

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



TRABAJO DE GRADUACION
VERIFICACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LOS MODELOS DE
DETERIORO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS EN EL SALVADOR

PRESENTADO POR:

BR. ALFARO LÓPEZ, INGRID ALTAGRACIA, AL03010

BR. CASTANEDA ZALDAÑA, ROSA MARIA, CZ03004

BR. PINEDA MANCÍA, ALEX JAVIER, PM06011

DOCENTES DIRECTORES:

ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA

ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES

ING. CARLOS ANTONIO QUINTANILLA RODRIGUEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE 2011

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



**VERIFICACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LOS
MODELOS DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS
RÍGIDOS EN EL SALVADOR.**

PRESENTADO POR:

**INGRID ALTAGRACIA ALFARO LOPEZ
ROSA MARIA CASTANEDA ZALDAÑA
ALEX JAVIER PINEDA MANCIA**

PARA OPTAR AL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE 2011

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

:

**VERIFICACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LOS
MODELOS DE DETERIORO PARA PAVIMENTOS
RÍGIDOS EN EL SALVADOR**

Presentado por

:

**INGRID ALTAGRACIA ALFARO LOPEZ
ROSA MARIA CASTANEDA ZALDAÑA
ALEX JAVIER PINEDA MANCIA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores

:

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

San Salvador, Septiembre 2011

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA

ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES

ING. CARLOS ANTONIO QUINTANILLA RODRÍGUEZ

DEDICATORIA

Agradezco a mi Dios, por permitirme alcanzar un paso más en mi vida, sin Él jamás hubiese sido posible.

Dedico a mis padres este triunfo, Abelardo y Albertina Alfaro por todo su amor y apoyo incondicional que por todos estos años se ha mantenido en su máxima expresión.

Gracias a todos mis seres queridos por siempre creer en mí, en especial a mis hermanos Ricardo y Boris, y a la personita más especial en mi vida Valeria.

Muchas gracias a mis compañeros, por mantener vivos objetivos dentro de nuestro trabajo: dedicación y calidad.

A mis amigos que siempre participaron con su colaboración en este trabajo, Jacqueline, Dionisio y Arturo, muchísimas gracias.

En especial agradezco con mucho cariño a Ing. Edwin Escobar por toda su ayuda, apoyo y colaboración a este trabajo.

A mis asesores por compartir todos sus conocimientos, observaciones y puntos de vista para nuestra mejora.

Ingrid Astagracia Alfaro López

DEDICATORIA

Dedico este triunfo alcanzado a Dios Todopoderoso por que sin El no hubiese podido culminar con éxito mi carrera, por darme la fortaleza, sabiduría, para seguir adelante, por su eterna misericordia y amor que me muestra cada día.

“El principio de la sabiduría es el temor de Jehová” Prov. 1,7.

A MIS PADRES: Ana Miriam Zaldaña de Castaneda y Lucas Raúl Antonio Castaneda por creer en mí, por apoyarme, por su amor incondicional y darme ánimos siempre de no desmayar y seguir adelante, a los cuales amo mucho.

A MI NOVIO: Roberto José Rodríguez Rodríguez, por brindarme su apoyo ayuda y su especial participación para lograr este triunfo obtenido.

A MIS COMPANEROS: Por aceptar llevar adelante este reto y mucha entrega para concluirlo con éxito, por brindarme su amistad y confiar en mí.

A MIS AMIGOS: Porque siempre estuvieron en la disposición de ayudarme para salir adelante y obtener este triunfo.

A MIS ASESORES: Por brindarnos su tiempo, colaboración, por ser una guía y brindarnos sus conocimientos para alcanzar los objetivos trazados y desarrollar este trabajo de tesis con éxito.

ROSA MARIA CASTANEDA ZALDANA

DEDICATORIA

A DIOS TODOPODEROSO: Por darme la sabiduría y perseverancia para seguir adelante en aquellos momentos difíciles, y permitirme haber culminado de la mejor manera mis estudios universitarios.

A MIS PADRES: Joel Pineda Solís y Sonia Elizabeth Mancía por apoyarme tanto moral como económicamente para poder desarrollar mis estudios y por fomentarme buenos principios.

A MIS HERMANOS: Por estar con migo en todo momento y por darme consejos que me han ayudado a tener mayor fortaleza.

A MIS FAMILIARES Y AMIGOS(AS): Por estar pendientes de mí en todo momento y darme todos los ánimos para seguir adelante.

A MIS COMPANERAS: Por afrontar todas las cosas de este trabajo de una manera perseverante y tener esos ánimos de salir adelante para finalizar nuestro Trabajo de Graduación.

A MIS ASESORES: Por tener la paciencia de Guiarnos en el camino correcto en el desarrollo de este trabajo, así como la cantidad de conocimientos brindados.

ALEX JAVIER PINEDA MANCÍA

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES A NUESTROS AMIGOS
COLABORADORES EN TRABAJO DE CAMPO

- ✓ **Ing. Edwin Escobar**
- ✓ **Ing. Roberto Rodríguez**
- ✓ **Ing. Stanley Grijalva**
- ✓ **Ing. Breyen Ríos**
- ✓ **Dionisio Ramírez**
- ✓ **Jacqueline Rivera**
- ✓ **Arturo Chinchilla**
- ✓ **Cesar Castaneda**
- ✓ **Adan Rivera**
- ✓ **Víctor Serrano**

EN ESPECIAL AGRADECIMIENTOS

- Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto (ISCYC)
- Arq. Roberto Góchez (Presidente de FONAVIPO)
- Unidad de Investigación y Desarrollo Vial (MOP)
 - Ing. Daniel Hernández
 - Ing. Edwin Alvarenga
- Unidad de Planificación Vial
 - Ing. Dionisio Ramírez
 - Ing. Gilberto Lima
 - Ing. Luis Pineda
- Fondo de Conservación Vial
 - Ing. Medardo Calderón
 - Ing. Walter Vásquez
- Vice Ministerio de Transporte
 - Ing. Roxana Franco
- Policía Nacional Civil
 - Jefa de Seguridad Vial: Guadalupe Quintana
- Ing. Ramón Fritz Alvarado Glower
- Ing. Dilber Sánchez
- Arq. Melitina García

Asesores Internacionales

- Dr. Ing. Marcelo Gastón Busto (ARGENTINA)
- Ing. Luis Guillermo Loria Salazar (COSTA RICA)
- Ing. Mauricio Salgado T. (CHILE)

Secretaria de Escuela de Ingeniería Civil (Roxanita)

INDICE

INDICE.....	x
INDICE DE FIGURAS.....	xiv
INDICE DE TABLAS	xvi
INTRODUCCIÓN... ..	xix
CAPITULO I: GENERALIDADES.....	2
ANTECEDENTES... ..	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
OBJETIVOS.....	5
OBJETIVO GENERAL:	5
OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	5
ALCANCES.....	6
LIMITACIONES.....	7
JUSTIFICACIÓN.....	8
CAPITULO II.....	9
CAPITULO II : GENERALIDADES DE LOS PAVIMENTOS.....	10
2.1. DEFINICIÓN ACTUAL DE PAVIMENTO	10
2.2 ELEMENTOS QUE CONFORMAN UNA ESTRUCTURA EN UN PAVIMENTO.....	12
2.2.1 Suelo Soportante o Subrasante.....	12
2.2.2 Sub-base.....	13

2.2.3 Base.....	13
2.2.4 Capa de Rodamiento.....	15
2.3 TIPOS DE PAVIMENTOS.....	16
2.3.1 Pavimentos Rígidos.....	19
a) Subrasante.....	20
b) Subbase.....	21
2.4 COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS.....	25
2.4.1 ETAPA DE CONSTRUCCIÓN.....	25
2.4.2 ETAPA DE DETERIORO LENTO Y POCO VISIBLE.....	25
2.4.3 ETAPA DE DETERIORO ACELERADO Y DE QUIEBRE.....	26
2.4.4 ETAPA DE DESCOMPOSICIÓN TOTAL.....	27
2.5 CONCEPTO DE DETERIORO.....	28
2.6 TIPOLOGIA DE DAÑOS.....	29
CAPITULO III.....	39
CAPITULO III: MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	40
3.1 CONCEPTO DE MODELO DE COMPORTAMIENTO O DETERIORO.....	40
3.1.1. APLICABILIDAD DE LOS MODELOS DE DETERIORO.....	42
3.2 MODELOS DE DETERIOROS DE HDM-4.....	43
PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO.....	46
3.2.1. GENERALIDADES DE HDM-4.....	54
3.2.2. ESCALONAMIENTO.....	56
3.2.3. DESPOSTILLAMIENTO DE JUNTAS TRANSVERSALES (JPCP).....	61
3.2.3. AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL.....	63
3.2.5 IRI (ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL).....	76
3.3 MODELOS DE DETERIORO DE LAS GUÍA DE DISEÑO EMPÍRICA MECANICISTA.....	78
3.3.1 GENERALIDADES DE LA GUÍA DE DISEÑO EMPÍRICA MECANICISTA DE AASHTO ..	78
3.3.2 MODELO DE AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL.....	87
3.3.3 MODELO DE ESCALONAMIENTO.....	89

3.3.4 MODELO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI).....	91
CAPITULO IV.....	94
CAPITULO IV: RECOLECCIÓN DE DATOS.....	95
4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRAMO DE PRUEBA.....	95
4.2. LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS.	98
4.2.1 Metodología del levantamiento de deterioros.	98
4.2.2 Resultados del levantamiento de deterioros.....	115
4.3. TRABAJO DE CAMPO CON PERFILÓMETRO LÁSER.....	136
4.3.1 Metodología utilizada para realizar los trabajos.....	136
4.3.3 Resultados Obtenido para Índice de Rugosidad Internacional	139
.....	139
Resultados Obtenido para el escalonamiento.	143
4.4. TRABAJO DE CAMPO CON FWD (FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER)	149
4.4.1 Metodología utilizada para realizar los trabajos.....	149
i. Resultados Obtenidos con el Falling Weight Deflectometer.	153
4.5. CONTEO VEHICULAR	157
4.5.1 Metodología utilizada para medir el tránsito diario.....	157
4.5.2 Resultados Obtenidos del conteo vehicular y cálculo de ESAL`s para año 2011.....	159
Valores históricos de TPDA por carril	165
CAPITULO V.....	168
CAPITULO V: ANALISIS DE RESULTADOS	169
5.1. JUSTIFICACIÓN DE LOS DATOS UTILIZADOS EN LOS MODELOS DE DETERIORO.....	169
5.2 RESUMEN DE DATOS REQUERIDOS POR CADA UNO DE LOS MODELOS DE COMPORTAMIENTO PARA EL HDM-4 Y LA GUIA DE DISEÑO EMPRICA MECANICISTA.	191
5.2.1 RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS MODELOS DE DETERIORO DEL HDM-4.....	196
5.2.1.1 ESCALONAMIENTO	197

5.2.1.2 AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL	199
5.2.1.3 DESPOSTILLAMIENTO.....	205
5.2.1.4 INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)	206
5.2.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS MODELOS DE HDM-4	208
5.2.2.1 Cálculo del Daño por Fatiga por metodología PCA para carril derecho sentido Santo Tomás Olocuilta	209
5.2.3 RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS MODELOS DE DETERIORO DE LA GUÍA DE DISEÑO EMPIRICA MECANICISTA.	216
5.2.3.1 ESCALONAMIENTO.....	217
5.2.3.2 AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL	219
5.2.3.3 INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI).....	220
5.2.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS MODELOS DE LA GUÍA DE DISEÑO EMPIRICA MECANICISTA	221
CAPITULO VI.....	225
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	226
CONCLUSIONES	226
RECOMENDACIONES.....	229
BIBLIOGRAFÍA.....	230
ANEXOS.....	233

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Sección Transversal de una vía.....	11
Figura 2.2.a Calle en Jayaque, departamento de La Libertad.....	17
Figura 2.2.b Calle de concepción de Ataco, en el departamento de Ahuachapán.....	17
Figura 2.2.c Autopista a Comalapa, San Salvador.....	18
Figura 2.2.d Calle en Chapeltique, San Miguel.....	18
Figura 2.2.e Carretera al Litoral, La Libertad.....	19
Figura 2.3.1.2.A Sección Longitudinal de un JPCP.....	22
Figura 2.3.1.2.B Sección Longitudinal de un JRCP.....	22
Figura 2.3.1.2.C Sección Longitudinal de un CRCP.....	23
Figura 2.3.1.2.D Sección Longitudinal de un pavimento típico de concreto preesforzado.....	23
Figura 2.3.1.2. Sección Longitudinal de un CCR.....	23
Figura 2.3.2 Estructura de un pavimento flexible.....	24
Figura 2.4 Etapas del deterioro del pavimento a través del tiempo.....	28
Figura 2.5 Agrietamiento Transversal vista en Planta.....	31
Figura 2.5.1 Agrietamiento Transversal.....	31
Figura 2.5.2 Despostillamiento en Juntas.....	32
Figura 2.6 Vista en Planta y Corte de Escalonamiento en juntas.....	33
Figura 2.6.1.A Desconchamiento, mapa de grietas y craqueado de severidad baja.....	35
Figura 2.6.1.B Desconchamiento, mapa de grietas y craqueado de severidad media.....	35
Figura 2.6.1.C Desconchamiento, mapa de grietas y craqueado de severidad alta.....	35
Figura 3.1 Esquema de despostillamiento de juntas (JPCP).....	61
Figura 3.2 Esquema de agrietamiento transversal de losas de concreto hidráulico JPCP.....	63
Figura 4.1 Inicio de Tramo en análisis.....	97
Figura 4.2 Fin de tramo en análisis	97
Figura 4.3 Sentido y dirección del levantamiento de deterioros.....	100
Figura 4.4 Hoja de trabajo de campo para levantamiento de deterioros.....	111
Figura 4.5 Medición de escalonamiento en campo.....	114
Figura 4.6 Despostillamiento visto en levantamiento de deterioros	114
Figura 4.7 Perfilómetro láser utilizado para la medición del Índice de Rugosidad Internacional y escalonamiento.....	137

Figura 4.8 Preparación de Perfilómetro Láser utilizado para la medición del Índice de Rugosidad Internacional y escalonamiento.....	138
Figura 4.9 Falling Weight Deflectometer utilizado para realizar los trabajos en el tramo de análisis.....	150
Figura 4.10 Esquema ubicación de ensayos en el centro de la losa con FWD.....	151
Figura 4.11 Esquema ubicación de ensayos en rodera derecha de la losa con FWD.	152
Figura 5.1 Valores de IRI	186
Figura 5.2 Modelo escalonamiento HDM-4.....	197
Figura 5.3 Continuación Modelo escalonamiento HDM-4.....	198
Figura 5.4 Modelo de Agrietamiento Transversal HDM-4	199
Figura 5.5 Continuación Modelo de Agrietamiento Transversal HDM-4.....	200
Figura 5.6 Continuación Modelo de Agrietamiento Transversal HDM-4.....	201
Figura 5.7 Continuación Modelo de Agrietamiento Transversal HDM-4.....	202
Figura 5.8 Continuación Modelo de Agrietamiento Transversal HDM-4.....	203
Figura 5.9 Continuación Modelo de Agrietamiento Transversal HDM-4.....	204
Figura 5.10 Continuación Modelo de Agrietamiento Transversal HDM-4.....	205
Figura 5.11 Modelo de despostillamiento de HDM-4.....	205
Figura 5.12 Modelo de Índice de Rugosidad Internacional de HDM-4.....	206
Figura 5.13 Modelo Escalonamiento Guía Empírica Mecanicista.....	217
Figura 5.14 Continuación Modelo Escalonamiento Guía Empírica Mecanicista.....	218
Figura 5.15 Modelo Agrietamiento Transversal Guía Empírica Mecanicista.....	219
Figura 5.16 Modelo IRI Guía Empírica Mecanicista.....	220
Figura 5.17 Continuación Modelo IRI Guía Empírica Mecanicista.....	221

