan ser hechas entre la precisión de los datos que se recogerán y la frecuencia de la colección de datos, considerando cómo rápidamente los datos llegarán a ser anticuados;

Confiabilidad: los niveles de exactitud pueden variar considerablemente entre diversos usos y los modelos usados. Es importante asegurar la consistencia de datos en un cierto plazo y entre las localizaciones; y

Asequibilidad: los datos son costosos recoger y la calidad es a menudo una función del coste pasado en las medidas

6.5.4 EQUIPO

6.5.4.1 Artículos de datos posibles para la calibración

Los artículos de datos que se recogerán también necesitan ser bien definidos. Esta guía proporciona recomendaciones con respecto a los artículos de datos mínimos de recoger para calibrar modelos de HDM. Está para que el usuario decida a qué artículos de datos adicionales a recoger para prever condiciones locales únicas. Los datos necesarios se tomarán mediante

diferentes equipos o maquinaria de apoyo, con el fin de optimizar esta labor. A continuación se muestran algunos de estos equipos:

- ✓ **Video Láser RST** Equipo de medida de las características superficiales. (Figura 6.3)



Figura 6.3 Video Láser RST

- ✓ **Láser Portable**. Equipo de medida de las características superficiales (Figura 6.4)



Figura 6.4 Láser Portable

- ✓ **Grip Tester** Equipo de medida de la fricción (Figura 6.5)



Figura 6.5 Grip Tester

- ✓ **FWD Kuab** Equipo de medida de las características estructurales (Figura 6.6)



Figura 6.6 FWD Kuab

- ✓ **Equipo Scrim** Equipo que registra el Coeficiente de rozamiento transversal (Figura 6.7)



Figura 6.7 Equipo Scrim

Los equipos de auscultación obtienen datos del estado de la carretera. Los datos se estructuran para su análisis en parámetros que son interpretados por los técnicos encargados de la Conservación de las Carreteras. Los parámetros se clasifican en función del tipo de medida realizada y del equipo empleado. Los equipos anteriormente indicados recogen los datos según su capacidad y finalidad.

El equipo multifunción Vídeo Láser RST permite obtener información sobre:

- Regularidad superficial (IRI)
- Perfil transversal (Ahuellamiento)
- Textura

- Fisuras
- Geometría de la carretera
- Inventario (Señalización, kilometración, etc.)

El equipo Láser Portable permite obtener información sobre:

- Regularidad superficial (IRI)

El equipo **Grip Tester** permite obtener información sobre:

- Rozamiento

El equipo FWD **KUAB** permite obtener información sobre:

- Deflexión
- Temperatura del pavimento

El equipo Scrim tiene las siguientes aplicaciones:

- Medida y registro del Coeficiente de Rozamiento Transversal en todo tipo de pavimentos
- Por ser un equipo de alto rendimiento se utiliza para la auscultación sistemática de redes de carreteras.

Los equipos deben obtener información fiable y precisa sobre el estado del pavimento. Para asegurar las medidas de cada característica que varía con la distancia, hay que recoger y tratar los datos recogidos. Para cada característica se usan distintos tipos de datos que se resumen en indicadores que se interpretan de manera diferente.

6.5.4.2 Repetir todas las medidas

Todas las medidas automáticas y manuales se deben repetir por lo menos tres a cuatro veces en la longitud total de la sección de la calibración. Muchos instrumentos tienen una variación significativa y repitiendo las medidas que un medio válido estadístico podría ser establezca. Es también importante repetir estas medidas durante el mismo día. Esto se asegurará de que los factores externos por ejemplo la precipitación/la temperatura, instrumento cambia (cambios) y la inconsistencia del operador no influencia las medidas

6.6 METODOLOGIA ESTADISTICA DE LOS FACTORES DE CALIBRACION Ki.

El procedimiento propuesto para la calibración estadística de los modelos de comportamiento de pavimentos en el presente trabajo se basa principalmente en la determinación de factores que permitan lograr un mejor ajuste de las curvas de deterioro simulado a los datos de comportamiento real. Para ello, se siguieron dos procedimientos distintos, dependiendo si el factor a determinar correspondía a la fase de inicio o de progresión del deterioro.

El procedimiento propuesto para la calibración de los factores de inicio de deterioros superficiales, se basó en la obtención del cociente entre el año observado de aparición del deterioro y el año de aparición predicho por el modelo sin calibrar. Para el caso de los factores de progresión, la calibración se realizó mediante la minimización de los cuadrados de las diferencias de los datos estimados y los observados (SSD, Sum of Squared Differences). En la Figura 6.8 [Videla et al 1992] se observa una curva típica de comportamiento de un modelo de deterioro y sobre ella se encuentran localizados los datos observados y la curva obtenida a partir de las predicciones del modelo.

El mejor ajuste consiste en minimizar las diferencias de modo que se logre la representación más fiel y real del comportamiento en el tiempo. El minimizar el valor de SSD conlleva una reducción del error medio de estimación que permite encontrar el factor de calibración que asegura el mejor ajuste de la curva de deterioro y por ende la calibración del modelo de comportamiento analizado [Kannemeyer y Visser 1996].

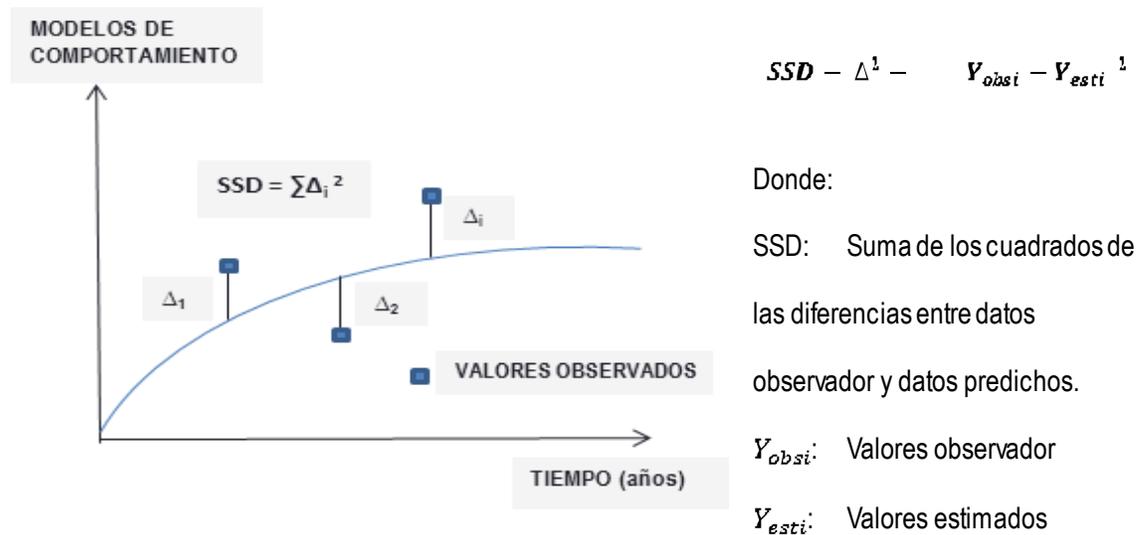


Figura 6.8: Minimización de cuadrados de las diferencias entre valores estimados y medidos.

A fin de obtener las curvas de evolución de los distintos tipos de deterioro que más se adaptan a los valores observados a partir de las ecuaciones de HDM-4, mediante la calibración de los factores K_i en cada categoría, se sugiere el procesamiento estadístico esquematizado en la figura 6.8.

1. Definición de las características representativas de la categoría.

Para calibrar una categoría debemos tener en cuenta un tránsito y una capacidad estructural representativos de la categoría. Siguiendo el criterio utilizado para la selección de tramos testigos, el valor representativo correspondería a la media ponderada por la longitud de cada tramo. Así mismo, deben definirse las restantes características requeridas para el camino "tipo" representativo de cada categoría.

2. Verificación de la homogeneidad del deterioro en el tramo.

Una hipótesis importante asumida es suponer que estamos trabajando con tramos homogéneos, que presentan un grado de deterioro uniforme en toda su extensión. A fin de validar lo mas posible dicha hipótesis, en cada tramo se debe calcular el coeficiente de variación del deterioro CVar, igual a la desviación estándar del deterioro en el tramos dividida en su deterioro promedio ($CVar = s/Xmed$). Si CVar supera un cierto límite (aproximadamente un 25%), debería subdividirse al tramo en subtramos hasta que CVar sea menor que este límite, a fin de asegurar una mínima uniformidad. En tramos con menos de 2 km de longitud no es factible hacer esta subdivisión, ya que la longitud mínima de análisis para HDM-EQ es 1 km (Watanatada et al. 1987). Eventualmente, el CVar podría indicar, si es muy elevado, la conveniencia de desechar el dato.

3. Descarte inicial de datos anómalos.

Cuando se presentan datos que de acuerdo a la experiencia previa aparezcan claramente desviados respecto al deterioro que se espera para una cierta edad, puede convenir descartarlos a priori. Dichos datos podrían indicar diferencias de calidad en la construcción de los pavimentos dentro de una misma categoría, o errores de los equipos de medición (descalibración). Si estos datos se ingresan al análisis, tendría una gran influencia en la determinación de los Ki calibrados, sesgando los resultados finales. Se sugiere descartar en un primer intento aquellos datos que visualmente resulten anómalos en las graficas de deterioro vs. Tiempo, lo cual se valida o corrige posteriormente en base a test estadísticos (Student).

4. Ponderación de los datos de deterioro.

Si se trabaja un una herramienta o software que permita solo un valor de deterioro observado por año, se debe calcular un deterioro medio ponderado por la longitud de cada tramo, solamente utilizando datos no descartados. La ponderación da igual peso a cada edad en relación a la calibración, ya que ningún año tiene más de un dato.

5. Estimación de valores iniciales de deterioro.

Si cuando se realice el proceso de análisis se necesita un valor inicial de IRI para efectos de la calibración; a tal efecto puede emplearse un criterio estadístico que permita obtener un IRI0 ajustado en función de los datos. Para ello se busca, por tanteos, aquel IRI0 que minimice la suma de los cuadrados de las diferencias entre datos predichos y observados. Otros valores tales como los tiempos de inicio de grietas y pérdida de áridos pueden estimarse análogamente. Un método alternativo para evaluar el IRI0 consiste en medir este valor en los caminos de reciente construcción o rehabilitación.

6. Verificación de la preselección de datos utilizados.

Finalmente, se procede a calibrar los distintos modelos, obteniendo factores K_i preliminares de calibración. Entonces se aplica para todos los datos, descartados y no descartados un test de Student de residuos estandarizados (calculados a partir de la diferencia entre los valores observados y predichos). Se verifica así que el descarte o no aceptación inicial de datos haya sido estadísticamente correcto. Si los test determinan que no correspondía descartar algunos

datos, o que hará falta descartar otros, o ambas cosas, debe redefinirse el conjunto de datos aceptados y volver al numeral 4, repitiendo el proceso hasta lograr un resultado satisfactorio.