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Defectos superficiales.....	36
Tabla 2.2 Agrietamientos.....	37
Tabla 2.3 Deterioro de juntas.....	38
Tabla 3.1 Modelos de deterioro en HDM-4.....	45
Tabla 3.2 Valores típicos de coeficiente térmico del concreto.....	51
Tabla 3.3 Cálculo de deterioros según su ubicación.....	86
Tabla 4.1 Características del tramo en estudio.....	97
Tabla 4.2 Codificación de deterioros.....	101
Tabla 4.3 Clasificación de deterioros.....	102
Tabla 4.4 Severidad de los deterioros.....	103
Tabla 4.5 Deterioro de pavimentos rígidos y su simbología.....	109
Tabla 4.6 Trabajo de Campo.....	113
Tabla 4.7 Hoja N°1 sentido Santo Tomás Olocuilta, carril derecho.....	117
Tabla 4.8 Hoja N°2 sentido Santo Tomás Olocuilta, carril derecho.....	118
Tabla 4.9 Hoja N°3 sentido Santo Tomás Olocuilta, carril derecho.....	119
Tabla 4.10 Hoja N°4 sentido Santo Tomás Olocuilta, carril derecho.....	120
Tabla 4.11 Hoja N°1 sentido Santo Tomás Olocuilta, carril izquierdo.....	122
Tabla 4.12 Hoja N°2 sentido Santo Tomás Olocuilta, carril izquierdo.....	123
Tabla 4.13 Hoja N°3 sentido Santo Tomás Olocuilta, carril izquierdo.....	124
Tabla 4.14 Hoja N°4 sentido Santo Tomás Olocuilta, carril izquierdo.....	125
Tabla 4.15 Hoja N°1 sentido Olocuilta Santo Tomás, carril derecho.....	127
Tabla 4.16 Hoja N°2 sentido Olocuilta Santo Tomás, carril derecho.....	128
Tabla 4.17 Hoja N°3 sentido Olocuilta Santo Tomás, carril derecho.....	129
Tabla 4.18 Hoja N°4 sentido Olocuilta Santo Tomás, carril derecho.....	130
Tabla 4.19 Hoja N°1 sentido Olocuilta Santo Tomás, carril izquierdo.....	132
Tabla 4.20 Hoja N°2 sentido Olocuilta Santo Tomás, carril izquierdo.....	133
Tabla 4.21 Hoja N°3 sentido Olocuilta Santo Tomás, carril izquierdo.....	134
Tabla 4.22 Hoja N°4 sentido Olocuilta Santo Tomás, carril izquierdo.....	135
Tabla 4.23 Registro de IRI lateral derecho.....	139
Tabla 4.24 Continuación de Registro de IRI lateral derecho.....	140

Tabla 4.25 Registro de IRI lateral Izquierdo.....	141
Tabla 4.26 Continuación Registro de IRI lateral Izquierdo.....	142
Tabla 4.27 Resumen de IRI obtenido en mediciones.....	142
Tabla 4.28 Registro de escalonamiento lateral derecho carril externo.....	143
Tabla 4.29 Continuación Registro de escalonamiento lateral derecho carril externo.....	144
Tabla 4.30 Registro de escalonamiento lateral derecho carril interno.....	145
Tabla 4.31 Continuación Registro de escalonamiento lateral derecho carril interno.....	146
Tabla 4.32 Registro escalonamiento lateral izquierdo carril interno.....	147
Tabla 4.33 Continuación Registro escalonamiento lateral izquierdo carril interno.....	148
Tabla 4.34 Resumen de escalonamiento obtenido en mediciones de campo.....	148
Tabla 4.35 Registro deflexiones lateral derecho carril externo.....	153
Tabla 4.36 Registro deflexiones lateral derecho carril interno.....	153
Tabla 4.37 Registro deflexiones lateral izquierdo carril externo.....	154
Tabla 4.38 Registro deflexiones lateral izquierdo carril interno.....	154
Tabla 4.39 Resultados de eficiencia de transferencia de carga lateral derecho carril externo....	155
Tabla 4.40 Resultados de eficiencia de transferencia de carga lateral derecho carril interno....	155
Tabla 4.41 Resultados de eficiencia de transferencia de carga lateral izquierdo carril externo...	156
Tabla 4.42 Resultados de eficiencia de transferencia de carga lateral izquierdo carril interno...	156
Tabla 4.43 Conteo vehicular carril derecho, sentido Santo Tomás Olocuilta.....	159
Tabla 4.44 Conteo vehicular carril izquierdo, sentido Santo Tomás Olocuilta.....	160
Tabla 4.45 Conteo vehicular carril derecho, sentido Olocuilta Santo Tomás.....	161
Tabla 4.46 Conteo vehicular carril izquierdo, sentido Olocuilta Santo Tomás.....	162
Tabla 4.47 Conteo vehicular sentido Santo Tomás Olocuilta.....	163
Tabla 4.48 Conteo vehicular sentido Olocuilta Santo Tomás	164
Tabla 4.49 TPDA Históricos carril derecho sentido Santo Tomás Olocuilta.....	165
Tabla 4.50 TPDA Históricos carril izquierdo sentido Santo Tomás Olocuilta.....	165
Tabla 4.51 TPDA Históricos carril derecho sentido Olocuilta Santo Tomás.....	166
Tabla 4.52 TPDA Históricos carril izquierdo sentido Olocuilta Santo Tomás.....	166
Tabla 4.53 Resumen general de cálculo de ESAL´S para cada carril.....	167
Tabla 5.1 Valores típicos de coeficiente térmico del concreto.....	170
Tabla 5.2 Datos de temperatura.....	171
Tabla 5.3 Correlación entre coeficiente de contracción y resistencia a la tracción indirecta.....	172

Tabla 5.4 Módulo de Ruptura.....	173
Tabla 5.5 Módulo de Elasticidad.....	174
Tabla 5.6 Valores de transferencia de carga para el tramo en análisis.....	176
Tabla 5.7 Precipitación media anual.....	178
Tabla 5.8 Carril anchado.....	178
Tabla 5.9 Zonas climáticas.....	179
Tabla 5.10 Distribución de temperatura en la cima y en el fondo de la losa de concreto.....	180
Tabla 5.11 Condición de construcción del pavimento.....	181
Tabla 5.12 Gradiente de temperatura.....	183
Tabla 5.13 Precipitación mayor a 2.5 mm.....	188
Tabla 5.14 Datos para modelo de escalonamiento del HDM-4.....	191
Tabla 5.15 Datos para modelo de Agrietamiento Transversal del HDM-4.....	192
Tabla 5.16 Datos para modelo de Despostillamiento del HDM-4	193
Tabla 5.17 Datos para modelo de escalonamiento y grietas transversales de la Guía Empírica Mecanicista.....	194
Tabla 5.18 Datos para modelos de IRI de la Guía Empírica Mecanicista.....	195
Tabla 5.19 Deterioros observados en Autopista a Comalapa año 2011.....	196
Tabla 5.20 Comparación entre datos predichos por los modelos y los obtenidos en campo....	207
Tabla 5.21 Pesos máximos permitidos por tipo de vehículo.....	210
Tabla 5.22 Pesaje en estación Zacatecoluca para un día.....	211
Tabla 5.23 Datos sobre distribución de cargas del tránsito.....	213
Tabla 5.24 Cálculo del daño por fatiga.....	214
Tabla 5.25 Daño por fatiga acumulado durante la vida del pavimento.....	215
Tabla 5.26 Resumen de agrietamiento transversal.....	215
Tabla 5.27 Comparación de valores predichos por el modelo y los obtenidos en campo.....	222
Tabla 5.28 Comparación de valores predichos por el modelo y los obtenidos en campo.....	224

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación se basará específicamente en modelos de comportamiento (o deterioro), estos modelos por lo general corresponden a expresiones matemáticas que permiten predecir la posible evolución del estado del pavimento en el tiempo, en base al conocimiento de las condiciones del mismo al momento de su puesta en servicio y al momento de la realización del análisis; además permiten pronosticar los efectos, a corto y largo plazo, del mantenimiento efectuado sobre ellos, con el objetivo de realizar estimaciones razonables tanto de las oportunidades en que sea necesario llevar a cabo alguna conservación, como del nivel de deterioro resultante luego de la misma y su progresión en el tiempo.

El Banco Mundial y AASHTO han desarrollado sistemas computacionales, tales como el HDM-4 y la Guía Empírica Mecanicista respectivamente, para el apoyo a los profesionales que realizan gestión de pavimentos. Este sistema incorpora modelos de comportamiento de pavimentos que deben estar calibrados a las condiciones específicas del país o región donde serán utilizados. La importancia del proceso de calibración de los modelos de comportamiento es en el impacto económico, ya que debido a la influencia directa del inicio y progresión de los deterioros del pavimento, se hace necesaria una adecuada adaptación de ellos, de modo que se pueda efectuar una evaluación económica certera de los proyectos viales que se analicen.

La vida útil de los pavimentos de concreto hidráulico depende de muchos factores tales como: la calidad de los materiales de construcción, el tránsito previsto, el clima, procesos constructivos, mantenimiento periódico, entre otros. Cada uno de los factores mencionados tiene una gran importancia, es por eso que en la presente investigación se desarrollará uno de esos factores, el cual corresponde a verificar los resultados de los modelos de deterioro de Highway Development Management (HDM-4) y La Guía de Diseño Empírica-Mecanicista de AASHTO para pavimentos rígidos. El propósito de este trabajo es proponer recomendaciones para verificar los modelos de comportamiento y establecer los factores de calibración de los modelos de HDM-4 y la guía Empírica-Mecanicista más adecuados para los pavimentos de concreto hidráulico en El Salvador, según las características propias del Camino a evaluar.

Para desarrollar esta verificación se tendrán como base un tramo de prueba al cual se le aplicará las metodologías de los modelos de deterioro mencionados. Además de la verificación, se pretende comparar los resultados que estos modelos presentan y el comportamiento real del pavimento durante su vida útil y así poder definir si los modelos de deterioro analizados son aplicables a las condiciones de El Salvador para los pavimentos rígidos.

CAPITULO I

CAPITULO I GENERALIDADES

ANTECEDENTES

En El Salvador, se ha venido trabajando en el mantenimiento, reparación y construcción de pavimentos rígidos a través del Gobierno Central y en estos últimos tiempos, a través de las municipalidades; además con el apoyo de la Dirección General de Caminos, la entidad encargada del mantenimiento, construcción y reconstrucción de la red vial, se inició la construcción de la red de caminos de penetración que servirían para unir las zonas poblacionales, dándosele prioridad a los caminos de alta intensidad de tráfico.

En nuestro país, se ha adoptado un Sistema de Gestión Vial creado específicamente para nuestras condiciones, este es el sistema de Gestión de la Infraestructura Vial en El Salvador (SIGESVIES), sistema que ha sido implementado por el Ministerio de Obras Públicas con el soporte del consorcio consultora técnica TNM, considerando que un Sistema de Gestión de Pavimentos es el conjunto de operaciones que tienen por objetivo conservar por un periodo de tiempo las condiciones de seguridad, comodidad y capacidad estructural adecuadas para la circulación, soportando las condiciones climáticas y de entorno de la zona en que se ubica la vía en cuestión. En el marco de lo anteriormente descrito, y con fin de predecir el deterioro que puedan sufrir los pavimentos a lo largo de su vida útil; se utilizan distintos modelos de comportamiento (o deterioro). Estos modelos por lo general corresponden a expresiones matemáticas que permiten predecir la posible evolución del estado del pavimento en el tiempo.

Normalmente, las instituciones encargadas de la administración de carreteras utilizan dichos modelos de comportamiento desarrollados por terceros, los cuales, de una u otra manera, reflejan las condiciones locales de la región o país en los que fueron desarrollados. Las principales funciones de los modelos de comportamiento o deterioro son el análisis de deterioros y los efectos de la conservación de carreteras.

Para lo cual nos podemos basar en los modelos de deterioro del programa Highway Development Management (HDM-4), proyecto desarrollado por el Banco Mundial, y la Guía de Diseño Empírica-Mecanicista de AASHTO para pavimentos rígidos.

La metodología del HDM-4 utiliza ecuaciones de predicción del estado de deterioro en pavimentos rígidos, y para obtener resultados más ajustados a las condiciones regionales o locales, dichos modelos deben ser adaptados con información de deterioro obtenida en el terreno.

La guía de Diseño Empírico-Mecanicista de AASHTO de Pavimentos rígidos, que combina el análisis mecanicista de los pavimentos con verificación empírica del comportamiento a través de la predicción de determinados tipos de deterioro, fue desarrollada en base a la gran cantidad de datos colectados en Estados Unidos durante el desarrollo del programa denominado "Long-Term Pavement Performance", más conocido por sus siglas LTPP. Estos datos permitieron ajustar los modelos empíricos de deterioro de pavimentos y conocer más profundamente el comportamiento estructural y funcional de estos últimos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en nuestro país y en diferentes países de Latinoamérica tales como Chile, Argentina, entre otros, se están aplicando metodologías para conocer el comportamiento de los pavimentos a lo largo de su vida para la cual han sido diseñados, siendo estas metodologías las del programa HDM-4 y la Guía Empírico-Mecanicista para pavimentos rígidos, las cuales dan diferentes resultados en diferentes condiciones de tránsito, clima, materiales, etcétera, en las que se encuentra la carretera. Dado que en muchos de los casos presentados en diferentes condiciones los resultados se vuelven incoherentes con el comportamiento que en realidad tienen los pavimentos de concreto hidráulico, se plantea la necesidad de conocer si estos modelos de deterioro son aplicables para las condiciones presentadas en nuestro país para los pavimentos rígidos y así tener una confiabilidad de utilizarlos para el diseño y gestión de pavimentos rígidos.

Para los proyectos de carreteras en El Salvador se están presentando planes de conservación a partir del programa HDM-4 para pavimentos rígidos, en los que los resultados no se sabe si serán confiables para poderlos aplicar a esa carretera, es por eso que esta investigación nos llevará a definir si en realidad los modelos de comportamiento del programa de HDM-4 y la Guía de Diseño Empírico-Mecanicista son aplicables para las condiciones de los pavimentos de concreto hidráulico en El Salvador.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

- Verificar si los modelos de deterioro HDM-4 y la Guía Empírico- Mecanicista de AASHTO, son aplicables para los pavimentos rígidos a las condiciones de El Salvador.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Comparar los modelos de deterioro en pavimentos rígidos del modelo del Banco Mundial HDM-4 y la Guía Empírico-Mecanicista de AASHTO para las condiciones de El Salvador.
- Establecer el grado de confiabilidad de los resultados de los modelos de comportamiento HDM-4 y la Guía Empírico-Mecanicista de AASHTO en pavimentos rígidos para las condiciones que se presentan en El Salvador.
- Aplicar las metodologías de los modelos de comportamiento HDM-4 y la Guía Empírico-Mecanicista de AASHTO a un tramo de Prueba.