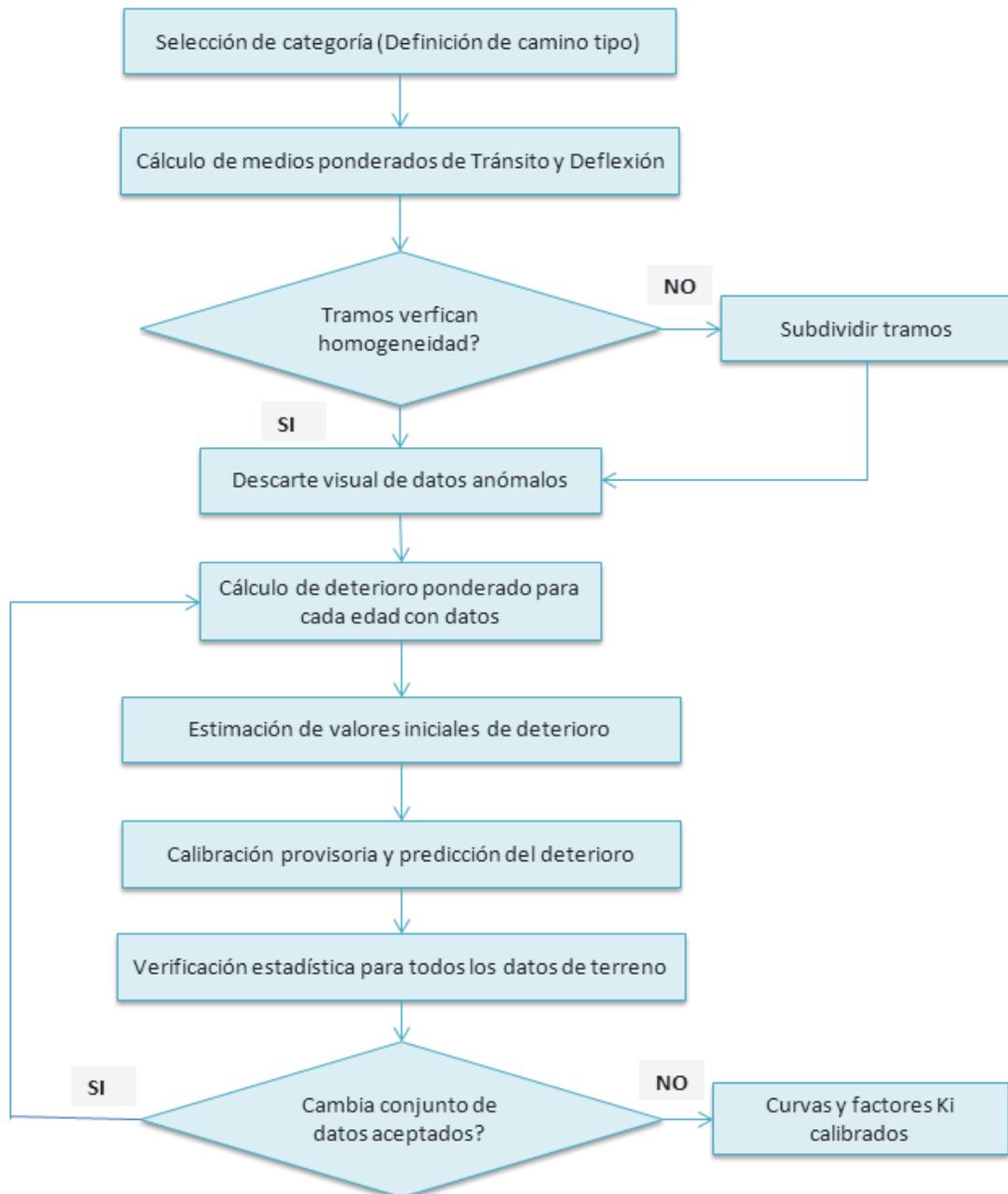


Figura 6.9: Diagrama conceptual de la metodología de calibración.

6.7 METODOLOGIA DE CALIBRACION PARA LOS MODELOS DE PAVIMENTOS DE CONCRETO ASFALTICO.

6.7.1 INICIO DE AGRIETAMIENTO

Para la mayoría de los casos, el inicio de agrietamiento se considera más importante que la progresión de los modelos de agrietamiento. Esto podría ser debido a que el inicio del agrietamiento es siempre una indicación para los ingenieros de que el pavimento o en la superficie de deterioro comienzan a manifestarse grietas.

Más importante, sin embargo, es el hecho de tener la superficie agrietada ya que permitirá el ingreso de agua rápidamente y esto da lugar a resultados secundarios en el deterioro del pavimento tales como baches, ahuellamientos, desplazamiento o una combinación de defectos. Por esta razón, es práctica habitual sellar las grietas antes de que la progresión se pueda desarrollar mucho más.

Un aspecto importante de la nota durante la calibración del inicio del agrietamiento, es incluir secciones no agrietadas en el análisis. Si sólo se consideran las secciones agrietadas podría causar sesgo a las secciones que se agrietan antes de lo previsto. Como por ejemplo, las secciones que se agrietan mas tarde de lo previsto tienen una influencia significativa sobre el factor de calibración.

6.7.1.1 Formula del Modelo

EL Modelo de Inicio de Agrietamiento de HDM-III define por separado este modelo para bases granulares y para bases cementadas, como se muestra a continuación:

✓ Bases Granulares y Bituminosas:

TYCRA

$$= K_{ci} F_{cmax} a1 \exp \left(a2SNC + a3 \frac{YE4}{SNC^2} \right) \max \left(1 - \frac{PCRW}{a4}, 0 \right), a5 + a6HSNEW + CRT$$

✓ Bases Cementadas:

$$TYCRA = K_{ci} F_c \left(a1KA + a2KW \right) \left(1 + a3HSE + 1 - KA \right) \left(1 - KW \right) \left(a4 \exp(a5HSE) + a6 \ln CMOD - a7 \ln DEF - a8YE4DEF \right) + CRT$$

$$TYCRA = K_{cimax} (a1 + a2 TYCRA, a3 TYCRA)$$

Donde:

TYCRA	Tiempo en años para inicio de agrietamiento
TYCRW	Tiempo en años para inicio de agrietamiento ancho
K _{ci}	Deterioro específico del Usuario para inicio de agrietamiento
F _c	Factor de distribución para la sub sección
SNC	Número estructural modificado
YE4	carga anual por eje en millones por carril
CQ	indicador de defecto por construcción para tratamientos superficiales
PCRW	1 si existe error, 0 de otra manera
PCRA	Área de agrietamiento ancho después de repavimentar
HSNEW	Espesor de la nueva superficie en mm
CRT	Tiempo de retardación de agrietamiento si hubo tratamiento preventivo.

HSE Espesor efectivo de las capas de superficie definido como:

$$\min 100, HS_{NEW} + 1 - KW HS_{OLD}$$

KW Variable que indica la presencia de agrietamiento ancho en las capas de superficie antigua, definida como:

$$\min 0.05 \max PCRW - 10, 0, 1$$

KA Variable que indica la presencia de todos los agrietamientos en las capas de superficie antigua, definida como:

$$\min 0.05 \max PCRA - 10, 0, 1$$

CMOD Modulo de Resiliencia de la base cementada en GPa

DEF Deformación bajo una carga de llanta de 40 kN

6.7.1.2 Enfoque HDM para Calibrar el Inicio de Agrietamiento

Para cada sección de pavimento con una base de datos, todas las predicciones de la edad de inicio de agrietamiento debe ser calculado por la relación establecida en el modelo en una hoja de cálculo o las herramientas del software HDM. Los factores de ajuste de calibración y predicción de errores deben determinarse por separado para cada grupo de la superficie y el clima a partir de la media prevista (media PTCl) y observación de las edades de iniciación (media OTCl) de la siguiente manera:

$$K_{ci} = \frac{\text{Media OTCl}}{\text{Media PTCl}}$$

Donde el $RMSE = \sqrt{\text{media } (OCTI_j - PTCl_j)^2}_{j=1,n}$

RMSE Función de error para minimizarlo

La desventaja del enfoque HDM es que siempre dan un sesgo a un valor inferior de K_{ci} , ya que no considera secciones no agrietadas.

Tabla 6.9 Valores por defecto para el modelo de inicio de agrietamiento

BASE	SUPERFICIE	TODOS LOS AGRIETAMIENTOS								AGRIETAMIENTO ANCHO		
		a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a1	a2	a3
Granular	ST	13.2	0	-20.7	100	0	0			2.66	0.88	1.16
	AC	4.21	0.14	-17.1	100	0	0			2.46	0.93	0
	SSST	13.2	0	-20.7	20 (1)	1.4	0			0.70	1.65	0
	RSST	13.2	0	-20.7	20	0	0.22			1.85	1.00	0
	RSAC	4.21	0.14	-17.1	20	0	0.12			1.85	1.00	0
	OCMS	13.2	0	-20.7	20 (1)	1.4	0			0.70	1.65	0
	OVSA	4.21	0.14	-17.1	30	0	0.025			2.04	0.98	0
Cementada	ST	0.8	0.2	0.1	1.12	0.035	0.371	0.418	2.87	1.46	0.98	0
	AC	0.8	0.2	0.1	1.12	0.035	0.371	0.418	2.87	1.46	0.98	0
	SSST	0.8	0.2	0.1	1.12	0.035	0.371	0.418	2.87	0	1.78	0
	RSST	0.8	0.2	0.1	1.12	0.035	0.371	0.418	2.87	0	1.78	0
	RSAC	0.8	0.2	0.1	1.12	0.035	0.371	0.418	2.87	0	1.78	0
	OCMS	0.8	0.2	0.1	1.12	0.035	0.371	0.418	2.87	0	1.78	0
	OVSA	0.8	0.2	0.1	1.12	0.035	0.371	0.418	2.87	0	1.78	0
Bituminosos	ST	13.2	0	-20.7	100	0	0			2.66	0.88	1.16
	AC	4.21	0.14	-17.1	100	0	0			2.46	0.93	0
	SSST	4.21	0.14	-17.1	30	0	0.025			2.04	0.98	0
	RSST	4.21	0.14	-17.1	20	0	0.12			1.85	1.00	0
	RSAC	4.21	0.14	-17.1	20	0	0.12			1.85	1.00	0
	OCMS	4.21	0.14	-17.1	30	0	0.025			2.04	0.98	0
	OVSA	4.21	0.14	-17.1	30	0	0.025			2.04	0.98	0

(1) Coeficiente aplicado para PCRA, no para PCRW

Fuente: HDMIII Código Fuente

6.7.1.3 Requisitos de Calibración

La calibración del inicio de agrietamiento también puede alcanzarse con la minimización de la función de error siguiente (sobre la base de Rohde et al (1998)):

$$Err = w_i(TYCR - SAGE_2)^2$$

Donde:

Err	Función de Error para reducir al mínimo el número de secciones								
SAGE ₂	Edad del sello en el momento en que tuvo lugar el inicio de agrietamiento (primera observación de grietas), o la edad actual cuando la sección está todavía sin grietas.								
W _i	Factores de ponderación: <table style="margin-left: 40px;"> <tr> <td>0.0</td> <td>si TYCR > SAGE₂ y el pavimento sin grietas</td> </tr> <tr> <td>1.0</td> <td>si TYCR < SAGE₂ y el pavimento sin grietas</td> </tr> <tr> <td>1.5</td> <td>si TYCR < SAGE₂ y el pavimento agrietado</td> </tr> <tr> <td>1.0</td> <td>si TYCR > SAGE₂ y el pavimento agrietado</td> </tr> </table>	0.0	si TYCR > SAGE ₂ y el pavimento sin grietas	1.0	si TYCR < SAGE ₂ y el pavimento sin grietas	1.5	si TYCR < SAGE ₂ y el pavimento agrietado	1.0	si TYCR > SAGE ₂ y el pavimento agrietado
0.0	si TYCR > SAGE ₂ y el pavimento sin grietas								
1.0	si TYCR < SAGE ₂ y el pavimento sin grietas								
1.5	si TYCR < SAGE ₂ y el pavimento agrietado								
1.0	si TYCR > SAGE ₂ y el pavimento agrietado								

Henning et al (1999) utiliza este método para calibrar el inicio del agrietamiento para secciones repavimentadas.