ALCANCES

Se aplicarán los modelos de deterioro HDM-4 y la Guía Empírico-Mecanicista de AASHTO para pavimentos rígidos, para un tramo de prueba con altos volúmenes de tránsito, representativo para los parámetros de las condiciones que se presentan las carreteras de concreto en El Salvador; los resultados de los cuales se compararán con datos de levantamiento de deterioros que se realizará verificando así si estos concuerdan o no.

Dar recomendaciones en cuanto a la aplicabilidad o no, de estos modelos para los pavimentos rígidos en El Salvador.

LIMITACIONES

Se considera que el tramo de prueba a ser evaluado tiene las características adecuadas para ser estudiado, quedando fuera de nuestro alcance el conocer si durante el proceso constructivo se dieron vicios ocultos que puedan ocasionar que el comportamiento de la carretera no sea el que se espera y tenga un proceso de evolución de deterioros fuera de su comportamiento normal, generando que el desarrollo de la verificación de la confiabilidad de los modelos de deterioro no será eficiente ni real.

Se gestionará al Ministerio de Obras Públicas (MOP) el Perfilómetro Láser para la medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y el FWD (Falling Weight Deflectometer) para la evaluación estructural, por lo que la medición de estos parámetros no depende directamente del grupo y de no ser factible se hará por correlación.

Existe en nuestro país una cantidad pobre de información, de la cual los modelos de comportamiento requieren para poder ser desarrollados, por lo que se tratará de adaptar lo más que se pueda estos datos a las condiciones que tenemos en nuestro tramo de prueba.

JUSTIFICACIÓN

La aplicabilidad de los modelos de deterioros deben ser verificadas debido a que puede ser de gran utilidad para posteriores diseños y planes de conservación, y dado que en nuestro país no hay un pleno conocimiento de que los modelos de deterioro sean eficientes en cuanto a la predicción del comportamiento de un pavimento rígido durante su vida útil, se ve la necesidad de realizar un estudio que comprenda la comprobación de este hecho, tomando como base las condiciones bajo las cuales trabajan los pavimentos de concreto hidráulico en El Salvador.

Por lo que se pretende facilitar y uniformar criterios y procedimientos para la identificación y la recolección de información relacionada con los deterioros de pavimentos de concreto con juntas simples (JPCP), utilizándolos para correr las ecuaciones matemáticas de los modelos de comportamiento, llegando a conocer y comparar los deterioros que los modelos arrojan con los obtenidos en el levantamiento de deterioros en el tramo en estudio y presentar los resultados en este Trabajo de Graduación.

Dados los resultados de este trabajo de Graduación mucho de los profesionales dedicados al área de gestión de pavimentos pueden hacer de su uso esta información que se presentará y poder tener un mejor criterio para evaluar la evolución de los deterioros a partir de los modelos de comportamiento que actualmente se están utilizando en nuestro país.

CAPITULO II

CAPITULO II

GENERALIDADES DE LOS PAVIMENTOS.

2.1. DEFINICIÓN ACTUAL DE PAVIMENTO.

Pavimento es el conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aun en condiciones húmedas. Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas.

Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías, además de que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza, y por consecuencia resultan los más económicos.

La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, ya que cuando determinamos el espesor de una capa, el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior.

La resistencia de las diferentes capas no solo dependerá del material que la constituye, también resulta de gran influencia el procedimiento constructivo; siendo dos factores importantes la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas y es cuando se producen deformaciones permanentes.

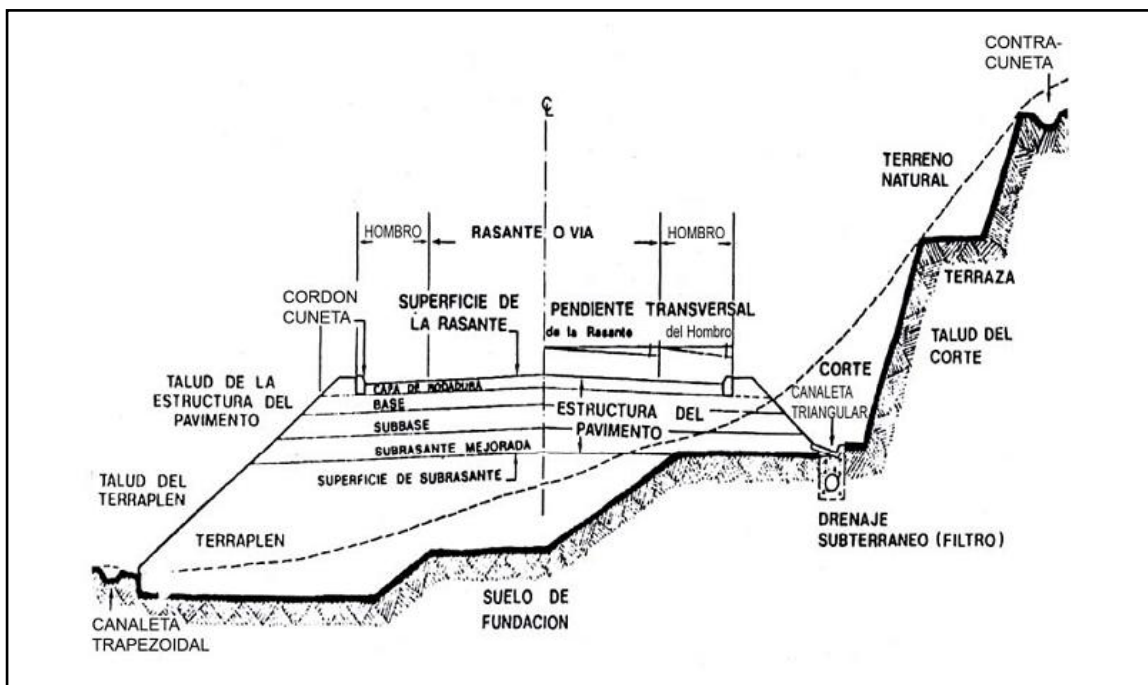


Figura 2.1. Sección Transversal de una Vía.

Fuente: Ministerio de Obras Públicas (MOP)

2.2 ELEMENTOS QUE CONFORMAN UNA ESTRUCTURA EN UN PAVIMENTO.

La estructura de un pavimento se halla formada por diferentes capas las cuales son: la subrasante, 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.

2.2.1 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 de buena calidad.

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 esta superficie menor será el costo de las capas superiores.
2. El movimiento diferencial vertical debe ser mínimo, de esta forma las ondulaciones en la superficie serán menores y el rodamiento vehicular será más suave.

2.2.2 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 esta 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.

2.2.3 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:

- ❖ **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 con agua, en donde una alta fricción interna se consigue con agregados bien graduados, de forma irregular, y con una pequeña cantidad de finos limo – arenosos.
- ❖ **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.

2.2.4 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, aunque esa no sea su función desde el punto de vista estructural.

- ❖ 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.

2.3 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 se clasifican en:

- Pavimentos de Tierra. (Figura 2.2.a)
- Pavimentos de Piedra. (Figura 2.2.b)
- Pavimentos de Adoquines. (Figura 2.2.c)
- Pavimentos de Concreto Hidráulico. (Figura 2.2.d)
- Pavimentos de Concreto Asfáltico. (Figura 2.2.e)



Figura 2.2.a.- Calle en Jayaque, Departamento de La Libertad.

Pavimentos de Tierra.



Figura 2.2.b.- Calle de Concepción de Ataco, en el Departamento de Ahuachapán.

Pavimento de Piedra.



Figura 2.2c.- Calle en Chapeltique, San Miguel.

Pavimento de Adoquines.



Figura 2.2 d. Autopista de Comalapa, San Salvador.

Pavimento de concreto Hidráulico.



Figura.2.2.e. Carretera al Litoral, La Libertad.

Pavimentos de concreto asfáltico.

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

2.3.1 Pavimentos Rígidos.

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 estos 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.

2.3.1.1 Elementos que integran un Pavimento Rígido.

a) Subrasante.

Es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño. El espesor de pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que ésta debe cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, por consiguiente, el diseño de un pavimento es esencialmente el ajuste de la carga de diseño por rueda a la capacidad de la subrasante.

b) Subbase.

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

Se utiliza además como capa de drenaje y contralor de ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares.

Al haber capilaridad en época de heladas, se produce un hinchamiento del agua, causado por el congelamiento, lo que produce fallas en el pavimento, si éste no dispone de una subrasante o subbase adecuada. Esta capa de material se coloca entre la subrasante y la capa de base, sirviendo como material de transición, en los pavimentos flexibles.

c) Superficie de rodadura.

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la subrasante, dado que no usan capa de base. En general, se puede indicar que el concreto hidráulico distribuye mejor las cargas hacia la estructura de pavimento.

2.3.1.2 Tipos de Pavimentos Rígidos:

a) Pavimento de Concreto hidráulico simple con dovelas o barras de transferencias (JPCP).

No contiene armadura en la losa y el espaciamiento entre juntas es pequeño (entre 2.50 a 4.50 metros). Las juntas pueden o no tener dispositivos de transferencia de cargas (dovelas). Como se muestra en la figura 2.3.1.2 A.

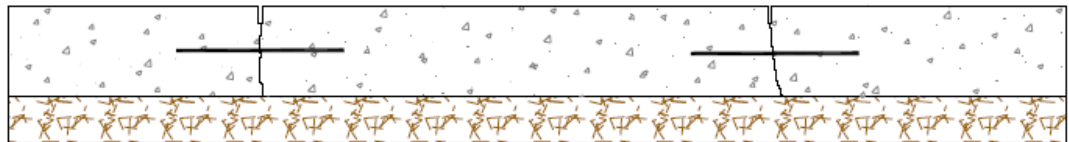


FIG.2.3.1.2 A. Sección Longitudinal de un JPCP.

Cabe mencionar que este tipo de pavimentos son los utilizados en el país,

b) Pavimento de Concreto hidráulico con refuerzo discontinuo distribuido sin función estructural (JRCP).

Tienen espaciamientos mayores entre juntas (entre 6.10 y 36.60 metros) y llevan armadura distribuida en la losa a efecto de controlar y mantener cerradas las fisuras de contracción. Como se muestra en la figura 2.3.1.2 B.

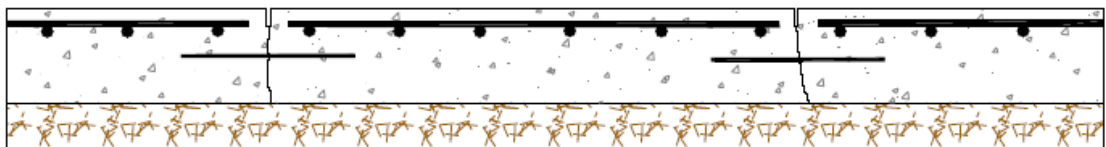


FIG.2.3.1.2 B. Sección Longitudinal de un JRCP.

c) Pavimento de Concreto hidráulico reforzado continuo sin función estructural (CRCP).

Tiene armadura continua longitudinal y no tiene juntas transversales, excepto juntas de construcción. La armadura transversal es opcional en este caso. Estos pavimentos tienen más armadura que las juntas armadas y el objetivo de esta armadura es mantener un espaciamiento adecuado entre fisuras y que éstas permanezcan cerradas. Como se muestra en la figura 2.3.1.2 C.

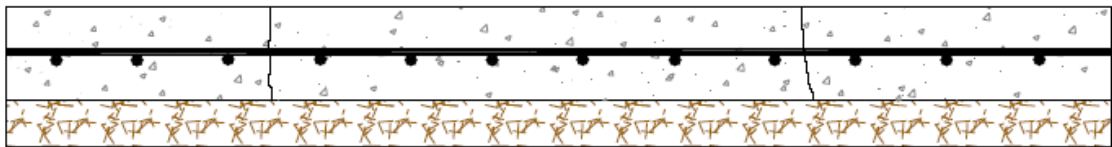


Figura 2.3.1.2 C. Sección Longitudinal de un CRCP.

d) Pavimentos de concreto pre-esforzados.

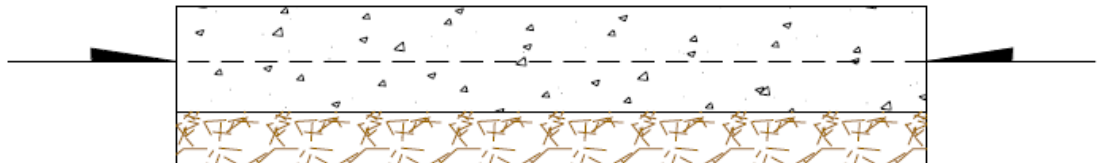


Figura 2.3.1.2.D Sección Longitudinal de un Pavimento típico de concreto Preesforzado.

e) Pavimentos de concreto hidráulico Compactado con Rodillo (CCR).



Figura 2.3.1.2 E. Sección Longitudinal de un CCR.

f) Pavimentos Compactados con Pavimentadora.

2.3.2 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.

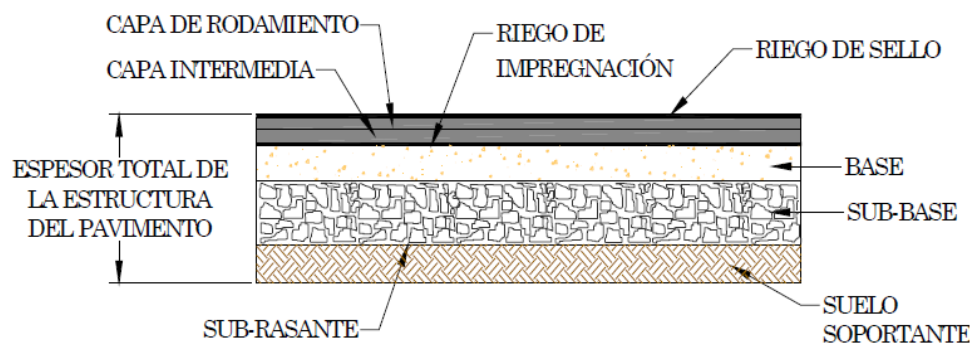


FIG.2.3.2 Estructura de un pavimento flexible.

2.4 COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS.

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:

2.4.1 ETAPA DE CONSTRUCCIÓN

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.

2.4.2 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.

2.4.3 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.

2.4.4 ETAPA DE DESCOMPOSICIÓN 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. Como se resume en la siguiente figura 2.4.