6.7.1.4 Ajuste de los Coeficientes del Modelo

En esta sección se explica la metodología.

➤ PASO 1

Compilar una hoja de cálculo con todos los tramos de carretera, y los parámetros necesarios para la predicción del inicio del agrietamiento. Es decir, la hoja de cálculo llamada "PREDICCIÓN".

➤ **PASO 2**

Introduzca el Modelo de inicio de agrietamiento basado en el parámetro de entrada de datos. El coeficiente de calibración (K_{ci}) debe mantenerse en un campo y se establece un valor predeterminado de 1.

➤ **PASO 3**

Hacer una nueva hoja de cálculo llamada "ACTUAL" que contiene todas las secciones utilizados para la calibración. Los campos en esta hoja de cálculo deben ser los siguientes:

- ✓ Sección de nombres o números, lo que podría estar vinculado con la hoja de cálculo "PREDICCIÓN";
- ✓ Edad actual de la superficie (AGE 2);
- ✓ Situación histórica de agrietamiento para cada año (para secciones sin agrietamiento estos campos tendrán cero los valores de la vida total de la superficie);
- ✓ Incluir dos nuevos campos de SAGE2_cracked y SAGE2_uncracked. El SAGE2_cracked contiene el tiempo necesario para la iniciación del agrietamiento, SAGE2_uncracked es la edad actual de la superficie si es sin agrietamiento.

➤ **PASO 4**

Copie el SAGE2_cracked y SAGE2_uncracked a la hoja de cálculo "PREDICCIÓN". Este paso debe hacerse con cuidado para asegurarse de que los campos son equivalentes a los nombres o los números de sección de hoja de cálculo utilizado en "ACTUAL".

➤ **PASO 5**

Introducir estos nuevos campos en la hoja de calculo "PREDICCIÓN", para comparar el estado del agrietamiento previsto con la predicción del inicio del agrietamiento. Estos campos son:

- ✓ Agrietamiento, Agrietamiento Previsto;
- ✓ Agrietamiento, Sin Agrietamiento Previsto;
- ✓ Sin Agrietamiento, Sin Agrietamiento Previsto;
- ✓ Sin Agrietamiento, Agrietamiento Previsto.

Los valores de estos campos debe actualizarse usando "if" que velará por que se actualiza cuando el inicio previsto de agrietamiento cambie.

➤ **PASO 6**

Calcular el error de acuerdo con la función de error utilizando los factores de ponderación correspondientes a cada estado de ocurrencia del agrietamiento.

➤ **PASO 7**

Minimizar la suma del error para cada sección modificando el coeficiente de iniciación de agrietamiento.

Una variante de este método podría producir resultados aceptables. Se supone que el tiempo para observar grietas normalmente se distribuye sobre el tiempo previsto. Cuando K_{ci} es correcta, el 50% de los pavimentos de AGE2 = TYCR se agrieta y el 50% no se agrieta. Un simple proceso iterativo se utiliza para establecer el valor de K_{ci} , lo que permite cierta tolerancia en la norma del 50% (un rango de 40% - 60% puede ser aceptable).

6.7.2 PROGRESIÓN DEL AGRIETAMIENTO

6.7.2.1 *Formula del Modelo*

EL modelo de progresión del Agrietamiento es incremental en forma y utiliza tres expresiones, que dan una curva simétrica. La investigación de Brasil, que se describe en Paterson (1987) dio modelos basados en el tiempo y el tráfico. Los modelos basados en el tiempo se seleccionaron para su uso en HDM-III y tienen la forma:

Si $ACR < 50\%$ and $ACR + \Delta ACR < 50\%$

$$\Delta ACR = K_{cp} CRP (ab\Delta T + ACR^b)^{1/b} - ACR$$

Si $ACR > 50\%$

$$\Delta ACR = K_{cp} CRP (100 - ACR - \max(-ab\Delta T + 100 - ACR^b, 0))^{1/b}$$

Si $ACR < 50\%$ and $ACR + \Delta ACR > 50\%$

$$\Delta ACR = K_{cp} CRP (100 - (250^b - ACR^b - ab\Delta T))^{1/b} - ACR$$

Donde:

ACR Área de agrietamiento al inicio del año

Δ ACRA Incremento del agrietamiento durante el tiempo ΔT

K_{cp} Coeficiente definido por el Usuario

CRP Retraso debido a un tratamiento preventivo, dado por:

$$CRP = 1 - 0.12 CRT$$

Tabla 6.10 Coeficientes del Modelo de Progresión de Agrietamiento

Base	Superficie	Todos los Agrietamientos		Agiertamiento Ancho	
		a	b	a	B
Granular	ST	1.76	0.32	2.50	0.25
	AC	1.84	0.45	2.94	0.56
	OVSA	1.07	0.28	2.58	0.45
	Otros	2.41	0.34	3.40	0.35
Cementada	Todos	2.13	0.35	3.67	0.38
	ST	1.76	0.32	2.50	0.25
	AC	1.84	0.45	2.94	0.56
Bituminosa	SSST	1.07	0.28	2.58	0.45
	RSST/RSAC	2.41	0.34	3.40	0.35
	OCMS/OVSA	1.07	0.28	2.58	0.45

Fuente: Código de Fuente HDMIII

6.7.2.2 Enfoque HDM para Calibrar la Progresión de Agrietamiento

Se predice la progresión de agrietamiento en función de la superficie agrietada y el tipo de pavimento por medio de una función sigmoïdal. La diferencia de los datos de progresión de agrietamiento suele ser muy alta por lo que el tamaño de la muestra requerida es similar a la iniciación de grietas, aunque la sensibilidad es menor.

En general, un derivado de la calibración del factor de ajuste inicial (similar al Nivel 1) se considera adecuado, sin más sobre el campo de recopilación de datos, es decir:

$$K_{cp} = \frac{1}{K_{ci}}$$

Por otra parte, si se dispone de datos suficientes el planteamiento que se explica en la siguiente sección se podrían adoptar.

6.7.2.3 Ajuste de los Coeficientes del Modelo

Para cada sección de pavimentos con datos registrados, determine:

➤ PASO 1

Las predicciones de la edad del inicio de grieta, calculada por el modelo de relación utilizando una hoja de cálculo o las herramientas del software HDM y ajustados por factores de ajuste de calibración.

➤ PASO 2

La edad estimada desde la iniciación de grietas, calculada restando la edad del inicio previsto del agrietamiento de la edad de la superficie observada.

➤ PASO 3

Ajustar una curva sigmoïdal al área de agrietamiento observado frente a la edad estimada desde los datos de inicio, y determinar la edad estimada en 30 por ciento del área de agrietamiento (ET30) por interpolación o extrapolación.

➤ **PASO 4**

Calcular la edad prevista en el 30 por ciento del área de agrietamiento (PT30), utilizando la ecuación del HDM-4 con coeficientes adecuados para el pavimento y tipo de superficie.

➤ **PASO 5**

Calcular el factor de ajuste de los valores medios de ET30 y PT30 a través de todas las secciones de calibración por separado para cada tipo de superficie.

$$K_{cp} = \frac{\text{Media PT30}}{\text{Media ET30}}$$

6.7.3 PROGRESIÓN DE AHUELLAMIENTO

6.7.3.1 *Formula del Modelo*

La media de ahuellamiento en el primer año después de la construcción de un pavimento está dado por:

$$RDM = K_{rp} \frac{39800(YE410^6)^{ERM}}{SNC^{0.502} COMP^{2.30}}$$

El incremento en el promedio de ahuellamiento en el segundo y los años posteriores está dada por:

$$\Delta RMD = K_{rp} RDM \frac{0.166 + ERM}{AGE\#} + 0.0219 MMP \Delta ACRX \ln \max 1, AGE3YE4$$

$$ERM = 0.09 - 0.0009 RH + 0.0384 DEF + 0.00158 MMP CRX$$

Donde:

RDM	Media de Ahuellamiento
Δ RDM	Incremento anual en la Media de Ahuellamiento
AGE3	Tiempo transcurrido desde la construcción en años
CRX	Área de índice de agrietamiento en porcentaje dado por: $ACRA + 0.39 ACRW$
Δ CRX	Incremento anual en el índice de agrietamiento
RH	Indicador de rehabilitación (1 si es superposición, 0 en caso contrario)

6.7.3.2 Enfoque HDM para Calibrar la Progresión de Ahuellamiento

Para cada sección de calibración, se calcula la media prevista de ahuellamiento (PRDM_j), y se calcula el factor de ajuste para la progresión de ahuellamiento, por la media geométrica o desde la suma de logaritmos de valores (LORDM_j y LPRDM_j), como sigue:

$$K_{rp} = \frac{\text{Media Geométrica } ORD M_j}{\text{Media Geométrica } PRDM_j}$$

$$K_{rp} = \frac{\text{Suma } \log ORD M_j}{\text{Suma } \log PRDM_j}$$

Alternativamente, se determina K_{rp} y el error de predicción por regresión lineal de LORDM_j contra LPRDM_j.

6.7.3.3 Ajuste de los coeficientes del Modelo

La desventaja de usar modelos incrementales es que se tardan más para calibrarse que los modelos normales. Esto también es aplicable para la progresión de ahuellamiento que esta significativamente influenciado por el clima extremo y el tráfico de carga para un determinado

año. Además, tenga en cuenta que algunos métodos de recopilación de datos proporcionan la exactitud de las mediciones fuera de los cambios incrementales en ahuellamientos de un año determinado. (Por ejemplo, el promedio de un cambio incremental en ahuellamiento se podría decir de 1 mm, mientras que la precisión garantizada por los instrumentos pueden ser más o menos 1,5 mm).

Esto subraya la importancia de la recopilación de datos precisos, pero también resalta la posibilidad de alta variabilidad debido a:

- ✓ Cambios de Clima significativos o cambios de tráfico de carga durante la calibración de estudio;
- ✓ Las condiciones externas que afectan el comportamiento del pavimento (por ejemplo, el drenaje y el mantenimiento del hombro), y,
- ✓ Material y condición de subrasante.