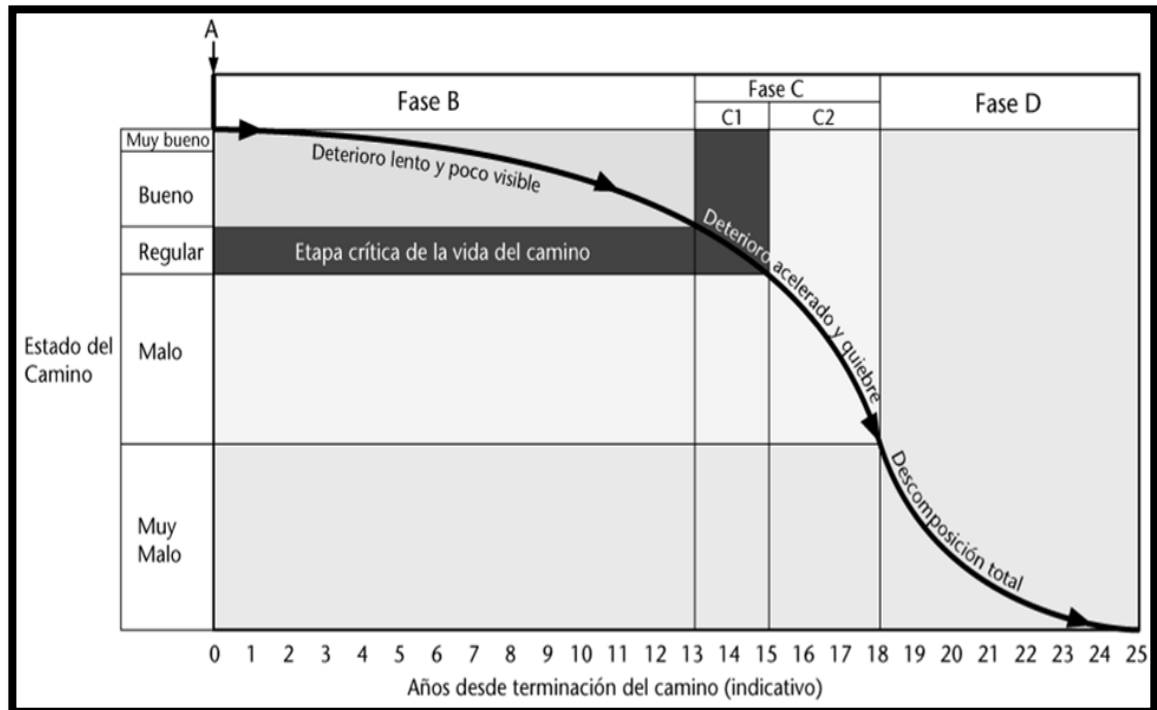


Figura 2.4.-Etapas del deterioro del pavimento a través del tiempo.

Fuente: "CAMINOS un nuevo enfoque para la gestión y conservación de redes viales" CEPAL 1994.

2.5 CONCEPTO DE DETERIORO.

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

Cuando se producen daños que se manifiestan superficialmente en forma de pérdida de geometría, deterioro en el rodado u otros, deben analizarse cuidadosamente las causas de falla que los originan. En términos generales se pueden especificar cinco tipos:

- ❖ Diseño insuficiente de la superestructura.
- ❖ Inestabilidad de las obras de tierra.
- ❖ Deficiencias constructivas.
- ❖ Solicitaciones no previstas.
- ❖ Mantenimiento inadecuado.
- ❖ Para definir en forma clara y precisa los tipos de deterioro, sus causas y acciones de corrección se entregan a continuación una serie de tablas que especifican cada uno de los deterioros por tipo de pavimentos y características generales.

2.6 TIPOLOGIA DE DAÑOS.

GRIETAS TRANSVERSALES

Grietas predominantemente perpendiculares al eje de la calzada. También pueden extenderse desde una junta transversal hasta el borde del pavimento, siempre que la intersección con la junta esté a una distancia del borde mayor que la mitad del ancho de la losa ($T > a/2$ en la Figura 2.6.1) y la intersección con el borde se encuentre a una distancia inferior que la mitad del ancho de la losa ($L < a/2$) en la Figura 2.6.1. Agrietamiento transversal vista en planta.

Causas Posibles:

- Retracción térmica que origina alabeos.
- Losas de longitud excesiva.
- Junta de contracción aserrada o formada tardíamente.
- Espesor de la losa insuficiente para soportar las solicitaciones.

Niveles de Severidad:

Baja: ancho < 3 mm, sin saltaduras y escalonamiento imperceptible

Media: 3 ancho grieta 6 mm ó

Con saltaduras de ancho < 50 mm ó

Escalonamiento < 6 mm.

Alta: ancho 6 mm ó

Saltadura de ancho 50 mm ó Escalonamiento mayor a 6mm

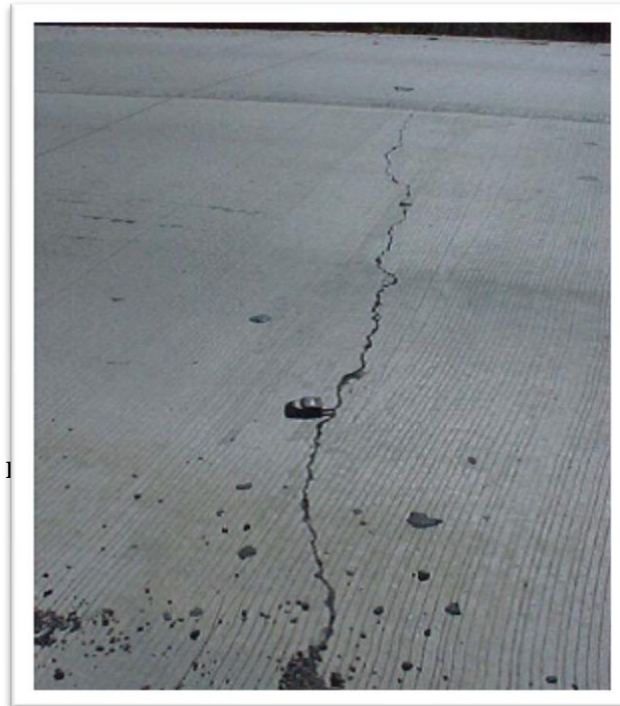
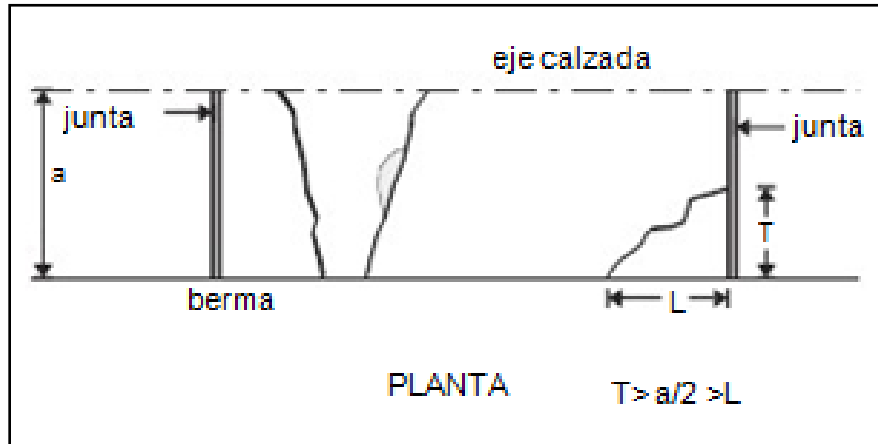


Figura 2.5.1 Agrietamiento Transversal.

DESPOSTILLAMIENTO EN JUNTAS.

Es un proceso de daño gradual o rotura en los bordes de una junta o fisura. Las causas pueden ser la infiltración de materiales incompresibles dentro de las juntas o fisuras, falta de alineación y corrosión de pasadores o juntas mal diseñadas. Es la desfragmentación localizada de los bordes de las juntas o fisuras, que aparecen por un concreto debilitado por falta de compactación, por el retiro de las formaletas antes de tiempo en las juntas, la pérdida de transferencia de carga debido al excesivo bombeo o al golpeteo de las barras de transferencia de cargas, también pueden producir el deterioro de las juntas. Ver imagen 2.5.2. Despostillamiento de juntas.



Figura 2.5.2. Despostillamiento en Juntas

ESCALONAMIENTO EN JUNTAS.

Desnivel entre dos superficies del pavimento, separadas por una junta transversal o grieta.

Posibles Causas:

- ✓ Erosión de la base en las inmediaciones de la junta o grieta.
- ✓ Deficiencia en el traspaso de cargas entre las losas o trozos de losas.
- ✓ Asentamiento diferencial de la subrasante.
- ✓ Drenaje insuficiente.

Niveles de Severidad:

Se pueden establecer niveles de severidad en función de la altura del desnivel, pero lo mejor es establecerlo en función del aumento de las irregularidades (IRI, Índice de Rugosidad Internacional) que este deterioro origina.

Para catalogar la severidad individual, considerar lo siguiente:

Baja: desnivel 5 mm

Media: 5 mm < desnivel 10 mm

Alta: desnivel > 10 mm

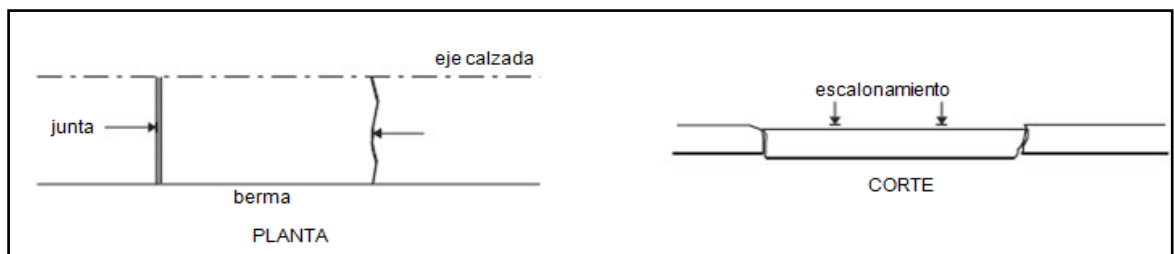


FIG.2.6 Vista en planta y Corte de Escalonamiento en juntas.

DESCONCHE DE JUNTAS TRANSVERSALES.

El mapa de grietas o craquelado (crazing) se refiere a una red de grietas superficiales, finas o capilares, que se extienden únicamente en la parte superior de la superficie del concreto. Las grietas tienden a interceptarse en ángulos de 120 grados.

Generalmente, este daño ocurre por exceso de manipulación en el terminado y puede producir el descamado, que es la rotura de la superficie de la losa a una profundidad aproximada de 6.0 mm a 13.0 mm. El descamado también puede ser causado por incorrecta construcción y por agregados de mala calidad.

Niveles de Severidad

- **Bajo:** El craquelado se presenta en la mayor parte del área de la losa; la superficie está en buena condición con solo un descamado menor presente. Como se muestra en la imagen 2.6.1- A.
- **Medio:** La losa está descamada, pero menos del 15% de la losa está afectada. Como se muestra en la imagen 2.6.1- B.
- **Alto:** La losa está descamada en más del 15% de su área.



Figura 2.6.1 – A Desconchamiento, mapa de grietas y craqueado de severidad baja.



Figura 2.6.1 –B Desconchamiento, mapa de grietas y craqueado de severidad media.



Figura 2.6.1- C Desconchamiento, mapa de grietas y craqueado de severidad alta.

TIPO	CAUSA PROBABLE
DESCASCAMIENTO. (Pérdida de material superficial en forma de escamas. En general no tiene efectos estructurales dañinos).	Agregados sucios. Exceso de agua en la mezcla.
DESGASTE SUPERFICIAL. (Pulimiento de la superficie con aparición de agregado grueso. En general no tiene efectos estructurales dañinos.)	Exceso de mortero en la mezcla del concreto. Rodado abrasivo.
FISURAMIENTO. (Agrietamiento poco severo con aparición de líneas finas interconectadas o familia de fisuras aproximadamente paralelas. En general no tiene efectos estructurales dañinos.)	Deficiencia de curado. Exceso de agregados finos.
EXCESIVA RUGOSIDAD.	Mala construcción Escalonamiento

TABLA 2.1 DEFECTOS SUPERFICIALES.

TIPO	CAUSA PROBABLE
AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL. (Grieta en dirección perpendicular al eje de la calle.)	Longitud excesiva de los tramos. Deficiencia de curado. Relación agua/cemento muy alta. Tensiones de alabeo.
AGRIETAMIENTO LONGITUDINAL. (grieta en dirección paralela al eje de la calzada ubicada en el interior de la losa.)	Asentamiento de a subrasante Ancho excesivo de la vía o no funcionamiento de la junta longitudinal. Tensiones de alabeo.
AGRIETAMIENTO DE ESQUINA. Grieta en la esquina de las losas formando figuras triangulares. Normalmente en la esquina del ángulo agudo interior en caso de juntas esviadas.	Erosión de las capas de apoyo del pavimento. Estructuración insuficiente. Tensiones excesivas durante la expansión del concreto en caso de juntas desviadas.
DESINTEGRACION (Grieta en todas las direcciones con desintegración del pavimento. Pérdida de adhesión entre mortero y agregado grueso.)	Reacciones químicas en la mezcla del concreto. Agregados de mala calidad, sucios o insuficientes.

TABLA 2.2. AGRIETAMIENTOS.

TIPO	CAUSA PROBABLE
<p>FALLA DE SELLADO. (El material de sellado no se ajusta a los movimientos de las losas, separándose de estas.)</p>	<p>Inadecuada forma y dimensiones de la caja de la junta. Juntas transversales muy separadas. Calidad deficiente del material de sellado. Saltadura de las juntas.</p>
<p>ESCALONAMIENTO DE LA JUNTA. (Desplazamiento vertical de losas adyacentes en la junta.)</p>	<p>Erosión de las capas de apoyo del pavimento. Juntas transversales muy separadas. Subrasantes heterogénea.</p>
<p>LEVANTAMIENTO DE JUNTA. (Levantamiento del pavimento acompañado de quebradura en la losa. Se presenta normalmente en una junta transversal.)</p>	<p>Dilatación térmica del concreto en pavimentos sin junta de dilatación o juntas transversales deficientes.</p>

TABLA 2.3 DETERIORO DE JUNTAS.

CAPITULO III

CAPITULO III: MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

3.1 CONCEPTO DE MODELO DE COMPORTAMIENTO O DETERIORO.

Todos los pavimentos comienzan a deteriorarse a partir del momento en que se finaliza su construcción, debido principalmente a factores que tienen que ver con las cargas producto del tráfico, las condiciones ambientales existentes (lluvias, inundaciones, etc.), y a efectos derivados de un inadecuado drenaje de la escorrentía superficial.

En el marco de la administración de pavimentos y al fin de predecir el deterioro que puedan sufrir dichos pavimentos a lo largo de su vida útil; se utilizan distintos tipos de modelos de comportamiento (o deterioro).

Estos modelos por lo general corresponden a expresiones matemáticas que permiten predecir la posible evolución del estado del pavimento en el tiempo, en base al conocimiento de las condiciones del mismo al momento de su puesta en servicio y al momento de la realización del análisis; además permiten pronosticar los efectos, a corto y largo plazo, del mantenimiento efectuada sobre ellos, con el objetivo de realizar estimaciones razonables tanto de las oportunidades en que sea necesario llevar a cabo alguna conservación, como del nivel de deterioro resultante luego de la misma y su progresión en el tiempo.

Los modelos de comportamiento deben predecir la condición del camino en el tiempo, además de permitir conocer los efectos de corto y largo plazo de las actividades de mantención y estimar el momento más adecuado para realizarlas.

Los modelos de comportamiento deben ser aplicables a la región de interés, en todo sentido, inclusive en lo referido a tránsito, medio ambiente, materiales y métodos de construcción. Por lo general, modelos que han sido desarrollados para una región con características específicas no son del todo extrapolables a otros pavimentos en otras regiones diferentes a la original.

Los modelos de deterioro pueden surgir a partir de desarrollos empíricos y/o mecanicistas. Los desarrollos empíricos tienen su origen en bases de datos reales conformadas a partir de pavimentos existentes, en dichas bases de datos se ha registrado gran cantidad de información referida a diversos aspectos entre los que se cuentan: información general de los pavimentos, datos de diseño (materiales, diseño estructural, diseño de juntas, etc.) características del drenaje y de los hombros, datos de tránsito, condiciones climáticas y de deterioros a lo largo de su vida útil. Luego de determinar las variables más relevantes en la formación de cada deterioro, se realiza con ellas un análisis estadístico que da origen al modelo que predice el comportamiento futuro del pavimento, en base a una ecuación que relaciona las variables seleccionadas, en ciertos casos el modelo generado puede tener la desventaja de no ser aplicable a pavimentos en condiciones diferentes de aquellas en las que se toman los datos.