6.7.4 DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE AHUELLAMIENTO

6.7.4.1 *Formula del Modelo*

La desviación típica de ahuellamiento después de la construcción del pavimento está dado por:

$$RDS = K_{rp} \frac{4390 \Delta RDM^{0.532} (YE410^6)^{ERS}}{SNC^{0.422} COMP^{1.66}}$$

El incremento en la Desviación Estándar de ahuellamiento en los años posteriores está dada por:

$$\Delta RDS = K_{rp} RDS \frac{0.532 \Delta RDM}{RDM} + \frac{ERS}{AGE3} + 0.0519 MMP \Delta CRX \ln \text{MAX } 1, AGE3YE4$$

$$ERS = -0.0086 RH + 0.00115 MMP CRX$$

6.7.4.2 Enfoque HDM para Calibrar la desviación estándar de ahuellamiento

Para cada sección de calibración, se calcula la desviación estándar prevista de ahuellamiento (PRDSj), y se calcula el factor de ajuste para la desviación estándar de progresión de ahuellamiento, por la media geométrica o desde la suma de logaritmos de valores (LORDSj y LPRDSMj), como sigue:

$$K_{rp} = \frac{\text{Media Geometrica } ORDSj}{\text{Media Geometrica } PRDSj}$$

$$K_{rp} = \frac{\text{Suma } \log ORDSj}{\text{Suma } \log PRDSj}$$

Donde:

ORDS Desviación Estándar Observada de Ahuellamiento

PRDS Desviación Estándar Prevista de Ahuellamiento

Alternativamente, se determina K_{rp} y el error de predicción por regresión lineal de LORDSj contra LPRDSj.

Se encuentra a menudo que hay un cierto grado de sesgo cuando la calibración de ahuellamiento se desarrolla. El comportamiento del pavimento podría explicar este fenómeno y puede incluir:

- ✓ La densificación temprana de las capas del pavimento después de la construcción que podría ser más lento o más rápido que el previsto;

- ✓ Existencia de múltiples capas superficiales, y
- ✓ La influencia de la capa subrasante.

6.7.4.3 Ajuste de los coeficientes del Modelo

Tenga en cuenta que existe un coeficiente de calibración para la desviación estándar del ahuellamiento. Por lo tanto, uno de los dos modelos podría ser utilizado para la calibración. No obstante, se recomienda que ambos se utilicen para la calibración y, posteriormente, es necesario comparar los dos resultados. El proceso de calibración es similar al proceso seguido para la media de ahuellamiento.

6.7.5 PROGRESIÓN DE RUGOSIDAD

Todos los modelos HDM presentan la Rugosidad en términos del Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

6.7.5.1 Formula del Modelo

El HDM-III utiliza los modelos con "componentes incrementales" dado por Paterson (1987):

$$\Delta IRI = \frac{134 \exp m AGE3 YE4}{(1 + SNK)^5} + 0.114 \Delta RDS + 0.0066 \Delta ACRX + 0.42 \Delta APOT + m IRI_a$$

Donde:

ΔIRI : Cambio incremental en rugosidad durante el año en m / km.

m: Coeficiente de Medio Ambiente, por defecto = 0.023.

AGE3: Años desde la construcción o rehabilitación.

- YE4: tráfico anual de carga en MESAL / carril.
- SNK: Número estructural modificado ajustado por los efectos de las grietas.
- Δ RDS: Cambio incremental en patrón de ahuellamiento en mm.
- Δ ACRX: Cambio incremental en el área del índice de grietas en porcentaje.
- Δ APOT: Cambio incremental en el área de baches en porcentaje.

Si el ahuellamiento se define como la medida de huella bajo 2.0 m de un borde recto, el coeficiente de la componente RDS debe cambiarse a 0.088³.

Tabla 6.11 Coeficiente de rugosidad del medio ambiente “m” por las zonas climáticas

CLASIFICACION DE LA HUMEDAD	CLASIFICACION DE LA TEMPERATURA				
	Tropical	Sub-Tropical Caliente	Sub-Tropical Templado	Temperatura Templado	Temperatura Congelación
Arido	0.005	0.010	0.015	0.025	0.040
Semi-Arido	0.010	0.015	0.025	0.035	0.060
Sub-Húmedo	0.020	0.025	0.040	0.060	0.100
Húmedo	0.025	0.030	0.060	0.100	0.200
Per-Húmedo	0.030	0.040	0.070		

Tabla 6.12 Clasificación de la Humedad

CLASIFICACION DE LA HUMEDAD	DESCRIPCIÓN	ÍNDICE DE HUMEDAD THORNTHWAITE	PRECIPITACIÓN ANUAL (mm)
Arido	Muy baja precipitación, alta evaporación	-100 a -61	< 300
Semi-Arido	Bajo precipitación	-60 a -21	300 a 800
Sub-Húmedo	Moderada precipitación, o Estación lluviosa fuerte.	-20 a +19	800 a 1600
Húmedo	Moderado cálido, lluvias estacionales	+20 a +100	1500 a 3000
Per-Húmedo	Alta precipitación, o muy húmeda la superficie durante muchos días	>100	>2400

³ la investigación original mide la profundidad del ahuellamiento bajo 1.2 m de un borde recto.

Tabla 6.13 Clasificación de la Temperatura

CLASIFICACIÓN DE TEMPERATURA	DESCRIPCIÓN	RANGO DE TEMPERATURA (°C)
Tropical	Temperaturas cálidas en rangos pequeños	20 a 35
Sub-Tropical Caliente	Días de alta temperatura fresca noche, caliente-frío temporadas	-5 a 45
Sub-Tropical Templado	Moderado día temperaturas, inviernos fríos	-10 a 30
Temperatura Templado	Verano Cálido, invierno congelación superficial	-20 a 25
Temperatura Congelación	Fresco de verano, de invierno de congelación profunda	-40 a 20

Paterson y Attoh-Okine (1992) propuso dos modelos que dan el valor absoluto de rugosidad derivado de la regresión de la predicción del HDM-III:

$$RI_t = 0.98 \exp(m AGE3) RI_0 + \frac{135NE4_t}{(1 + SNK)^5} + 0.143 RDS_t + 0.0068ACRX_t + 0.056APAT_t$$

$$RI_t = 1.04 \exp(m AGE3) RI_0 + \frac{263NE4_t}{(1 + SNK)^5}$$

Donde:

RIT: Rugosidad en AGE3 años después de la construcción

RI0: Rugosidad cuando es nuevo

NE4t: Eje de carga acumulada desde la construcción

RDS_t: Desviación Estándar del Ahuellamiento para AGE3

ACRX_t: Área de Índice de grietas para AGE3

APAT_t: área de parches para AGE3

En cuanto a la componente incremental del modelo, el coeficiente para el término RDS debe ser ajustado por un factor de 0,8 si se mide 2,0 m en virtud de un borde recto.

6.7.5.2 Requisitos de calibración

En HDM-III y HDM-4 dos factores de calibración están disponibles en el modelo de componente incremental - un coeficiente para el medio ambiente (Kge / Kgm) y uno que modifica todos los términos en la expresión, salvo la última, el factor medioambiental (Kgp). No hay instalación en cualquiera de las versiones del software para ajustar los distintos coeficientes que se aplican a la estructura, ahuellamiento, grietas o baches.

En dTIMS todos los coeficientes del modelo son, por supuesto, accesibles para el usuario y si hay pruebas de que necesite ajustarse se puede hacer.

Normalmente se recomienda que la calibración se realice en primer lugar para el coeficiente del medio ambiente y, a continuación, para el factor general. Bennett y Paterson (2000) afirma que "es inusual para este factor general (Kgp) la necesidad de ajustarse y es más probable que uno de los factores internos necesiten corrección".

6.7.5.3 Ajuste del Coeficiente de Medio Ambiente

Bennett y Paterson (2000) recomiendan un análisis de rebanada-en-tiempo para el ajuste del coeficiente medio ambiente, invirtiendo el modelo absoluto de Paterson y Attoh-Okine (1992)⁴

$$m = \frac{\ln 1.02RI_t - 0.143RDS_t - 0.0068ACRX_t - 0.056APAT_t - \ln RI_0 + \frac{135.NE4_t}{1 + SNP}^5}{AGE3}$$

$$m = \frac{\ln RI_t - \ln RI_0 + \frac{263.NE4_t}{(1 + SNP)^5}}{AGE3}$$

⁴ Tenga en cuenta que en Bennett y Paterson Eq. 7,7 el coeficiente para el término es estructural es dado erróneamente como 263.

Donde los términos son los definidos previamente.

La debilidad de este método es que requiere una estimación de la rugosidad del pavimento nuevo (Rl_0). Si se aplica a buena calidad, con un pavimento con buen mantenimiento es probable que la variación de la Rl_0 será más que el cambio en la rugosidad en el tiempo y que dará lugar a una gran dispersión de valores de m . Si un solo conjunto de datos está disponible, tal vez sea mejor simplemente obtener m de los cuadros superiores y un nivel 2 de calibración no se debería intentar. Si una serie de tiempos históricos de datos está disponible entonces el valor de m puede obtenerse, junto con otros coeficientes del modelo que se describen a continuación.

6.7.5.4 Modelo de Adaptación de todos los coeficientes

El método de calibración que se describe aquí utiliza un enfoque gradual y se supone que una serie de tiempo de datos disponibles que abarquen al menos 4 años consecutivos. Los datos deben ser de tramos de carretera que no han recibido grandes obras (sellado o rehabilitación) durante el período para el cual los datos aplican. La muestra también debe ser controlada por anomalías como puentes, cruces ferroviarios y zonas urbanas con los recortes de servicios públicos.

Los siguientes pasos deben realizarse en una hoja de cálculo.

➤ PASO 1

Obtener la mejor estimación de la variable ambiental (m) de los cuadros anteriores.

➤ **PASO 2**

Calcular la media de incremento de los valores del IRI y RDS. En Excel la función SLOPE () es útil para este propósito.

➤ **PASO 3**

Calcular la media de valores absolutos del IRI

➤ **PASO 4**

Calcular las predicciones de los valores estructurales utilizando SNC, eje de carga, la edad de construcción y la estimación inicial de m del PASO 1:

$$\frac{\exp m AGE3 YE4}{(1 + SNC)^5}$$

➤ **PASO 5**

Hacer una regresión lineal múltiple de la media incremental observada IRI a los siguientes términos:

- ✓ componente estructural prevista de la rugosidad incremental del PASO 4
- ✓ Media incremental observada de RDS del PASO 2
- ✓ Media absoluta observada de IRI del PASO 3.

La interceptación debe establecerse en cero en el ejercicio de la regresión.

Los coeficientes de regresión pueden dar una versión modificada del modelo de componente incremental:

$$IRI = a_1 \frac{\exp m AGE^3 YE^4}{(1 + SNC)^5} + a_2 RDS + a_3 IRI_a$$

Si el valor calculado de m (coeficiente de regresión a3) difiere significativamente del valor obtenido en el paso 1, repita los pasos 4 y 5 usando el valor a3. Repita el proceso hasta obtener un valor estable de m.

Se cree que el método anterior será conveniente para los caminos rurales, donde una serie de tiempos de datos de alta velocidad está disponible. Sin embargo, muchos RCAs pueden tener una serie de tiempos de datos de rugosidad, pero faltan datos de RDS, Teniendo solamente datos de RAMM (longitud con ahuellamiento > 20 mm o 30 mm). Sin embargo, los datos de RAMM de ahuellamiento se pueden convertir a RDS mediante las relaciones que figuran en el programa de interfaz de datos. Esto, evidentemente, da una calibración menos precisa que cuando HSD está disponible, pero es preferible a hacer caso omiso de RDS.

En las zonas urbanas, el área de parches puede ser un importante componente de rugosidad. Si una serie de tiempos históricos de áreas parcheadas (si pavimento es reparado o cortes por servicios públicos) es disponible, La media incremental de parches debería incluirse como un término adicional en la regresión que se ha descrito anteriormente.