Por otra parte, el desarrollo de modelos mecanicistas se basa no solo en datos de pavimento existentes, sino que particularmente en características del comportamiento de las diversas capas y materiales que conforman los pavimentos específicamente en las propiedades físicas y mecánicas de la sub base y el pavimento rígido. Por ejemplo: un modelo de agrietamiento se basa en la determinación del nivel de fatiga acumulado en las losas, el que para ser calculado

requiere la utilización de conceptos mecanicistas que permitan conocer las tensiones y deformaciones críticas generadas en función de las cargas de tránsito y del alabeo térmico.

3.1.1. APLICABILIDAD DE LOS MODELOS DE DETERIORO

Los modelos de deterioro de pavimentos se aplican a diversos aspectos relacionados con la administración de pavimentos; a modo de ejemplo pueden mencionarse los siguientes:

- a) La creación de un sistema de administración de pavimentos, que utilice las respuestas de los modelos para predecir los futuros deterioros del pavimento y para evaluar los resultados de aplicar diversas alternativas de mantenimiento a ellos, para elegir la mejor planificación para la conservación de un camino, que optimice los resultados tanto de su nivel de servicio como de los costos involucrados en lograrlo.
- b) La generación de un conjunto de políticas y estándares de mantenimientos basados en condiciones de deterioro relevantes del pavimento, cuya conducta puede predecirse en base a los modelos de comportamiento de dichas condiciones. Conociendo los deterioros en el tiempo, es posible generar una política adecuada y coherente que permita mantener el nivel de servicio requerido del pavimento a lo largo del tiempo que el pavimento está en funcionamiento.
- c) La evaluación del efecto relativo de algunas características del diseño con respecto a otras.

3.2 MODELOS DE DETERIOROS DE HDM-4

El modelo HDM-4 ha sido utilizado en muchos proyectos alrededor del mundo como en Chile y Argentina, ayudando a los países en desarrollo. Pero la fiabilidad de los resultados de este modelo depende de dos consideraciones importantes, las cuales son:

- ✓ Que el dato proporcionado al modelo sea el que represente las verdaderas condiciones actuales y los factores de influencia.
- ✓ Que las predicciones del modelo se apeguen al comportamiento real y las interacciones entre varios factores por la variedad de condiciones a la cual es aplicada y de la naturaleza de los resultados pronosticados, los modelos de deterioro del HDM-4 se dividen en dos tipos, absolutos y de incremento. 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.

Este Modelo de deterioro de HDM-4 proporciona predicciones de los diferentes tipos de deterioros que irán apareciendo gradualmente en el pavimento a través de su ciclo de vida.

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 recarpeteo, 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

En nuestro país se utilizan únicamente los pavimentos de Concreto simple con juntas JPCP, por lo cual el presente trabajo revisará el modelo de deterioro únicamente en estos tipos de pavimentos.

Lo que se resume en la tabla 3.1

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

Tabla 3.1: Modelos de deterioro en HDM-4

FUENTE de manual de HDM-4

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 *t*

(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

Módulo de Elasticidad del Concreto (E_c)

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

Módulo de Ruptura del concreto (MR28)

Las tensiones en pavimentos de 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.

$$MR28 = RUP * \left(\frac{f'_c}{1000} \right)^{0.5}$$

Donde:

- MR*₂₈: Módulo 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 (varía entre 8 y 10, valor por defecto = 9)

El Módulo 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*: Módulo de Ruptura del concreto (psi)
- E_c*: Módulo 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 3.2 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 menor de 18.9×10^{-6} por °F pues presentan un buen comportamiento respecto de la tendencia a la fisuración temprana y también a largo plazo (según datos de ISCYC).

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

Tabla 3.2: Valores típicos del coeficiente térmico del concreto.

Fuente AASHTO 1993.

Condiciones de drenaje

Se reconoce extensamente que el drenaje es un factor principal que tiene influencia en 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 de 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.

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 el deterioro, principalmente 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:

$$LT = \left(\frac{DEF_{unid}}{DEF_{load}} \right) * 100$$

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

$$LTE_{sh} = \left(\frac{STRESS_{unid}}{STRESS_{load}} \right) * 100$$

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.

3.2.1. GENERALIDADES DE HDM-4

El HDM-4 es la última versión de una cadena de modelos creados para la evaluación de inversiones en pavimentos, surgió a partir de un constante proceso de mejoramiento y perfeccionamiento de modelos anteriores, con el objetivo de adecuarse a las condicionantes actuales en la planificación y desarrollo de sistemas viales, así como a las nuevas normativas referentes a la protección del medio ambiente que están siendo aplicadas en diversos lugares.

El primero de estos modelos para la evaluación de proyectos de carreteras surgió en el año 1968, siendo producido por el Transport and Road Research Laboratory (TRRL) del Reino Unido, juntamente con el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de Francia, bajo el patrocinio del Banco Mundial y como respuesta a los términos de referencia de un estudio para el diseño de carreteras.

Las bases del sistema HDM de evaluación de proyectos de carreteras se basa en la interacción entre el coste de las obras y los costes de operación de los vehículos. Este modelo ha ido evolucionando a lo largo de los años gracias al desarrollo de distintos estudios internacionales que han permitido adaptar el modelo a las distintas características de carreteras y vehículos, según ambos han evolucionado con el paso del tiempo.

En el desarrollo de los modelos 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. 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.

De manera puntual, podemos mencionar como ventajas del HDM-4, la incorporación de los pavimentos rígidos dentro de su campo de aplicación, 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.

3.2.2. ESCALONAMIENTO

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

$$\begin{aligned}
 FAULT = & K_{jpdf} NE4^{0.25} [0.0628(1 - C_d) + 3.673 \times 10^{-9} \times BSTRESS^2 \\
 & + (4.116 \times 10^{-6} \times JTSPACE^2 + 7.466 \times 10^{-10} \times FI^2 \times PRECP^{0.5}) \\
 & - (0.009503 \times BASE - 0.01917 \times WIDENED + 0.0009217 \times AGE)]
 \end{aligned}$$

Donde:

FAULT: Escalonamiento transversal promedio (Pulg.)

C_d: Coeficiente de drenaje modificado por AASHTO

NE4: Número de ejes sencillos equivalentes acumulados (ESALs) desde construcción (millones de ejes de 18kip (8,181.8 kg) por carril)

- BSTRESS*: Máximo esfuerzo de resistencia del concreto, en el sistema dovela-concreto (Psi). 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.
- BASE*: Tipo de base; 0 = no estabilizada, 1 = estabilizada
- FI*: Índice de congelamiento (°F-días)
- JTSPACE*: Distancia entre juntas transversales (Pies)
- PRECIP*: Precipitación promedio anual (Pulg.)
- WIDENED*: Carril ancho; 0 = No anchado, 1= Carril ancho o hombros hechos durante construcción, 0,5 = hombros en concreto colocadas después de la construcción.
- K_{jpdf}*: Factor de calibración (defecto = 1,0)
- AGE*: 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

El Máximo esfuerzo de resistencia del concreto, en el sistema dovela-concreto es:

$$BSTRESS = \frac{DFAC \times P \times LT \times Kd \times (2 + BETA \times OPENING)}{4 \times Es \times INERT \times BETA^3}$$

Donde:

DFAC: Factor de distribución

P: Carga total aplicada por cada rueda a un eje axial simple (9000 Lb)

LT: Porcentaje de transferencia de carga entre juntas

Kd: Módulo de soporte de la dovela (PCI)

BETA: Rigidez relativa del sistema dovela concreto

OPENING: Promedio de la abertura de la junta transversal (in)

Es: Módulo de la elasticidad de la dovela (Psi)

INERT: Momento de inercia de la sección transversal de la dovela (in⁴)

El factor de distribución se calcula de la siguiente manera:

$$DFAC = \frac{24}{l + 12}$$

$$l = \left[\frac{Ec \times SLABTHK^3}{12 \times (1 - \mu^2) \times KSTAT} \right]^{0.25}$$

Donde:

I : Radio de Rigidez relativa del sistema losa fundación (Pulg.)

E_c : Módulo de elasticidad del concreto (Psi)

$SLABTHK$: Espesor de losa (Pulg.)

μ : Relación de Poisson

$KSTAT$: Módulo de reacción de la subrasante (PCI)

La rigidez relativa del sistema dovela concreto se calcula así:

$$BETA = \left[\frac{Kd \times DOWEL}{4 \times Es \times INERT} \right]^{0.25}$$

Donde:

Kd : Módulo de soporte de la dovela (pci)

$DOWEL$: Diámetro de dovela (Pulg.)

Es : Módulo de elasticidad de la dovela (psi)

$INERT$: Momento de inercia de la sección transversal de la dovela (in⁴)

El promedio de la abertura de la junta transversal se obtiene de:

$$OPENING = 12 \times CON \times JTSPACE \times \left[\left(\frac{\alpha \times TRANGE}{2} \right) + \gamma \right]$$

Donde:

CON: Factor de ajuste debido a la retención de fricción entre losa y la base.

0.80 si la base es no estabilizada

0.65 si la base es estabilizada

JTSPACE: Distancia entre juntas transversales (Pies)

TRANGE: Rango de temperatura (°F)

γ : Coeficiente de contracción del concreto

α : Coeficiente termal del concreto (por °F)

Momento de inercia de la sección transversal de la dovelase determina así:

$$INERT = 0.25 \times \pi \times \left(\frac{DOWEL}{2} \right)^4$$

Donde:

DOWEL: Diámetro de dovela (pulg.)

3.2.3. DESPOSTILLAMIENTO DE JUNTAS TRANSVERSALES (JPCP)

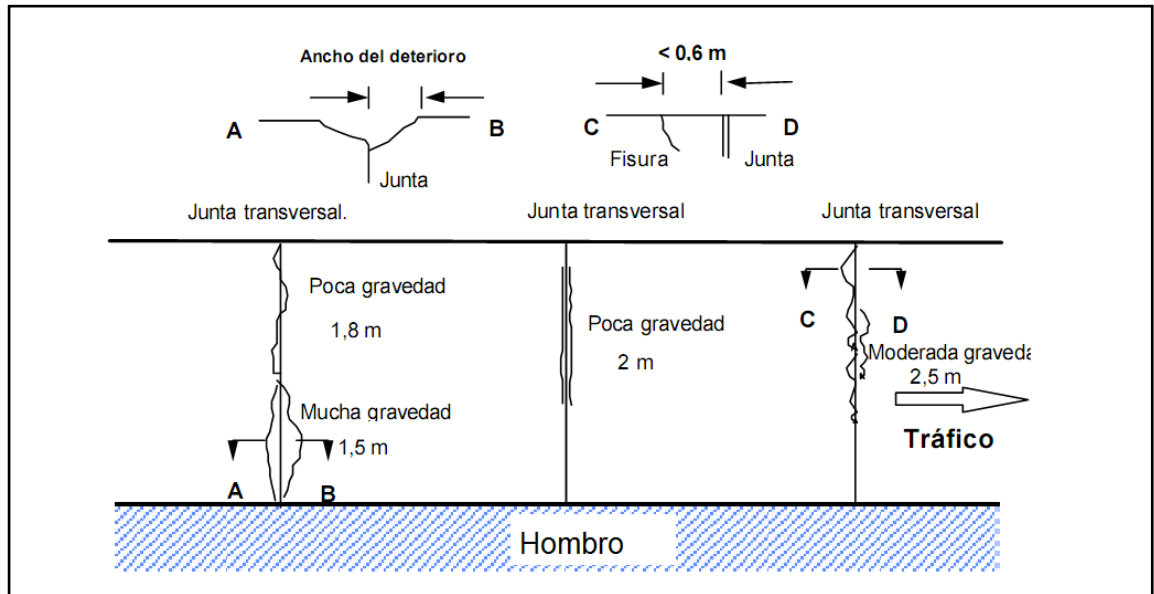


Figura 3.1 Esquema de Despostillamiento de juntas (JPCP) (FUENTE DE MANUAL DE HDM-4).

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

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

Donde:

$SPALL$: Porcentaje de juntas despostilladas

AGE : Edad en años desde la construcción

- JTSPACE:* Espaciamiento entre juntas promedio (pies)
- 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
- 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 = Dodelas 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)

3.2.3. AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL

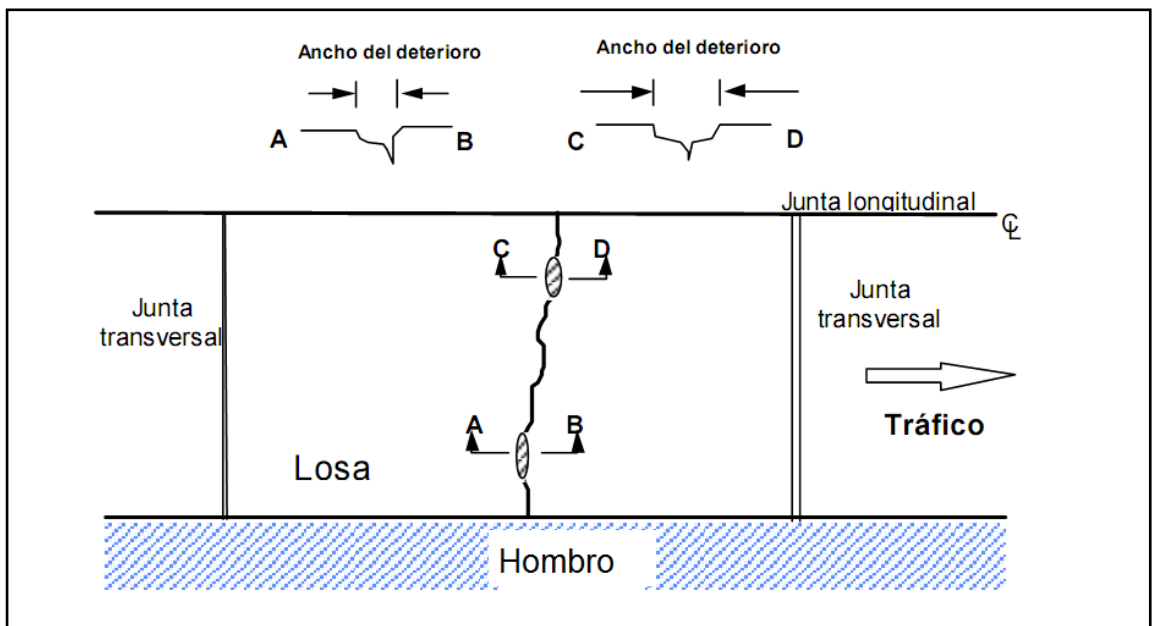


Figura 3.2 Esquema de agrietamiento transversal de losas de concreto hidráulico (JPCP) (FUENTE DE MANUAL DE HDM-4).

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

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

Donde:

PCRACK: Porcentaje de losas agrietadas

FD : Daño de fatiga acumulado, adimensional

K_{jpc}: Factor de calibración (1,0 por defecto).

Determinación del daño por 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).

Cálculo de Número de carga de ejes equivalentes de 18 kips durante el gradiente de temperatura:

$$n_{tg} = \frac{NE4}{LCR_{tg}} \times FREQ_{tg}$$

Donde:

$NE4$: Número de ejes sencillos equivalentes acumulados (ESAL`s) desde construcción (millones de 18 kips por carril).