6.7.6 MACROTEXTURA

6.7.6.1 Formula del Modelo

El modelo de macrotextura ha sido expresado en forma incremental (Cenek 1999^a) de la siguiente manera:

$$\Delta TD = k_1 - TD - k_1 k_2 \log_{10} 10^{\frac{1}{k_2} \frac{TD}{k_1 k_2}} + \Delta NELV$$

Donde:

ΔTD : Cambio en el círculo de arena de macrotextura durante el año en mm

TD : Círculo de arena existente de macrotextura en mm

$NELV$: Numero acumulado de vehículos ligeros equivalentes desde la construcción, donde 1 vehículo pesado = 10 vehículos ligeros equivalentes (ELV).

$\Delta NELV$: Numero de vehículos ligeros equivalentes durante el año.

k_1 : macrotextura inicial después de la construcción en mm

k_2 : Tasa de cambio de macrotextura por el tráfico

El modelo de coeficientes fue dado por Cenek (1999b), como se indica en la tabla 6.14.

Tabla 6.14 Valores de Parámetros calibrados para el Modelo Macrotextura

PARÁMETROS	AADT	VALOR POR GRADO DE CHIP				
		GRADO 2	GRADO 3	GRADO 4	GRADO 5	GRADO 6
k1	25	5.953	4.835	3.717	2.512	1.537
k1	125	6.208	5.044	3.880	2.639	1.601
k1	625	6.463	5.252	4.042	2.765	1.664
k1	3000	6.711	5.456	4.200	2.888	1.726
k1	15000	6.966	5.664	4.363	3.015	1.790
k2 (1)	Todos	0.127	0.126	0.123	0.118	0.110
k2 (2)	Todos	0.130	0.125	0.120	0.110	0.100

(1) Teórico

(2) Recomendado por OPUS Napler

Fuente: Cenek (1999b)

El valor de k_1 puede ser expresado con la siguiente fórmula:

$$k_1 = a_0 + a_1 \ln(AADT)$$

Cabe señalar que el registro de datos HSD es la media de macrotextura, mientras que el modelo anterior se basa sobre el método de parches de arena. La relación entre ambos viene dado por Cenek (1999a):

$$TD = 1.02 MPD + 0.28$$

6.7.6.2 Enfoque HDM para calcular Macrotextura

La versión actual de la Guía de calibración de HDM (Bennett y Paterson, 2000) no incluye la calibración de macrotextura.

6.7.6.3 Requisitos de calibración

Se recomienda que los coeficientes del modelo k_1 y k_2 sean calibrados por separado.

La separación de las calibraciones debe hacerse para cada grado de chip. Los pasos en el proceso son:

1. Estimar el AADT en el momento de la construcción mediante el volumen de tráfico actual e histórico, si la tasa de crecimiento histórico de los volúmenes no están disponibles.
2. Para el AADT asignar la macrotextura inicial (k_1), utilizando el modelo calibrado para este coeficiente.
3. Calcular el valor de $(TD/k_1 - 1)$

4. Calcular el valor acumulado de NELV desde la construcción de la superficie y, a continuación, su valor logarítmico.
5. Llevar a cabo una regresión lineal de $\log(\text{NELV})$ en contra $(\text{TD}/k_1 - 1)$ con cero de intersección.
6. El coeficiente de regresión es el valor calibrado de k_2 .

6.7.7 MICROTEXTURA

La importancia relativa de la macro y micro textura dependen de la función y la ubicación de la carretera. En vías interurbanas de alta velocidad, la macrotextura es de importancia primordial debido a su efecto sobre el hidroplaneo. Por el contrario, donde el tráfico es lento y sujeto a los cambios rápidos de velocidad (condiciones urbanas de caminos rurales mal alineados) microtextura es la condición predominante.

Por ello se considera que el personal encargado del análisis y calibración de los modelos interurbanos se centrará en la profundidad de textura o macrotextura, mientras que alguien con interés en calibrar modelos de vías de tipo urbano, su interés será más interés en el modelo de resistencia al deslizamiento o microtextura; razón por la que es excluido del análisis de este trabajo de graduación, por considerarse fuera de los alcances planteados.

6.7.8 BACHE INICIACIÓN Y PROGRESIÓN

6.7.8.1 Formula del Modelo: Iniciación de bache

El periodo de inicio de baches esta en función del tráfico y el espesor de las capas bituminosas:

$$TMIN = \max(a1 + a2 HS + a3 YAX, a4)$$

Donde:

TMIN: Tiempo en años desde el inicio del deterioro y el inicio de baches

HS Espesor total de capas asfálticas, incluida la base si es bituminosa

Los coeficientes de este modelo dependen de tipo de base, tal como figura en la tabla 6. 15.

Tabla 6.15 Coeficientes de Iniciación bache

BASE	DAÑO SUPERFICIAL	a1	a2	a3	a4
Cementada	Agrietamiento	6	0	1	2
	Desprendimiento de agregados	6	0.1	1	2
Granular/Bituminosa	Agrietamiento	2	0.04	0.5	2
	Desprendimiento de agregados	2	0.14	0.5	2

El Inicio del bache es aún más limitado por el establecimiento de un área mínima de deterioro primario - 20% para agrietamiento ancho y el 30% para desprendimiento de agregados.

6.7.8.2 Formula del Modelo: Progresión de Bache

El aumento anual en la zona de baches es la suma de los importes derivados de las grietas anchas, desprendimiento de agregados y la ampliación de los baches existentes:

$$\Delta APOT = \min(\Delta APOTCR + \Delta APOTRV + \Delta APOTP, 10)$$

Donde:

ΔPOT Total incremento anual en porcentaje de área

El incremento derivado de las grietas anchas, desprendimiento de agregados y ampliación de los baches esta dado por:

$$\Delta APOTCR = K_{ppmin} \frac{1.6ACR WYAXW(1 + CQ)}{SNCHSELANES}, 6$$

$$\Delta APOTRV = K_{ppmin} \frac{0.32ARAVYAXW(1 + CQ)}{SNCHSELANES}, 6$$

$$\Delta APOTP = \min APOTYAX MMP + 0.1 \max a1 + a2 HS, a3, 10$$

Donde:

W Ancho del Pavimento en m

ELANES Número de carriles

MMP precipitación en m/mes

Los coeficientes en la componente de ampliación dependen del tipo de base como lo muestra la Tabla 6.16.

Tabla 6.16 Coeficientes de Ampliación bache

BASE	a1	a2	a3
Granular	2	-0.02	0.3
Cementada	0.6	0	0.6
Bituminosa	0.3	0	0.3

6.7.8.3 Enfoque HDM para Calibrar la Progresión de Bache

En HDM-III, la tasa de progresión de baches es ajustada por el factor K_{ph} , pero el inicio de baches y la contribución de baches para la rugosidad son fijos. La progresión de baches es muy variable

y, en general, difíciles de predecir. Una calibración local es especialmente valiosa cuando los baches son muy frecuentes y graves en partes sustanciales de la red de carreteras.

Esto se debe a que la progresión de baches depende en la sensibilidad del material de base para la desintegración y la humedad y es una función de la construcción y las prácticas de mantenimiento.

En caso contrario, si la aparición de baches es escasa o es rápidamente reparado por el mantenimiento rutinario, un informe detallado de calibración de progresión de bache no es rentable y puede omitirse.

6.7.8.4 Requisitos de calibración

Para cada sección de calibración, calcular el tiempo de inicio de agrietamiento (PTCI), el tiempo de inicio de Baches (PTPI), y el tiempo de progresión de Baches a X unidades (PTPX) hasta 500 unidades de Baches. Calcular los tiempos de baches observados y los previstos de la siguiente manera:

$$OTPX_j = AGES - PTPI_j$$

$$PTPX_j = PTPX_j - PTPI_j$$

Determine el factor de ajuste de Baches, ya sea por regresión lineal de OTPX_j contra PTPX_j, o de la siguiente manera:

$$K_{ph} = \frac{\text{Media}(OTPX_j)}{\text{Media}(PTPX_j)}$$

6.8 METODOLOGIA DE CALIBRACION PARA LOS MODELOS DE DETERIORO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRAULICO.

6.8.1 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE FACTORES DE CALIBRACIÓN

Para comparar el comportamiento observado en terreno con la predicción efectuada por los modelos HDM-4 sin calibrar, es necesario contar con toda la información requerida por las ecuaciones de predicción. En HDM-4, los deterioros modelados en pavimentos de concreto simple con juntas son:

- Escalonamiento de juntas transversales
- Deterioro de juntas transversales (Despostillamiento)
- Agrietamiento Transversal
- IRI

Una vez efectuada la predicción del deterioro sin calibrar, y teniendo en cuenta que solamente existe un dato observado en el año 2001 para cada uno de los deterioros arriba citados, se pueden calcular los factores de ajuste de una manera sencilla, siguiendo la metodología establecida por estudios argentinos (Marcelo Bustos, EICAM). Los modelos de predicción del escalonamiento y del deterioro en juntas transversales permiten calcular el factor de ajuste dividiendo directamente el valor del deterioro observado en el valor del deterioro predicho por el modelo sin calibrar, como aparece en la siguiente ecuación.

$$K_i = VO_{det} / VP_{det} (1)$$

Siendo:

K_i : factor de calibración del modelo

VO_{det} : valor observado del deterioro

VP_{det} : valor de deterioro predicho por el modelo sin calibrar

Tabla 6.17. Factor de calibración usado en pavimentos de concreto hidráulico JPCP

TIPO DE SUPERFICIE	FACTOR DE CALIBRACION	MODELOS DE DETERIORO
JP	K_{jpc}	Factor de calibración de grietas transversales
	K_{jpnf}	Factor de calibración escalonamiento en pavimento de concreto JP sin dovelas
	K_{jpdf}	Factor de calibración de escalonamiento en pavimento de concreto JP con dovelas
	K_{jps}	Factor de calibración de despostillamiento
	K_{jpr}	Factor de calibración de progresión de rugosidad (IRI)

6.8.2 ESCALONAMIENTO DE JUNTAS CON BARRAS DE TRASPASO DE CARGA.

Las ecuaciones de predicciones son diferentes dependiendo de si el pavimento tiene dispositivos de transferencia de carga (dovelas) o no. Antes de iniciar el cálculo de los factores de calibración, para obtener mejores resultados se recomienda lo siguiente:

- Aquellas secciones con una disminución en el escalonamiento deben ser eliminadas (bajo la suposición de que existen errores de medidas o de archivos, o acciones de mantenimiento no documentadas). En secciones donde un valor de escalonamiento se predice como negativo, se reemplaza su valor a cero.
- Se recomienda eliminar todas aquellas secciones que no presentan fallo por escalonamiento para 2 millones o más de ejes equivalentes acumulados, según la experiencia en países como Chile este caso es muy extraño (además de reducir bastante los valores de K1 obtenido) y esto puede ser atribuido al error de datos.
- Las secciones de pavimento JPCP con escalonamiento alto (más de 5mm) deben ser eliminadas porque están fuera del rango para el cual el modelo fue desarrollado y además, a tales niveles de escalonamiento sería necesario aplicar medidas correctivas.

Para modelar el deterioro en JPCP, las ecuaciones desarrolladas en un estudio de investigación de FHWA son empleadas. A continuación se presenta la ecuación de deterioro para escalonamiento para JPCP con barras de transferencia de carga o dovelas, acompañada de su respectivo factor de calibración.

6.8.2.1. Formula del escalonamiento con barras de transferencia de carga

$$\begin{aligned}
 FAULT = & K_{jpcpf} NE4^{0.25} 0.0628 (1 - C_d) + 3.673 \times 10^{-9} BSTRESS^2 + 4.116 \times 10^{-9} JTSPACE^2 \\
 & + 7.466 \times 10^{-10} FI^2 PRECIP^{0.5} - 0.009503BASE - 0.01917WIDENED \\
 & + 0.0009217AGE
 \end{aligned}$$

Donde:

<i>FAULT:</i>	Escalonamiento transversal promedio (m)
<i>Cd:</i>	Coefficiente de drenaje modificado por AASHTO
<i>NE4:</i>	Número de ejes sencillos equivalentes acumulados (ESALs) desde construcción (millones de ejes de 18kip (8,181.8 kg) por carril)
<i>BSTRESS:</i>	Máximo esfuerzo de resistencia del concreto, en el sistema dovela-concreto (psi-Pa). La combinación concreto y acero de refuerzo permite una mejora en la reacción del pavimento y por ende en el esfuerzo máximo que es capaz de resistir el sistema en conjunto.
<i>BASE:</i>	Tipo de base; 0 = no estabilizada, 1 = estabilizada
<i>FI:</i>	Índice de congelamiento (°F-días)
<i>JTSPACE:</i>	Distancia entre juntas transversales (m)
<i>PRECIP:</i>	Precipitación promedio anual (m)
<i>WIDENED:</i>	Carril ancho; 0 = No anchado, 1= Carril ancho o bermas hechas durante construcción, 0,5 = Bermas en concreto colocadas después de la construcción
<i>K_{jpdf}:</i>	Factor de calibración (defecto = 1,0)
<i>AGE:</i>	Número de años del pavimento desde la construcción. La edad del pavimento debe tenerse en cuenta pues a medida que pasa el tiempo los materiales se van alterando y perdiendo propiedades como resistencia entre otros

Tabla 6.18 Relación entre tiempo de drenaje y calidad de drenaje

CALIDAD DE DRENAJE	AGUA RETENIDA, (T50)
Excelente	2 horas
Buena	1 día
Regular	7 semanas
Mala	1 mes
Muy mala	(agua sin drenaje)

Tabla 6.19 Valores recomendados de coeficiente de drenaje (Cd) para pavimentos de concreto hidráulico.

CALIDAD DE DRENAJE	PORCENTAJE DE TIEMPO QUE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO ESTA EXPUESTA A NIVELES DE HUMEDAD CERCA DE SATURACION			
	menos que %	1 - 5%	5 - 25%	mas que 25%
Excelente	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Bueno	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Regular	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Malo	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy malo	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Fuente: AASHTO (1993)

La tabla muestra una matriz simplificada que puede ser usada para estimar el coeficiente de drenaje (FHWA, 1995)

Tabla 6.20 Matriz simplificada para coeficiente de drenaje (Cd) AASHTO modificada

DRENAJES LATERALES	NIVELES DE PRECIPITACION	SUBRASANTE FINA		SUBRASANTE GRUESA	
		BASE IMPERMEABLE	BASE PERMEABLE	BASE IMPERMEABLE	BASE PERMEABLE
NO	Húmedo	0.85 - 0.95	0.70 - 0.90	0.75 - 0.95	0.90 - 1.00
	Seco (árido)	0.95 - 1.05	0.90 - 1.10	0.90 - 1.15	1.00 - 1.10
SI	Húmedo	1.00 - 1.10	0.75 - 0.95	0.90 - 1.10	1.05 - 1.15
	Seco (árido)	1.10 - 1.20	0.95 - 1.15	1.10 - 1.20	1.15 - 1.20

Fuente: FHWA, 1995

6.6.8.1. Calculo del máximo esfuerzo del concreto

$$BSTRESS = \frac{DFAC * P * LT * Kd * 2 + BETA * OPENING}{4 * E_s * INERT * BETA^3}$$

- BSTRESS:** Tensión máxima del concreto, en el sistema concreto-dovela (psi)
- DFAC:** Factor de distribución, dada por $\frac{24}{l + 12}$
- l** Radio de la rigidez relativa del sistema losa-fundación (pulg). El calculada usando la ecuación anterior.
- P:** Carga total aplicada por cada rueda de un eje axial simple (lb) (por defecto 9,000)
- LT:** Porcentaje de transferencia de carga entre las juntas (por defecto = 45)
- Kd:** Modulo de soporte de la dovela (pci) (valor por defecto = $1.5 * 10^6$ psi/pulg)
- BETA:** Rigidez relativa del sistema dovela-concreto
- OPENING:** Promedio de la abertura de la junta transversal (pulg)
- Es:** Módulo de elasticidad de la dovela (psi)
- INERT:** Momento de Inercia de la sección transversal de la dovela (pulg⁴)

La rigidez relativa del sistema dovela-concreto (BETA) se obtiene de la siguiente ecuación:

$$BETA = \left[\frac{Kd * DOWEL}{4 * E_s * INERT} \right]^{0.25}$$

Donde:

- INERT:** Momento de Inercia de la sección transversal de la dovela (pulg⁴)
- Kd:** Modulo de soporte de la dovela (pci) (valor por defecto = $1.5 * 10^6$ psi/pulg)
- DOWEL:** Diámetro de dovela (pulgadas)

- Es: Módulo de elasticidad de la dovela (psi)
- INERT: Momento de Inercia de la sección transversal de la dovela (pulg⁴)

El promedio de abertura de la junta transversal (OPENING) está dado por:

$$OPENING = 12 * CON * JTSPACE * \frac{\alpha * TRANGE}{2} + \gamma$$

Donde:

- BETA: Rigidez relativa del sistema dovela-concreto
- CON: Factor de ajuste debido a la retención de fricción entre la losa y la base
 0.80 si la base es no estabilizada (granular)
 0.65 si es base estabilizada.
- JTSPACE Espaciamiento promedio de juntas transversales (pies)
- α Coeficiente termal del concreto (por °F)
- TRANCE: Rango de temperatura (es el rango temperatura mensual obtenido entre la diferencia de la temperatura máxima y la mínima para cada mes) (°F)
- γ Coeficiente de contracción del concreto.

El momento de inercia de la barra de transferencia o dovela (INERT) se obtiene por:

$$INERT = 0.25 * \pi * \frac{DOWEL^4}{2}$$

Donde:

INERT: Momento de Inercia de la sección transversal de la dovela (pulg⁴)

DOWEL: Diámetro de dovela (pulgadas)

6.8.3 ESCALONAMIENTO DE JUNTAS SIN BARRAS DE TRASPASO DE CARGA.

$$FAULT = 25.4(NE4)^{0.25} MAY 0, 0.2347 - 0.1516 C_d - 2.88 \times 10^{-7} H_p^2 L^{0.25} - 0.0115BASE + 6.45 \\ \times 10^{-8} FI^{1.5} MMP^{0.25} - 0.002478(DAYS90)^{0.5} - 0.0415WIDENED$$

Donde:

FAULT: Escalonamiento transversal promedio, en mm

NE4: Número de ejes sencillos equivalentes acumulados (ESALs)

C_d: Coeficiente de drenaje modificado por AASHTO

H_p: Espesor de losa, en mm

L: Distancia entre juntas transversales, en m

BASE: Tipo de base; 0 = no estabilizada, 1 = estabilizada

FI: Índice de congelamiento (°F-días)

MMP: Precipitación promedio mensual, en mm/mes

DAYS90: Número de días con temperatura >32°C

WIDENED: Carril ancho; 0 = No anchado, 1= Carril ancho o bermas hechas durante construcción

6.8.4 AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL.

Esta calibración requiere un considerable proceso de los datos de inventario, en donde debe tomarse en cuenta los siguientes criterios:

- Debido a la alta sensibilidad de este modelo con respecto a las características de esfuerzo, todas las secciones que no tienen un valor de la fundación k o datos estructurales concretos se eliminan del análisis.
- Se asume que varios parámetros son constantes de acuerdo a las especificaciones del modelo (relación de Poisson, presión de neumático, distancia entre los bordes de la losa y wheelpath, etc.).
- Para calcular exactamente/con precisión el esfuerzo por fatiga, el modelo requiere saber la distribución de frecuencia de los gradientes termales de la losa. Las distribuciones típicas son como funciones de la zona climática y del espesor de la losa.

La siguiente fórmula también contiene una corrección de deformación por diferencia de temperatura que produce inicialmente un encorvamiento de la losa:

$$PCRACK = \frac{100}{1 + 1.41 * FD^{-1.66}}$$

Donde FD es el daño acumulado por fatiga, calculado de la manera especificada por el modelo original, y $PCRACK$ es el porcentaje de losas agrietadas.

Si el factor de calibración de agrietamiento transversal $kjpc$ es multiplicado por todo el lado derecho de esta ecuación, entonces el cálculo de factores se puede hacer siguiendo el procedimiento desarrollado en este documento como en el caso del escalonamiento transversal. Sin embargo, si se hace esto, la predicción del modelo calibrado se limita a un valor máximo igual a $(100 kjpc)$ debido a la forma funcional logística de la ecuación.

Así pues, por ejemplo, si $kjpc = 0.75$, entonces el valor máximo que se puede predecir por el modelo calibrado es $PCRACK = 75\%$. Además, si el $kjpc = 1.30$, el modelo puede predecir hasta 130% de losas agrietadas.

Para solucionar este problema, la posición del factor de la calibración se debe cambiar, como se muestra en la siguiente ecuación general:

$$PCRACK = \frac{100}{1 + a K j p_c F D^b}$$

El procedimiento matemático para calcular los factores de calibración derivada de la expresión del error total es más complejo que el desarrollado previamente, y en este caso no puede obtenerse una ecuación para determinar el $kjpc$ directamente.

A continuación se presenta la ecuación a resolver; un procedimiento iterativo se debe seguir para obtener el valor final de este factor de calibración:

$$T_1 \times T_2 \times T_3 = 0$$

En donde, para cada dato observado i:

$$T_1 = \frac{100}{1 + a \cdot K_j p_c * FD_i^b} - CRobs_i$$

$$T_2 = 100 * \frac{1}{1 + a \cdot K_j p_c * FD_i^b} - 2$$

$$T_3 = a * b \cdot K_j p_c * FD_i^{b-1} * FD_i$$

6.8.4.1. Determinación de daño por fatiga (FD)

El daño por fatiga acumulado es calculado en términos de daño por la teoría de Miner, sumando el índice de daño sobre cada losa por diferencias de temperatura y distribución de carga del eje, como sigue:

$$FD = \sum_{tg=1}^G \frac{n_{tg}}{N_{tg}}$$

Donde:

FD: Daño por fatiga acumulado

Tg: Gradiente de temperatura (tg = 1, ..., G)

- n_{tg} : Numero de ejes equivalentes simples axiales de 18 kips pasantes durante un gradiente de temperatura (tg) (ESALs por carril)
- N_{tg} : Numero máximo de ejes equivalentes axiales estándar, repeticiones de carga durante el gradiente de temperatura (tg) antes de fallo por flexión (ESALs por carril).

Según la teoría de Miner, se espera que el agrietamiento transversal ocurra cuando el daño por fatiga acumulada (FD) se acerque a 1.0.

Gradiente de temperatura

Las variaciones de la temperatura en pavimentos de concreto en un año de servicio pueden ser representadas por una distribución de gradiente de temperaturas.