$FREQ_{tg}$: Frecuencia de cada Gradiente de Temperatura.

LCR_{tg} : Relación de cobertura lateral del tráfico por gradiente de temperatura

Los parámetros del peso acumulativo del tráfico se usan para modelizar el deterioro de la carretera y como un criterio de intervención para algunos trabajos. Estos parámetros se calculan a partir del tráfico acumulado desde el momento del último perfilado o trabajo de construcción en

el tramo seleccionado. El número acumulativo del estándar de ejes equivalentes después de los últimos trabajos de rehabilitación, reconstrucción o nueva construcción (NE4) se obtiene de:

$$NE4 = \sum_{y=1}^{AGE3} YE4_y$$

Donde:

NE4: número acumulativo de ejes equivalentes después de la última rehabilitación, reconstrucción o nueva construcción (millones/carril).

YE4_y: número de ejes equivalentes en el año y (millones/carril).

AGE3: número de años después de la última rehabilitación, reconstrucción o nueva construcción (años).

Factor de cobertura lateral del tráfico por gradiente de temperatura:

La relación de cobertura lateral del tráfico, LCR, es simplemente una medida de la probabilidad de las veces que la carga de una rueda pasa sobre un punto crítico del borde.

Este punto se considera crítico, en los firmes de concreto de juntas planas, por ser el que recibe la presión máxima y será donde se iniciará la fisura.

Asumiendo que el promedio de ubicación, de las ruedas del vehículo, es de 22 pulgadas a partir del borde de la losa, con una desviación estándar de 8,4 pulgadas, la siguiente ecuación de regresión se puede usar para calcular la LCR:

$$LCR_{tg} = 418.9 - 1148.6 \times SR_{tg} + 1259.9 \times SR_{tg}^2 - 491.55 \times SR_{tg}^3$$

Donde:

SR_{tg} : Relación entre los esfuerzos combinados en la losa y el módulo de ruptura del concreto para el gradiente de temperatura.

Cálculo de Número máximo de repeticiones estándar de ejes equivalentes de carga de 18 Kips durante el gradiente de temperatura tg antes que la falla flexural ocurre (N_{tg}):

$$\text{Log}_{10}(N_{tg}) = 2.13 \times SR_{tg}^{-1.2}$$

$$SR_{tg} = \frac{SIGMA_{tg}}{MR}$$

Donde :

MR : Módulo de ruptura del concreto (psi)

$SIGMA_{tg}$: Esfuerzos combinados en el borde de las losas debido a las cargas y deformaciones para el gradiente de temperatura (psi).

$$SIGMA_{tg} = f_{SB} \times (\sigma_{load(tg)} + R_{tg} \times \sigma_{curl(tg)})$$

Donde:

f_{SB} : Factor de ajuste para las bases estabilizadas (1.0 si $EFFETHK$ es igual a $SLABTHK$)

$\sigma_{load(tg)}$: Esfuerzo en el borde de la losa debida a la carga del trafico (psi)

R_{tg} : Coeficiente de regresión

$\sigma_{curl(tg)}$: Esfuerzo en el borde de la losa debido al arqueamiento (psi)

El Factor de ajuste para las bases estabilizadas se calcula así:

$$f_{SB} = \frac{2 \times (SLABTHK - NAXIS)}{EFFETHK}$$

Donde:

$SLABTHK$: Espesor de la losa de concreto (Pulg)

$NAXIS$: Localización del eje neutro

$EFFETHK$: Espesor efectivo de la losa (Pulg)

NAXIS

$$= \left[\frac{0.5 \times SLABTHK^2 + \frac{E_{base}}{E_c} \times BASETHK \times (SLABTHK + 0.5 \times BASETHK)}{SLABTHK + \frac{E_{base}}{E_c} \times BASETHK} \right]$$

$$EFFETHK = \left[SLABTHK^2 + BASETHK^2 \times \frac{E_{base} \times BASETHK}{E_c \times SLABTHK} \right]^{0.5}$$

Donde:

E_{base} : Módulo de elasticidad de la base estabilizada (psi)

E_c : Módulo de elasticidad del concreto (psi)

$BASETHK$: Espesor de la base estabilizada (Pulg)

$SLABTHK$: Espesor de la losa de concreto (Pulg)

Cálculo del Esfuerzo en el borde de la losa debida a la carga del tráfico:

$$\sigma_{load} = f_{ES} \times f_{WL} \times \sigma_e$$

Donde:

f_{ES} : Factor de ajuste por soporte en el borde de la losa

f_{WL} : Factor de ajuste para carriles exteriores anchados (por hombros)

σ_e : Esfuerzo en el borde obtenido por la ecuación de Westergaard (psi)

Factor de ajuste por soporte en el borde de la losa se calcula así:

$$f_{ES} = \frac{100}{100 + LTE_{sh}}$$

Donde:

LTE sh : Eficiencia de la transferencia de carga entre la losa y el hombro (%)

= 20 si los hombros de concreto se hicieron desde el inicio de la construcción.

= 10 si los hombros de concreto se hicieron después de la construcción.

Factor de ajuste para carriles exteriores anchados (por hombros) se calcula así:

$$f_{WL} = 0.454147 + \frac{0.013211 \times l}{DW} + 0.386201 \times \left(\frac{a}{DW}\right) - 0.24565 \times \left(\frac{a}{DW}\right)^2 + 0.053891 \times \left(\frac{a}{DW}\right)^3$$

Donde:

l : Radio de Rigidez relativa del sistema losa fundación (Pulg)

DW: Localización de las ruedas, dada por la distancia promedio entre la rueda exterior y el borde. (Pulg.)

a : Radio de aplicación de la carga de un eje axial simple (Pulg.)

Cálculo de Radio de Rigidez relativa del sistema losa fundación (Pulg.):

$$l = \left[\frac{E_c \times SLABTHK^3}{12 \times (1 - \mu^2) \times KSTAT} \right]^{0.25}$$

Donde:

E_c: Módulo de elasticidad del concreto (psi)

SLABTHK: Espesor de la losa (Pulg)

KSTAT: Módulo de reacción de la subrasante (pci)

μ : Relación de Poisson

Cálculo de Radio de aplicación de la carga de un eje axial simple (Pulg.):

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi * p}}$$

Donde:

P : Carga total aplicada por cada rueda de un eje axial simple (9000Lb)

p : Presión de los neumáticos (psi)

Cálculo de Esfuerzo en el borde obtenido por la ecuación de Westergaard (psi):

$$\sigma_e = \frac{3 \times (1 + \mu) \times P}{\pi \times (3 + \mu) \times SLABTHK^2} \times \left[\ln \left(\frac{E_c \times SLABTHK^3}{100 \times KSTAT \times a_{eq}^4} \right) + 1.84 - \frac{4 \times \mu}{3} + \frac{1 - \mu}{2} + 1.18 \times (1 + 2 \times \mu) \times \frac{a_{eq}}{l} \right]$$

Donde:

P : Carga total aplicada por cada rueda de un eje axial simple (9000Lb)

μ : Relación de Poisson

$SLABTHK$: Espesor de la losa de concreto (Pulg.)

l : Radio de rigidez relativa del sistema losa fundación (Pulg)

a_{eq} : Radio equivalente de aplicación de la carga de un eje axial simple (Pulg.)

$$\frac{a_{eq}}{a} = \left[0.909 + 0.339485 \times \left(\frac{SP}{a}\right) + 0.103946 \times \left(\frac{a}{l}\right) - 0.017881 \times \left(\frac{SP}{a}\right)^2 \right. \\ \left. - 0.045229 \times \left(\frac{SP}{a}\right)^2 \times \left(\frac{a}{l}\right) + 0.000436 \times \left(\frac{SP}{a}\right)^3 - 0.301805 \times \left(\frac{SP}{a}\right) \right. \\ \left. \times \left(\frac{a}{l}\right)^3 + 0.034664 \left(\frac{SP}{l}\right)^2 + 0.001 \times \left(\frac{SP}{a}\right)^3 \times \left(\frac{a}{l}\right) \right]$$

Límites:

$$0 \leq SP/a \leq 20$$

$$0 \leq a/l \leq 0.5$$

Donde:

SP: Espacio central entre las llantas de un eje axial simple (Pulg.)

a: Radio de aplicación de la carga de un eje axial simple (Pulg.)

l: Radio de rigidez relativa del sistema losa fundación (Pulg.)

Cálculo de Coeficiente de regresión:

$$\begin{aligned}
 R = & [86.97 \times Y^3 - (1.051 \times 10^{-9} \times E_C \times dT \times KSTAT + 1.7487 \times dT) \times Y^2 \\
 & - (1.068 - 0.387317 \times dT - 1.84 \times 10^{-11} \times E_C \times dT^2 \times KSTAT \\
 & + 8.16396 \times dT^2) \times Y + (1.062 - 1.5757 \times 10^{-2} \times dT - 8.76 \times 10^{-5} \\
 & \times KSTAT + (1.17 - 0.181 \times dT) \times 10^{-11} \times E_C \times dT \times KSTAT)]
 \end{aligned}$$

$$Y = \frac{12 \times JTSPACE}{100 \times l}$$

$$dT = \alpha \times \Delta T_s \times 10^5$$

Donde:

JTSPACE: Distancia entre junta transversal (Pies)

l: Radio de Rigidez relativa del sistema losa fundación (pulg)

α : Coeficiente térmico del concreto (por °F)

KSTAT: Módulo de reacción de la subrasante (pci)

ΔT_s : Diferencia ajustada entre la temperatura de la superficie y el fondo de la losa (°F)

$$\Delta T_s = \Delta T - \left[a_0 + \frac{a_1 \times (SLABTHK - 2)}{SLABTHK^3} \right]$$

Donde:

ΔT : Diferencia entre la temperatura de la superficie y el fondo de la losa (°F)

($\Delta T = T_{top} - T_{bottom}$)

a_0, a_1 : Coeficientes basados en la zona climática

Cálculo de Esfuerzo por gradiente térmico (PSI):

$$\sigma_{curl} = \frac{COEF \times E_c \times \alpha \times \Delta T_s}{2}$$

Donde:

E_c : Módulo de elasticidad del concreto (psi)

α : Coeficiente térmico del concreto (por °F)

ΔT_s : Diferencia ajustada entre la temperatura de la superficie y el fondo de la losa (°F)

$COEF$: Coeficiente de esfuerzo térmico

$$COEF = 1 - \left[\frac{2 \times \cos(\lambda) \times \cosh(\lambda)}{\sin(2\lambda) + 2 \times \sinh(\lambda) \times \cosh(\lambda)} \right] \times \left[\tan(\lambda) + \left(\frac{\sinh(\lambda)}{\cosh(\lambda)} \right) \right]$$

$$\lambda = \frac{12 \times JTSPACE}{l \times \sqrt{8}}$$

Donde:

λ : Parámetro expresado en grados sexagesimales

JTSPACE: Distancia entre junta transversal (Pies).

3.2.5 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:

$$IRI = K_{jpr} \times (IRI_0 + 2.6098 \times TFAULT + 1.8407 \times SPALL + 2.2802 \times 10^{-6} \times TCRAKS^3)$$

Donde:

IRI_t: Regularidad en el tiempo t (pulgadas/milla)

IRI₀: Regularidad inicial en momento de construcción (pulg/milla), (defecto = 98.9)

TFAULT: Escalonamiento transversal total de juntas por milla (pulg/milla)

SPALL: Porcentaje de juntas despostilladas.

TCRACKS: Número total de losas agrietadas por milla

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

El número total de losas agrietadas por millas se calcula de la siguiente manera:

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

Donde:

TCRACKS: Número total de losas agrietadas por milla.

PCRACK: Porcentaje de losas agrietadas.

JTSPACE: Espaciamiento promedio en juntas transversales (Pies)

El escalonamiento transversal total de juntas por milla se calcula de la siguiente manera:

$$TFAULT = \frac{5280 FAULT}{JTSPACE}$$

Donde:

TFAULT: Escalonamiento transversal total de juntas por milla (pulg/milla)

FAULT: Escalonamiento transversal promedio en juntas (pulg.)

JTSPACE: Espaciamiento promedio en juntas transversales (Pies)

3.3 MODELOS DE DETERIORO DE LAS GUÍA DE DISEÑO EMPÍRICA MECANICISTA.

3.3.1 GENERALIDADES DE LA GUÍA DE DISEÑO EMPÍRICA MECANICISTA DE AASHTO

¿Qué es la Guía Empírica Mecanicista de Pavimentos?

Durante las últimas décadas, la metodología de diseño para pavimentos rígidos se ha basado ya sea en criterios netamente empíricos, cuyo ejemplo más conocido es la Guía AAHSTO '93, o bien conceptos mecanicistas como los métodos desarrollados por la Portland Cement Association (Packard, 1984). A mediados de la década de los '90 se introducen conceptos mecanicistas en la Guía de 1993 titulada "1998 Supplement for Rigid Pavement Design".

La Guía de Diseño Empírico-Mecanicista de Pavimentos (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG) (NCHRP, 2004), que combina el análisis mecanicista de los pavimentos con verificación empírica del comportamiento a través de la predicción de determinados tipos de deterioro, fue desarrollada en base a la gran cantidad de datos colectados en EEUU durante el desarrollo del programa denominado “Long-Term Pavement Performance”, más conocida por sus siglas LTPP (SHRP, 1993). Estos datos permitieron ajustar los modelos empíricos de deterioro de pavimentos y conocer más profundamente el comportamiento estructural y funcional de estos últimos.

El procedimiento de diseño MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide), en términos generales, consiste en adoptar inicialmente una serie de parámetros estructurales para el pavimento (número y tipo de capas, indicadores de resistencia de las mismas, características de la subrasante, etc.), y establecer las condiciones de tránsito y clima a las que se verá sometido a lo largo del período de diseño.

En base a esta información, la Guía de Diseño Empírica Mecanicista elabora la predicción de la evolución de determinados indicadores de deterioro a lo largo del período de diseño, los cuales no deberían superar los valores umbrales de deterioro previamente establecidos por el diseñador, bajo una cierta confiabilidad también predeterminada por dicho usuario. Si no se cumplen estas premisas, o también si se cumplen muy holgadamente, el diseñador puede ir modificando en

forma iterativa los parámetros estructurales adoptados para el diseño, hasta arribar a una solución satisfactoria.

¿Cuáles son los objetivos que se pretenden con la Guía de Diseño Empírica Mecanicista de Pavimentos?

- ✓ Suministrar a la comunidad vial una herramienta con el estado de la práctica para el diseño de estructuras de pavimentos nuevas y rehabilitadas.

- ✓ El objetivo fue cumplido mediante:
 - El empleo de procedimientos de diseño que emplean tecnologías empírico mecánicas.
 - El desarrollo de software y documentación apropiados.