6.8.5 DESPOSTILLAMIENTO DE JUNTAS

En este caso se recomienda:

- Las secciones que presenten una progresión inusual de despostillamiento en un breve periodo de tiempo (diferencia de más del 40% en valores absolutos observados, en un período de hasta 3 años) deben eliminarse para evitar posibles errores en el registro de la severidad y de la cantidad de deterioro superficial. Por razones similares, también se rechazan aquellas secciones que presenten una disminución del deterioro con el tiempo.

- Se desechan las secciones para las cuales el modelo proyecta un deterioro de juntas cerca del 100% o valores negativos.

- Todas las secciones que recibieron rehabilitación se eliminan.

6.8.5.1. Formula de despostillamiento

$$\begin{aligned}
 SPALL = & K_{jps} AGE^2 JTSPACE 10^{-6} 549.9 - 895.7 LIQSEAL + PREFSEAL + 1.11 \\
 & \times 10^{-3} DAY90^3 + 375 DWLCOR + 29.01 - 27.6 LIQSEAL FI \\
 & - 28.59 PREFSEAL + 27.09 SILSEAL FI
 \end{aligned}$$

Donde:

SPALL: Porcentaje de juntas descascaradas

AGE: Edad en años desde la construcción

JTSPACE: Espaciamiento entre juntas promedio (m)

LIQSEAL: Presencia de líquido sellante en las juntas. Todas las juntas, ya sean de construcción y contracción deben sellarse para prevenir la entrada de agua bajo la losa.

HDM tiene en cuenta el sellante líquido (usualmente asfáltico) pero no lo considera en gran detalle, solo su presencia u ausencia, Así: 0 = No presente, 1 = Presente

PREFSEAL: Presencia de sellante preformado en las juntas. Existen diferentes tipos de sellantes, entre los cuales se tienen preformados de goma. HDM

considera la presencia u ausencia de ellos, Así: 0 = No presente, 1 = Presente

DAYS90: Número de días con la temperatura media mayor a 90 °F al año.

DWLCOR: Protección a la corrosión de la dovela. La protección de las dovelas es tomada en cuenta dentro del programa a manera general, así:
0 = inexistencia de dovela o dovelas protegidas
1 = Dovelas no protegidas

FI: Índice de congelamiento (°F-días)

SILSEAL: Presencia de silicona en las juntas. Al igual que los sellantes, HDM tiene la posibilidad de especificar si las juntas tienen silicona para la protección de la losa del agua. Numéricamente: 0 = No presente, 1 = Presente

K_{jps}: Factor de calibración (defecto = 1,0)

6.8.6 ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)

Para calibrar este modelo para JPCP, es necesario proyectar los valores correspondientes de escalonamiento, agrietamiento y despostillamiento de juntas, que permiten calcular el IRI de la sección bajo estudio. Esto permite la comparación del IRI proyectado con el IRI medido en campo.

Una vez calibrada la predicción de los modelos de agrietamiento transversal, escalonamiento y deterioro de juntas transversales, se pasa a obtener el factor de ajuste del modelo de IRI, que es función directa de los deterioros precedentes, y de un valor de IRI correspondiente al registrado inmediatamente después de la construcción (IRI_0). Como habitualmente no se dispone del valor de IRI_0 , se debe suponer de la mejor manera posible. En consecuencia, el factor de ajuste del modelo de IRI se obtiene utilizando:

$$K_{IRI} = \frac{IRI_{obs} - IRI_0}{IRI_{pred} - IRI_0}$$

Siendo:

K_{IRI} : Factor de calibración del modelo de IRI

IRI_{obs} : Valor de IRI medido para el tramo analizado

IRI_{pred} : Valor de IRI predicho por el modelo correspondiente, considerando que los modelos de escalonamiento, deterioro de juntas y agrietamiento ya han sido previamente calibrados

IRI_0 : Valor de IRI inmediatamente después de construido (si no se conoce debe ser estimado).

Esta calibración puede ser hecha en 3 pasos.

Primer paso

Es necesario determinar el valor de deterioro (agrietamiento, escalonamiento o despostillamiento) que determina la progresión de rugosidad; el cual debe ser afectado por su factor de ajuste antes de calcular el IRI. Es importante señalar que la calibración es secuencial, ya que los factores de deterioro que influyen en el IRI deben ser calibrados antes del IRI.

Segundo paso

El segundo paso puede ser diferente para una calibración a nivel de red o nivel de proyecto. A nivel de red, si el encargado de ejecutarla, por motivos de simplicidad en la dirección de un sistema de mantenimiento de pavimento de concreto, quiere obtener valores de IRI_0 típicos (o regional), pueden calcularse a fin de minimizar la diferencia entre los valores predichos y los observados, y posteriormente, determinar el valor de K_1 de la forma que se indica a continuación. Esta opción puede ser aplicada a los modelos de calibración de IRI que presentamos. La correspondiente expresión de error total se describe como:

$$E_t = K_1 f(X_i) + IRI_0 - OV_i^2$$

Y derivando con respecto a IRI_0 (asumiendo $K_1=1$). Igualando a cero, el valor de IRI_0 calibrado se determina por:

$$IRI_0 = \frac{\sum_i^n VO_i - \sum_i^n f(X_i)}{n}$$

A nivel de proyecto, el encargado necesita conocer el valor del IRI_0 para calibrar la progresión de rugosidad. Un procedimiento estadístico para estimar IRI_0 como el mencionado anteriormente podría ser utilizado, pero es muy dependiente de los datos disponibles y no siempre es confiable. Si el encargado no sabe la rugosidad inicial, se recomienda emplear la experiencia de estudios en países con similares características para asumir un valor.

Tercer paso

Una vez que el valor de IRI_0 es estimado o asumido, se debe derivar la expresión de error total con respecto a K_1 , igualando a cero y despejando el factor de calibración tenemos:

$$K_1 = \frac{\sum_i^n OVi * f(X_i) + IRI_0 \sum_i^n (X_i)}{\sum_i^n f^2(X_i)}$$

Para evaluar las ventajas de las predicciones calibradas, el Error de Predicción Medio (MONO) es calculado por la expresión siguiente (n es el número total de datos):

$$APE = \frac{Vobs_i - Vpred_i}{n - 1}^{1/2}$$

6.8.6.1. Formula de IRI

La ecuación utilizada para IRI, modificada por los factores de calibración, es la siguiente:

$$IRI = IRI_0 + K_j p_r \left(2.6098 \text{ Fault}_{TT} + 1.8407 \text{ Spall} + 2.2802 * 10^{-6} \text{ Tcrack}^3 \right)$$

Donde:

IRI₀ = valor inicial IRI (99.59 in/milla en el modelo original)

Fault_{TT} = escalonamiento total acumulado por milla, in/mi

Tcrack = cantidad total de grietas transversales por milla, número/mi

Spall = juntas despostilladas, %



***CAPITULO VII
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES***

7.1 CONCLUSIONES.

El impacto económico del proceso de calibración de los modelos es debido a la influencia directa en el inicio y progresión de los deterioros del pavimento, se hace necesaria una adecuada adaptación de ellos, de modo que se pueda efectuar una evaluación técnico-económica certera de los proyectos viales. Debido a la poca o nula información sobre predicción de deterioro en pavimentos rígidos y flexibles es necesario el inicio de apertura de la brecha para lograr en nuestro país la realización de diseños de pavimentos ajustados a la realidad; tanto económica, mejorando la optimización de recursos; como técnica, proporcionando las herramientas para la elaboración en un entorno real.

Con respecto a los modelos de deterioro de pavimentos de concreto asfáltico mezcla en caliente podemos concluir:

- ✓ En este trabajo, sólo se considera el agrietamiento estructural y no el debido a los cambios de temperatura, ya que el HDM-4 considera que este deterioro surge en zonas climáticas muy frías, o en climas sumamente áridos, lo cual no se tomó como un clima que fuera típico de los casos propuestos para el análisis, tratando de ser representativos con las condiciones medias del país.

- ✓ El deterioro de desprendimiento de agregados no es considerado en el análisis, ya que la modelación que lleva a cabo el HDM-4, se enfoca a las carpetas colocadas mediante procesos en frío; lo cual queda fuera de los alcances de este trabajo de graduación.

- ✓ Los modelos de asfalto en el HDM-4 presentan un mayor desarrollo relativo a sus homólogos de concreto, además, según experiencias en países como Chile, Argentina, Costa Rica y Guatemala, entre otros; la predicción permite un mejor ajuste a la realidad debido a la separación de algunos deterioros en inicio y progresión del mismo.

En relación a los modelos de deterioro de pavimentos de concreto hidráulico JPCP con o sin dovelas podemos concluir:

- ✓ La baja complejidad de los modelos de predicción de deterioro para pavimentos de concreto hidráulico, relativo al desarrollo de las ecuaciones de pavimentos asfáltico, se debe a que es la primera vez que son incorporadas en el programa HDM-4, sin embargo esto no resta calidad a su función, sino que amplía la posibilidad de comprender mejor el fenómeno.

- ✓ Al igual que en los modelos para pavimentos asfálticos, solo se considera el agrietamiento estructural y no el debido a los cambios de temperatura, ya que el HDM-4 considera una transición de climas extremos en este rubro.

- ✓ En países donde se tiene un amplio rango de variación de temperatura y donde los pavimentos de concreto hidráulico se ven expuestos al hielo y deshielo; como es el caso de zonas de países como Bolivia, Argentina o Chile; la predicción de modelos para pavimentos de concreto hidráulico no ha sido acertada en algunos estudios, sin embargo, bajo tal situación no se puede inferir que los modelos sean poco confiables hasta no descartar que dicha falta de efectividad se deba a la situación particular del comportamiento del concreto como elemento aislado en dicho escenario.

En cuanto a la metodología de calibración de los modelos de deterioro de pavimentos podemos concluir:

- ✓ Es fundamental tener en cuenta que una herramienta como el HDM-4 se basa en un conjunto de modelos que dan unos resultados en función de los datos incorporados al mismo, por lo que es fundamental que la utilización de una aplicación de este tipo sea llevada a cabo por técnicos con amplio conocimiento y criterio a la hora de evaluar inversiones en carreteras. De esta manera se asegura que los datos de entrada que se utilicen sean congruentes y precisos; y que el análisis de los resultados sea bajo criterios adecuados.

- ✓ Los estudios previos a la calibración de los modelos de deterioro de pavimentos son:
 - Situación de estado del pavimento: se requiere de la actualización normalizada de la información de estado y crear una base informatizada (incluyendo edad, condiciones del lugar, clima, precipitación, drenaje utilizado, etc.)
 - Datos de tráfico: se requiere información suficiente en cuanto a volumen y composición y se requieren precisiones en composiciones y variaciones de tráfico, características técnicas de los vehículos y peso por eje.
 - Situación de la estructura del pavimento: Espesores de capa, resistencia de subrasante, diseño estructural, capa de rodadura, historial de carreteras; los modelos son muy sensibles a esta información.
 - Situación de datos geométricos de la carretera: grado de curvatura, pendientes, bajadas más subidas, alineamiento horizontal.
 - Situación de costos unitarios: establecer una base de índices que permita trabajar cómodamente cualquiera de las fases.