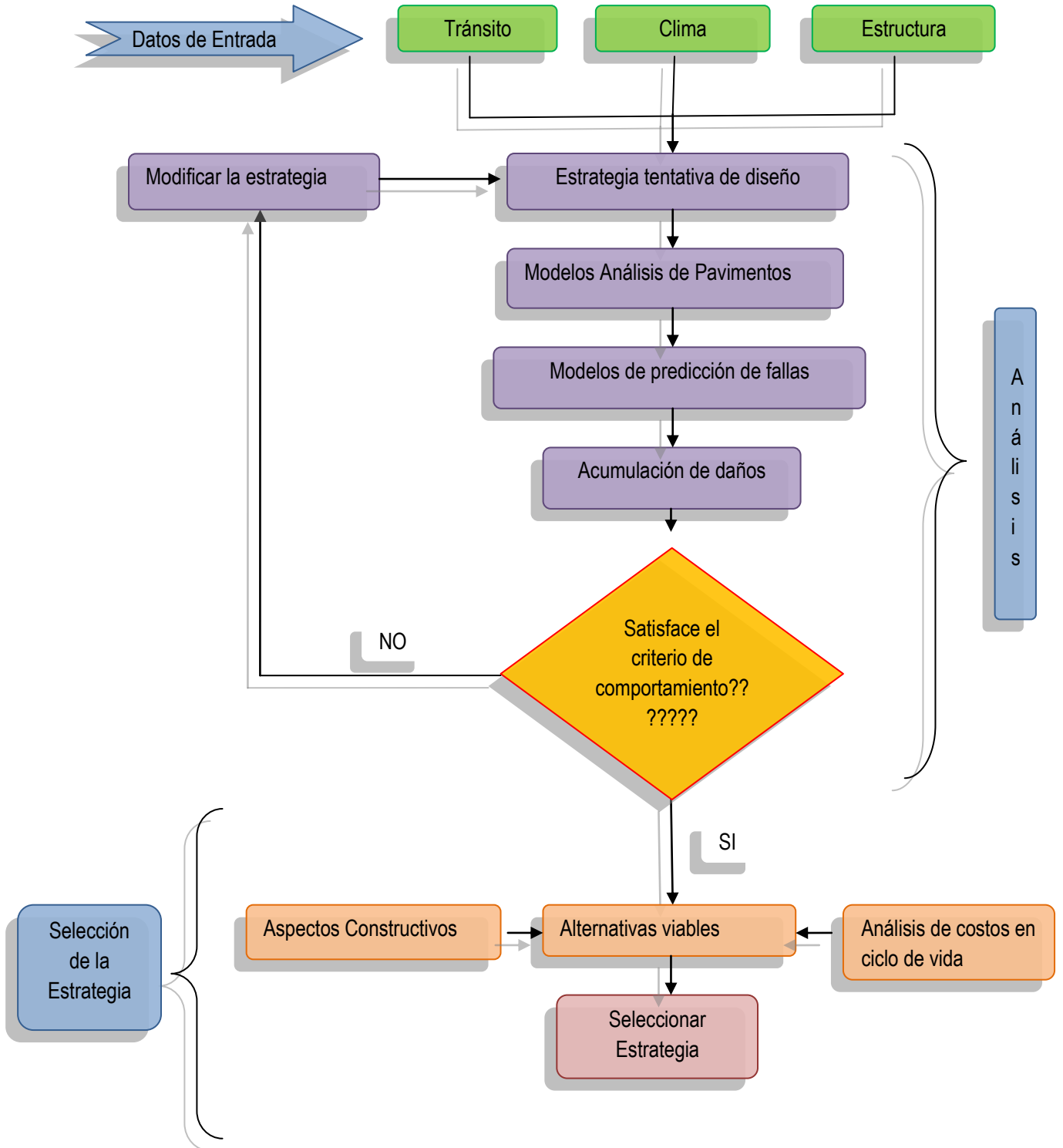
Filosofía de la Guía Empírica Mecanicista de Pavimentos.

- ✓ La nueva guía AASHTO presenta procedimientos para el análisis y el diseño de pavimentos flexibles y rígidos, nuevos y rehabilitados.

- ✓ Los métodos de diseño incluidos en la guía se basan en un procedimiento empírico-mecánico que integra en el diseño el comportamiento de los materiales, el clima y las cargas del tránsito, durante el transcurso del tiempo.

- ✓ Los métodos de diseño parten de la elaboración de modelos que simulan las estructuras de los pavimentos.
- ✓ Los modelos estructurales de pavimentos flexibles son analizados por un programa elástico multicapa para análisis lineal (JULEA) o por uno de elementos finitos para análisis no lineal (DSC2D).
- ✓ Los modelos estructurales de pavimentos rígidos son analizados por un programa de elementos finitos bi-direccional (ISLAB2000).
- ✓ Los programas de cómputo entregan tensiones, deformaciones y desplazamientos en puntos críticos de la estructura modelada y en la subrasante.
- ✓ El método aplica modelos empíricos de deterioro que permiten evaluar el tipo y la extensión de los daños durante cualquier instante de la vida del pavimento.
- ✓ Si alguno de los tipos de daño considerados por los métodos excede el límite fijado como admisible, se debe elaborar un nuevo modelo estructural y repetir los análisis.

Procedimiento de diseño propuesto por la Guía MEPDG



Niveles jerárquicos de diseño

Nivel 1:

- ✓ Es el más riguroso y de mayor precisión.
- ✓ Se aplica al diseño para vías con altos volúmenes de tránsito.
- ✓ Requiere datos de campo y ensayos de laboratorio rigurosos.

Nivel 2:

- ✓ Corresponde a un nivel medio de exactitud.
- ✓ Los datos de entrada se obtienen de un programa limitado de medidas o ensayos o son estimados mediante correlaciones.

Nivel 3:

- ✓ Aporta el menor nivel de exactitud.
- ✓ Los datos de entrada suelen ser valores promedio según experiencia local o regional.
- ✓ Se usa cuando las consecuencias de fallas prematuras son mínimas.

Módulos de La Guía Empírico-Mecanicista.

1. Módulo de Datos:

- ✓ Módulo de información General
- ✓ Módulo de tránsito
- ✓ Módulo de clima
- ✓ Módulo de materiales

2. Módulo de análisis empírico-mecánico

3. Módulo de salidas

Cómputo Analítico

En los primeros datos a introducir en la Guía de Diseño Empírica Mecanicista se ha requerido información sobre los meses de construcción y de apertura al tránsito. Ello permite al EICM coordinar los datos ambientales a las condiciones estacionales de temperatura y humedad esperadas.

De esta manera, el programa calcula los perfiles de temperatura y humedad a través de la profundidad del pavimento y aplica el tránsito anticipado en cada período al modelo estructural afectado por el efecto del clima, de manera de ir evaluando el deterioro del pavimento en un proceso de progresión en el tiempo.

Proceso de progresión en el tiempo

En un instante $t = t_0$

1. Se generan los perfiles de temperatura y humedad.
2. Se define el espectro de cargas para el siguiente incremento de tiempo (Δt).
3. Se realiza un análisis estructural para estimar los esfuerzos y deformaciones críticas en la estructura.
4. Se realiza un análisis complementario para determinar los esfuerzos y deformaciones por causas diferentes a las cargas (por ejemplo, por gradientes térmicos y de humedad).
5. Se combinan los esfuerzos y deformaciones críticos por las cargas y por los otros factores.
6. Se calculan los incrementos de deterioro del pavimento con base en los esfuerzos y deformaciones críticas (o en sus incrementos). Ello se realiza a partir de modelos determinísticos o empíricos e incluyen agrietamiento, ahuellamiento, escalonamiento, IRI, etc.
7. Se estiman los cambios en los parámetros iniciales de los materiales a causa del daño incremental de la estructura. Por ejemplo, si una capa estabilizada con cemento que originalmente tenía un módulo de 2,400,000 psi y ha sido sobre esforzada y agrietada en este intervalo de tiempo, el valor de éste se reduce.
8. Se incrementa la escala de tiempo a $t = t_0 + \Delta t$ y se repite el ciclo.

Acumulación de deterioros

Se analiza si la acumulación de deterioros durante el período de diseño del pavimento satisface los criterios de comportamiento:

- ✓ En caso afirmativo, la estrategia tentativa de diseño es viable.
- ✓ En caso negativo, se deberá modificar la estrategia y repetir el procedimiento.

Localización de los puntos de análisis para cálculo de deterioros:

Variable	Ubicación	Empleo
Esfuerzo de flexión	Fondo de la losa	Agrietamiento transversal de abajo hacia arriba
Esfuerzo de tensión	Superficie de la losa	Agrietamiento transversal o diagonal de arriba hacia abajo
Deficiencia en la transferencia de carga	Juntas transversales	Escalonamiento

Tabla 3.3: Cálculo de deterioros según su ubicación.

Incremento de los deterioros:

En el instante $t = 0$ todos los deterioros son iguales a cero, excepto el IRI, el cual se ajusta al valor incluido en los datos, sobre parámetros de análisis del pavimento.

A medida que el tiempo se incrementa, el estado de esfuerzos en el pavimento va siendo aplicado a unas relaciones semi empíricas (funciones de transferencia) que estiman el desarrollo de los deterioros:

$$\text{Deterioros (instante } t + \Delta t) = \text{Deterioro (instante } t) + \Delta \text{ deterioro}$$

3.3.2 MODELO DE AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL

Las grietas transversales se modelan como porcentaje de losas agrietadas:

$$CRK = \frac{C_3}{1 + C_4 \text{Daño}^{c_5}}$$

Donde:

CRK = porcentaje de losas fisuradas

Daño = n/N

n = número de repeticiones de cargas previstas

N = número admisible de cargas de igual magnitud y configuración para provocar la

fisuración por fatiga de la losa de concreto.

C3, C4, C5= factores de calibración (Valores por defecto: C3 = 100; C4 = 1,0; C5 = -2,0).

El valor de N se calcula con el modelo de fatiga indicado a continuación:

$$\log N_{ijklmn} = C_1 \left(\frac{MR_i}{\sigma_{ijklmn}} \right)^{C_2}$$

Donde:

N_{ijklmn} = número admisible de pasadas de carga a la edad "i" (teniendo en cuenta cambios en MR, adherencia entre losa y base y deterioro de banquina), mes "j" (considerando cambios en el valor de k), tipo de eje "k", intervalo de cargas "l", diferencia de temperatura "m" y zona transitada por la rueda "n".

MR_i = módulo de rotura del concreto a la edad i (en psi).

σ_{ijklmn} = tensión de trabajo del concreto en condiciones i, j, k, l, m, n.

C1, C2= factores de calibración (Valores por defecto: C1= 2,0; C2= 1,22).

3.3.3 MODELO DE ESCALONAMIENTO

El escalonamiento se predice mediante una aproximación por incrementos. Se determina un incremento mensual y el nivel del escalonamiento real afecta la magnitud del incremento.

El escalonamiento en cada mes ($Fault_m$) se determina como la suma de todos los incrementos de escalonamiento desde que el pavimento se puso al servicio.

$$Fault_m = \sum_{i=1}^m \Delta Fault_i$$

$$Fault_i = C_{34} \times (FAULTMAX_{i-1} - Fault_{i-1})^2 \times DE_i$$

$$FAULTMAX_i = FAULTMAX_0 + C_7 \times \sum_{j=1}^m DE_j \times \log(1 + C_5 \times 5^{EROD})^{C_6}$$

$$FAULTMAX_0 = C_{12} \times \delta_{curling} \times \left[\log(1 + C_5 \times 5.0^{EROD}) \times \log\left(\frac{P_{200} \times WetDays}{P_s}\right) \right]^{C_6}$$

$Fault_m$ = Escalonamiento promedio acumulado al final del mes m, pulg.

$\Delta Fault_i$ = Incremento medio del escalonamiento en las juntas transversales durante el mes i, pulg.

$FAULTMAX_i$ = Máximo escalonamiento para el mes i, pulg.

$FAULTMAX_0$ = Máximo escalonamiento inicial, pulg.

$EROD$ = Factor de erosión de la base.

DE_j = Energía de deformación acumulada durante el mes j.

$\delta_{curling}$ = Máxima deformación de la losa en esquina debido a los alabeos por cambio de temperatura y humedad.

P_S = Sobre carga en la subrasante, lb

P_{200} = Pasa tamiz No. 200 del material de subrasante

WetDays = Número promedio de días al año con mas de 0.1 pulgadas de lluvia

C_1 hasta C_8 y C_{12} , C_{34} son constantes nacionales de calibración.

$$C_{12} = C_1 + C_2 \times FR^{0.25}$$

$$C_{34} = C_3 + C_4 \times FR^{0.25}$$

$$C_1 = 1.29, C_2 = 1.1, C_3 = 0.01725, C_4 = 0.0008, C_5 = 250, C_6 = 0.4, C_7 = 1.2$$

FR : Porcentaje de tiempo en le que la losa de concreto esta por debajo de los 32°F.

3.3.4 MODELO DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)

El IRI se calcula para cada tipo de pavimento y combinación de materiales, con base en una regresión lineal usando la calibración nacional del LTPP.

Las relaciones generales son de la forma:

$$\text{IRI} = \text{IRI}_0 + \Delta \text{IRI}$$

$$\Delta \text{IRI} = f(\text{Dj}, \text{Sf})$$

IRI_0 = Rugosidad del pavimento nuevo.

Dj = Efecto de los deterioros superficiales.

Sf = Efecto de variables no relacionadas con deterioros superficiales o Factor de Sitio.

Rugosidad en un pavimento rígido:

$$\text{IRI} = \text{IRI}_0 + 0.0823 (\text{CRK}) + 0.442(\text{SPALL}) + 1.4929 (\text{TFAULT}) + 25.24 (\text{SF})$$

$$\text{SF} = \text{AGE} * (1 + 0.556\text{FI}) (1 + P_{0.075}) / 10^6$$

CRK = Porcentaje de losas con grietas transversales y de esquina.

SPALL = Porcentaje de juntas con despostillamiento de severidad media y alta

TFAULT = Total de escalonamiento en las juntas, pulgadas/milla

SF = Factor de sitio

AGE = Edad del pavimento, años

FI = Índice de congelamiento, °F días

P_{0.075} = Pasante del tamiz # 200 del suelo de subrasante

El modelo empírico desarrollado para el porcentaje de losas despostilladas se muestra debajo:

$$SPALL = \left[\frac{AGE}{AGE + 0.01} \right] \left[\frac{100}{1 + 1.005^{(-12*AGE+SCF)}} \right]$$

Donde:

SPALL= Porcentaje de juntas con despostillamiento de severidad media y alta

AGE = Edad del pavimento desde la construcción

SCF = Factor de escala basada en el sitio

En donde el Factor de escala basada en el sitio se calcula de la siguiente manera:

$$SCF = -1400 + 350 * AIR\% * (0.5 + PREFORM) + 3.4 * f'c^{0.4} - 0.2 * (FTCYC * AGE) + 43 * Hpcc - 536 * WC_Ratio$$

Donde:

AIR% = Porcentaje de contenido de aire en el concreto.

AGE = Años desde la construcción.

PREFORM = 1 si el sellador realizado está presente, 0 si existe otro tipo de sello o no existe.

$f'c$ = Resistencia a la compresión del concreto, Psi

FTCYC = Número de ciclos de congelamiento- deshielo en el año.

H_{pcc} = Espesor de la losa de concreto, Pulg.

WC_Ratio = Relación Agua Cemento.

CAPITULO IV

CAPITULO IV

RECOLECCIÓN DE DATOS

4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRAMO DE PRUEBA.

El tramo en referencia comunica la ciudad capital, San Salvador con el Aeropuerto Internacional de El Salvador en Comalapa, tiene una longitud de 38.5 Km, el pavimento requerido era una losa de 21 cm de espesor, apoyada sobre el pavimento existente (bastante deteriorado), técnica conocida como Whitetopping, y la utilización de pasa juntas de acero para mejorar la transferencia de carga entre las losas. El comportamiento inicial de la estructura fue bueno.