En nuestro país, gracias al SIGESVIES, existe información sistematizada de inventario vial que anualmente se monitorea, ésta es una buena base de datos; el acceso a dicha información facilitarían la calibración de los modelos de deterioro de pavimentos.

Ningún proyecto para el desarrollo de gestión de carreteras se considera viable cuando no hay un sólido compromiso de la organización de la entidad gubernamental encargada (MOP), el estrechamiento de las relaciones entre las instituciones interesadas en lograr la calibración de los modelos de deterioro, tendría como producto el acortamiento de las actividades de auscultación y evitaría incurrir en costos, que ya se consideraron en la elaboración del inventario vial. Este compromiso, debe expresarse en aspectos como:

- a) Participación de las áreas de decisión en la concepción, diseño y en los aspectos generales de la implementación del sistema.
 - b) Convencimiento pleno del personal involucrado con respecto a las bondades del sistema, especialmente de los funcionarios de alto nivel.
- ✓ En nuestro país, los modelos de predicción de deterioro más viables a ser calibrados son:
- Grietas, tanto para pavimentos asfálticos como para pavimentos de concreto hidráulico, ya que este daño conlleva a otros deterioros secundarios, cada vez más difíciles de tratar. La forma de auscultación es manual o puede utilizarse un odómetro digital para medición de longitud de grietas.

- Los modelos de deterioro de baches en pavimentos de concreto asfálticos, escalonamiento y despostillamiento para pavimentos de concreto hidráulico, tienen las mismas posibilidades que el modelo de agrietamiento, ya que también es de auscultación manual.
- Los modelos de ahuellamiento puede realizarse de forma manual y también con la ayuda de equipos como el Video Láser RST (Road Surface Tester).
- El Índice de Irregularidad superficial (IRI) necesita de equipo más sofisticado para su determinación, como el perfilómetro laser, Laser portable.
- Los deterioros relacionados con la textura, que según nuestra investigación estarían en último orden de prioridad, la primera razón es porque es la primera vez que se incluye en el HDM-4 y la segunda razón es porque se necesita de equipo o actividades más sofisticadas para su determinación. Así, la macrotextura mediante el ensayo de mancha de arena y la microtextura con el equipo de auscultación Grim (Side force Coefficient Road Investigation Machine).

7.2 RECOMENDACIONES.

- ✓ Proponemos buscar un mecanismo que nos permita llevar a cabo la calibración local del modelo HDM-4, tomando en cuenta las instituciones pertinentes tales como el Ministerio de Obras Públicas (MOP), Institución encargada a nivel nacional de la planificación vial, así como también involucrar al Fondo de Conservación Vial (FOVIAL), institución que es encargada del mantenimiento de las carreteras a nivel nacional; así como también la asesoría de empresas extranjeras con experiencia en este tipo de estudio.

- ✓ Utilizar el modelo HDM-4 debidamente calibrado, como una herramienta que nos permita verificar la estructura de pavimentos resultantes de diversos métodos de diseño son adecuados, pudiendo evitar el sobredimensionamiento o subdimensionamiento, esto a partir del análisis de los deterioros que se esperarían en el futuro bajo las condiciones existentes.

- ✓ Para lograr la primera calibración de los modelos de deterioro de pavimentos en nuestro país, en condiciones adecuadas se necesita de profesionales experimentados en trabajos similares en la región; dichos profesionales deben ser parte de un grupo mixto, es decir el equipo ideal para realizar la primera calibración debe estar conformado por profesionales extranjeros expertos y profesionales capaces en el campo de nuestro país; de esta forma nos estamos asegurando que el desempeño sea el adecuado y que la

experiencia adquirida por el personal nacional sirva como base para futuras calibraciones de los modelos comportamiento hasta llegar a una adaptación del HDM-4 a condiciones locales.

- ✓ Recomendamos a los Estudiantes Egresados de la Universidad de El Salvador, continuar con esta investigación, utilizando como base nuestro trabajo de graduación, es decir, aplicar la metodología de calibración establecida por esta investigación, y proceder a calibrar cada uno de los modelos de deterioro del programa HDM-4; ya sea colaborando al titular (nacional o extranjero) que lleve a cabo dicha labor o tomando las riendas por completo de la calibración; que aunque sabemos será un trabajo arduo, bien ejecutada, será un aporte muy grande a la gestión de pavimentos de nuestro país.

- ✓ Es importante continuar con el estudio, además de proponer la calibración de los modelos de deterioro en nuestro país, es necesario la verificación del modelo, por lo que se recomienda complementarlo realizando un detallado y cuidadoso análisis de sensibilidad, el cual nos mostrará la confiabilidad en la estructura del modelo, ya que es una medida de los efectos del cambio de un factor sobre otro factor, o sea medir los efectos de cambios en la entrada del modelo, o estructura, sobre los resultados obtenidos; consecuentemente, así estaremos mejorando la calidad de valores salida mediante una priorización de parámetros de entrada que tienen mayor influencia en el modelo.

- ✓ Si bien es cierto en óptimas condiciones se requiere la presencia orientadora de profesionales extranjeros con experiencias en calibraciones de modelos de comportamiento de pavimentos en la región; el personal técnico que labora en la gestión vial de nuestro país es capaz de asimilar con facilidad la manera en que puede trabajarse con el sistema a través de seminarios de preparación; así también deben ser tomados en cuenta futuros profesionales comprometidos con el tema descrito. El perfil idóneo de las personas encargadas de gabinete o procesamiento de datos consiste en un profesional con sólidas bases de procesamiento de datos estadísticos, manejo del programa HDM-4 y de dominio de hojas de cálculo. El personal encargado de trabajos de campo debe tener profundos conocimientos en auscultación de deterioro, con cualidades de orden en la recolección de datos, capacidad analítica y experiencia en administración de vías.

- ✓ Nuestro trabajo de graduación propone una metodología para lograr una calibración de los modelos de deterioros a nivel 2, es decir una calibración de las variables primarias de los modelos presentados, el estudio, monitoreo y la medición constante del comportamiento del pavimento es la base para la posterior creación de una calibración a nivel 3, esto es el logro de la adaptación de los modelos de deterioro a nuestro medio o región; y así, idealmente, poder predecir fielmente el comportamiento de los mismos bajo las influencias locales.

BIBLIOGRAFIA

GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURA VIAL

Hernán de Solminihaq T.

Ediciones Universidad Católica de Chile

Primera Edición

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORT OFFICIALS

(AASHTO)

1993

INGENIERÍA DE TRÁNSITO: FUNDAMENTOS Y APLICACIONES

Rafael Cal y Mayor R., James Cárdenas G.

ALFAOMEGA

Séptima Edición, 1998

MANUAL CENTROAMERICANO DE NORMAS PARA EL DISEÑO GEOMÉTRICO DE LAS CARRETERAS REGIONALES.

Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA)

Noviembre, 2002

CATALOGO CENTROAMERICANO DE DAÑOS A PAVIMENTOS VIALES

Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA)

THE HIGHWAY DEVELOPMENT AND MANAGEMENT SERIES

Volume I: Overview of HDM-4

Henry G. R. Kerali

PIARC

THE HIGHWAY DEVELOPMENT AND MANAGEMENT SERIES

Volume IV: Analytical Framework and Model Descriptions

J. B. Odoki, Henry G. R. Kerali

PIARC

THE HIGHWAY DEVELOPMENT AND MANAGEMENT SERIES

Volume V: A Guide to Calibration and Adaptation

Christopher R. Bennett, William D. O. Paterson

PIARC

TERMINOLOGIA DEL HORMIGON Y EL CEMENTO

Comité ACI 116.

ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE LA HERRAMIENTA DE GESTIÓN HDM-4 PARA EL CASO DE LA SIMULACIÓN DEL DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS DEL TIPO JPCP PARA LAS CONDICIONES COLOMBIANAS

Norma carolina Cárdenas, Mariana Rodríguez

Pontificia universidad javeriana, facultad de ingeniería, departamento de ingeniería civil,

Bogotá d.c., 2006

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN EN EL CENTRO OESTE ARGENTINO, A TRAVÉS DE LA CALIBRACIÓN Y AJUSTE DE MODELOS DE DETERIORO HDM-4

Marcelo Gastón bustos, Girardi Mancini, Juan Enrique Marcet, Oscar Víctor Cordo, Miguel Oscar Pereyra, Anibal Leodegario Altamira

Docentes de la Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña,

Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan

EXPERIENCIA EN ARGENTINA SOBRE CALIBRACIÓN DE MODELOS HDM-4 DE COMPORTAMIENTO PARA PAVIMENTOS DE HORMIGÓN". SEMINARIO SOBRE "HDM-4, GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE CARRETERAS Y TECNOLOGÍA PARA EL MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS

Marcet, J.; Bustos, M.; Cordo, O.; Altamira, A.; Pereyra, M.; Girardi, P. (2002).

Heredia. Costa Rica, 12 al 14 de noviembre de 2002.

**CALIBRATION OF PERFORMANCE MODELS FOR JOINTED PLAIN CONCRETE
PAVEMENTS USING LONG-TERM PAVEMENT PERFORMANCE DATABASE**

Bustos, M., De Solminihac, H., Darter, M., Caroca, A., Covarrubias, J.P. (1998)

Transportation Research Record N° 1629, pp. 108-116. Transportation Research Board.

Washington D.C., 1998.

**CALIBRACIÓN DE MODELOS DE COMPORTAMIENTO HDM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS
A LAS CONDICIONES DE CHILE**

Hernán de Solminihac T. Priscila Hidalgo S., Mauricio Salgado T., Miguel Valdés f.

Dirección Nacional de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS DE DETERIORO DEL HDM-4 PARA
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Ricardo Solorio Murillo, Roberto Israel Hernández Domínguez, José Antonio Gómez López

Publicación Técnica No 253 Sanfandila, Qro, 2004

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, INSTITUTO MEXICANO DEL
TRANSPORTE**

<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt253.pdf>

EL HDM-4 COMO HERRAMIENTA DE AYUDA PARA LA CONSERVACIÓN DE CARRETERAS

Comunicación Libre - VIII Jornadas Nacionales sobre Conservación de Carreteras

Autores: Ramón Crespo del Río y Pedro Yarza Álvarez

**CALIBRATION GUIDELINES FOR PAVEMENT DETERIORATION AND WORKS EFFECTS
MODELS IN DTIMS.**

RIMS, Road Information Management Systems.

Nueva Zelanda, 2000

[http://www.rims.org.nz/NR/rdonlyres/1166552A-3D9A-48F2-A6E5-
CC16890BE2E9/0/CalibrationGuide.pdf](http://www.rims.org.nz/NR/rdonlyres/1166552A-3D9A-48F2-A6E5-CC16890BE2E9/0/CalibrationGuide.pdf)

CUADERNO AEPO N° 4. INTRODUCCIÓN A LA AUSCULTACIÓN DE FIRMES

AEPO Ingenieros Consultores. Departamento de Auscultación de Firmes

(02/01/1997)

http://www.aepo.es/aepo-old/ausc/publ/AEPO_HDM4.pdf

**DESCRIPCIÓN DE SISTEMAS DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS Y USO DE LOS PROGRAMAS
HDM-III Y HDM-4.**

Elba Bengoa Pérez

Universidad de Piura, Perú.

BOLETIN CLIMATOLOGICO ANUAL

SNET, Servicio Nacional de Estudios Territoriales

<http://mapas.snet.gob.sv/meteorologia/clima2007.pdf>