La autopista al Aeropuerto Internacional El Salvador en Comalapa, carretera que comunica la ciudad de San Salvador con el resto del mundo, fue terminada de construir hace más de 30 años y actualmente es considerada una de las vías de mayor importancia y volumen de tráfico vehicular del país. En septiembre de 2001 se iniciaron los trabajos de rehabilitación en la estructura del pavimento existente cuya vida útil ya se había cumplido.

La rehabilitación de la estructura de pavimento existente, consiste en utilizar sobre capas de concreto hidráulico colocadas directamente sobre la superficie asfáltica, así como también el mejoramiento de hombros y drenajes. La longitud total de la carretera es de 38.5 Km, en dos vías de tres carriles por sentido en un tramo con características urbanas, y dos carriles por sentido en tramos interurbanos.

Las características geométricas de la carretera más relevantes son: ancho de carriles 3.65m, velocidad de diseño de 90 Kph, pendiente mínima de 0.5% y máxima de 5.5%, así mismo, ambas vías están separadas por una medianera o cuneta central de 8.00 m y a lo largo del tramo interurbano ambas vías poseen hombro externo de 2.85 m y hombro interno de 1.00 m.

El pavimento de concreto es simple con juntas (JPCP) y está diseñado sin confinamiento lateral, posee dovelas en las juntas transversales de contracción y barras de amarre en las juntas longitudinales de construcción.

El tramo que se tomará como referencia para la ejecución de nuestro Trabajo de Graduación serán 4 Km de la Autopista a Comalapa específicamente entre el Kilómetro 19 y 23, tomando como referencia este tramo, ya que se considera que cumple con muchas de las características que definen un buen tramo para análisis, tomando en cuenta características tales como tránsito constante en todo el tramo dado que no existen retornos ni entradas o salidas de tráfico, velocidad de tránsito es prácticamente la misma que la de diseño, el proceso constructivo se considera que fue adecuado y no existen grandes errores en la construcción excepto dos cepillados de área mínima en ambos sentidos, pendientes suaves en la mayor parte del tramo, etc.

Además se cuenta con información del diseño y construcción de esta carretera, siendo este un parámetro muy importante para la selección de este tramo, dado que los modelos de deterioros requieren una gran cantidad de información.

Código	Tramo	Km Inicio	Km Final	Longitud (Km)	Categoría Funcional
RN05	Autopista Comalapa entre Santo Tomas y Olocuilta.	19	23	4	Primaria

Tabla 4.1 Características del tramo en estudio.



FIGURA 4.1. Inicio del Tramo en análisis



FIGURA 4.2. Fin del Tramo en análisis

4.2. LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS.

4.2.1 Metodología del levantamiento de deterioros.

El Método **Strategic Highway Research Program** (SHRP) (Programa de Investigación Estratégica Carretera) consta de dos partes características. La primera es el llenado de los croquis de la sección, que nos da una visión clara de lo que está sucediendo en el tramo analizado, y se puede usar como consulta al momento de estudiar los datos recogidos para su fácil manejo o uso.

Dado que este método fue desarrollado para recolectar la información de la investigación SHRP en Estados Unidos, recomienda recolectar el 100% de la longitud de los tramos testigos de dicha investigación. Por lo tanto, para su uso en otras aplicaciones, como en evaluación de proyectos o redes viales, se debe especificar el método de muestreo estadístico a utilizar. Por ejemplo 100.00 metros de calzada cada 1000.00 m. En este trabajo se realizó el levantamiento de deterioros de las losas que se encontraban entre los kilómetros 19-23 de la autopista Comalapa tomando en estudio los 4 carriles, representando un 10% de la longitud total de la Autopista a Comalapa.

La primera fase del trabajo de campo, consistió en realizar un levantamiento de deterioros en cada uno de los carriles y longitud total del tramo de prueba. Como se mencionó anteriormente este trabajo se fundamenta en los lineamientos de SHRP-Manual P-338 que son:

1. Inspección visual desde automóvil: se utiliza este método para realizar una evaluación general de tipo preliminar de los diversos trabajos a realizar, definir frentes de trabajo, aspectos relacionados con la seguridad y señalización temporal, cuantificar tiempo y recursos.
2. Inicio y jornadas de trabajo: el levantamiento de deterioros se realizó por cuadrillas entrenadas, y el trabajo se realizó en jornadas diurnas de 7:00 am a 5:00 pm utilizando el equipo necesario y de seguridad.
3. Inspección Visual Manual: los deterioros fueron registrados y clasificados por la cuadrilla de levantamiento que realizó un recorrido a pie por cada una de las losas que conforman la estructura del pavimento. El tipo, cantidad y nivel de severidad de los deterioros se registró codificando cada uno de los daños en un mapa de deterioros.
4. Características de la vía y orientación del levantamiento: el tramo de carretera tiene dos carriles por sentido, siendo el ancho de losas correspondiente al ancho de carril de 3.65 m. todo el levantamiento se realizó con dos recorridos en sentido Santo Tomas- Olocuilta

y dos recorridos en sentido Olocuilta- Santo Tomas. El siguiente esquema muestra la disposición de losas por sentido y la orientación del levantamiento realizado.

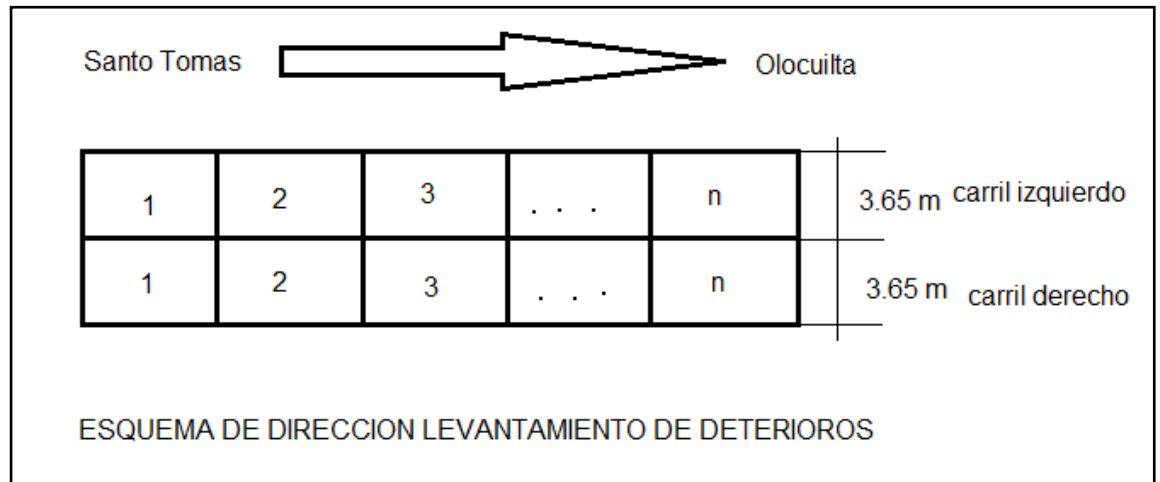


Figura 4.3 sentido y dirección de levantamiento de deterioros

5. Codificación de deterioros: con la finalidad de obtener un registro práctico y ordenamiento de los diversos deterioros, se utilizó en los mapas de registro la siguiente codificación SHRP para pavimentos de concreto hidráulico.

CODIGO	TIPO	CODIGO DE ACUERDO A SEVERIDAD		
		ALTA	MEDIA	BAJA
1	Grieta de esquina	1A	1M	1B
2	Agrietamiento longitudinal	2A	2M	2B
3	Agrietamiento transversal	3A	3M	3B
4	sello dañado en la junta transversal	4A	4M	4B
5	sello dañado en la junta longitudinal	5A	5M	5B
6	Despostillamiento en las juntas longitudinales	6A	6M	6B
7	Despostillamiento en las juntas transversales	7A	7M	7B
8	Agrietamiento tipo mapa o escamadura	8 (No tiene niveles de severidad)		
9	Pulimiento del agregado	9 (No tiene niveles de severidad)		
10	Hundimiento carril - hombro	10 (No tiene niveles de severidad)		
11	Separación carril - hombro	11 (No tiene niveles de severidad)		
12	Desprendimiento	12 (No tiene niveles de severidad)		
13	Bacheo (reparaciones ejecutadas)	13A	13M	13B
14	Flujo de agua y bombeo de finos	14 (No tiene niveles de severidad)		

TABLA 4.2: Codificación de deterioros

TIPO	DESCRIPCION	FORMA DE MEDICION
Grieta de esquina	una porción de la losa separada por una grieta que intercepta las juntas adyacentes transversal y longitudinal, describiendo aproximadamente un ángulo de 45°, en la dirección del tránsito	Se debe registrar el número de grietas para cada nivel de severidad
Agrietamiento longitudinal	Son grietas que tienen una orientación predominantemente paralelas a la línea central de la vía	Se debe registrar el número de agrietamientos para cada nivel de severidad
Agrietamiento transversal	son grietas que tienen una orientación predominantemente perpendiculares a la línea central de la vía.	Registrar el número de las grietas transversales para cada nivel de severidad
Sello dañado en las juntas	El daño en el sello es cualquier condición que permite la entrada de material incompresible o una cantidad importante de agua se infiltre en la junta desde la superficie	Registre el número de juntas transversales con daño en el
Sello dañado en la junta longitudinal		Registra el número de daños en el sello en la junta transversal
Despostillamiento en las juntas longitudinales	son roturas de las aristas de las juntas y/o grietas, causando daño en el pavimento	Se debe registrar el numero de despostillamientos de la junta transversal, para cada nivel de severidad
Despostillamiento en las juntas transversales		Registre el numero de despostillamiento para cada nivel de severidad y el numero de juntas transversales afectadas
Agrietamiento tipo mapa o	Conjunto de grietas cortas que muestra un patrón indefinido en varias direcciones	Registrar un aproximado del área afectada en metros cuadrados y el numero de losas afectadas
Pulimiento del agregado	El mortero superficial y texturizado, se encuentra gastado, exponiendo el agregado grueso	
Hundimiento carril hombre	Consiste en pequeñas diferencias de nivel de rasante o superficie entre el carril y el hombro (grada)	Registrar el estacionamiento del inicio y final del tramo afectado y hacer nota al pie con las observaciones necesarias
Separación carril hombro	Consiste en anchos visibles o separación considerable entre el concreto que conforma el carril y el concreto del hombro	
Desprendimiento	Consiste en pequeños huecos en el interior de las losas producto del desprendimiento de agregados, impactos, colmenas superficiales, etc.	Registrar el número de desprendimientos y el numero de losas afectadas
Bacheo	Existencia de bacheo (intervención de reparación utilizando concreto asfáltico o concreto hidráulico) y deterioro del mismo	Registrar el número de baches existentes y explicar el tipo de bacheo realizado (flexible o rígido).
Flujo de agua y bombeo de finos	Se refiere a la migración de finos de la capa de base a través de las juntas hacia la superficie del concreto	Registrar el número de flujos o evidentes de bombeos encontrados

Tabla 4.3 Clasificación de deterioros

TIPO	SEVERIDAD		
	BAJA	MODERADA	ALTA
Grieta de esquina	La grieta no está despostillada en más del 10% de la longitud de la grieta, no existe escalonamiento medible, y el fragmento de la esquina no está roto en dos o más piezas	severidad baja en más del 10% de su longitud total, el escalonamiento de la grieta es < 13 mm; y el fragmento de la esquina no está roto en dos o más piezas	severidad de moderada a alta en más del 10% de su longitud total, o el escalonamiento de la grieta es mayor o igual que 13 mm, o el fragmento de la esquina está roto en dos o más piezas
Agrietamiento Longitudinal	Posee anchos de grieta menores a 3 mm, sin despotillamiento y escalonamientos no medibles, o grieta bien sellada con un ancho que no se puede determinar	Anchos de grieta mayores o iguales que 3 mm y menores que 13 mm o despotillamiento < 75 mm o escalonamiento de hasta 13 mm	Anchos de grieta mayores o iguales que 13 mm, o despostillamiento mayor o igual que 75 mm; o escalonamiento mayor o igual que 13 mm
Agrietamiento Transversal	Anchos de grieta < 3 mm, sin despostillamiento y escalonamiento no medibles, o bien selladas y con ancho que no se puede determinar	Anchos de grieta mayores o iguales que 3 mm y menor que 6 mm o despotillamiento de hasta 6 mm.	Anchos de grietas mayores o iguales que 6 mm o con despostillamiento mayor o igual que 75 mm, o escalonamiento mayor o igual que 6 mm
Sello dañado en las juntas transversales	El daño del sello en la junta transversal existe en metros del 10% de la junta	El daño en la junta existe de un 10 - 50%	El daño en la junta ocurre en más del 50% de la junta
Despotillamiento en las juntas longitudinales	Despotillamientos menores de 75 mm de ancho, medidos hacia el centro de la junta, con o sin pérdida de material	Despotillamientos de 75 mm a 150 mm de ancho, medidos hacia el centro de la junta, con pérdida de material	Despotillamientos mayores de 150 mm de ancho, medidos hacia el centro de la junta, con pérdida de material
Despostillamiento en las juntas transversales	Despotillamientos menores de 75 mm de ancho, medidos hacia el centro de la junta, con o sin pérdida de material	Despotillamientos de 75 mm a 150 mm de ancho, medidos hacia el centro de la junta, con pérdida de material	Despotillamientos mayores de 150 mm de ancho, medidos hacia el centro de la junta, con pérdida de material
Pulimiento del agregado	No se aplica. El grado de pulimiento no influye mayormente en el comportamiento del pavimento.		
Escalonamiento de juntas transversales y grietas	No se aplica, aunque se podría obtener a partir de las mediciones realizadas; las cuales deben registrarse. A través del tiempo, este tipo de deterioro puede ocasionar pérdida de finos y pérdida de soporte bajo la losa de concreto, generando grietas		

Tabla 4.4 Severidad de los deterioros.

I. Elementos para una inspección visual.

Para realizar una inspección visual en terreno, se requiere de los siguientes elementos:

- Manual de inspección
- Fichas de datos y croquis en blanco
- Manual de identificación de fallas cinta para medir mínimo 30.00m de longitud.
- Cámara fotográfica
- Regla para medir ahuellamiento, en pavimentos asfálticos
- GPS

II. Llenado de croquis

Los croquis de inspección se usan para mostrar la ubicación exacta de cada tipo de falla que existe en la zona de inspección. Los tipos de fallas y niveles de severidad deben identificarse usando el manual de identificación de fallas (SHRP, 1993).

Cada zona de inspección debe ir dibujándose consistentemente a medida que se avanza. Las secciones comienzan y terminan en estaciones marcadas en el pavimento. La extensión de la sección, para propósitos de inspección, variará dependiendo de la existencia de juntas longitudinales y grietas y la posición relativa de las líneas demarcadoras de pistas.

Para dibujar el croquis, la cinta se coloca en el hombro adyacente a la zona, desde la estación 0 hasta la estación 1 (de 0 a 20.00 m) una vez que la cinta está en su lugar, se pueden dibujar las fallas leyendo directamente de la cinta su ubicación longitudinal. La localización transversal y

extensión se puede registrar usando una cinta adicional. Una vez que se han medido y dibujado los primeros 20.00m, se mueve la cinta a la segunda subzona de 20.00m y así sucesivamente hasta completar la zona de inspección de 100.00m.

Para determinar la zona de inspección de 100.00m, se comienza midiendo en los primeros 100.00m, para luego saltarse 200.00m y medir otros 100.00m; con este sistema de muestreo, se estudia un tercio de la longitud total del pavimento.



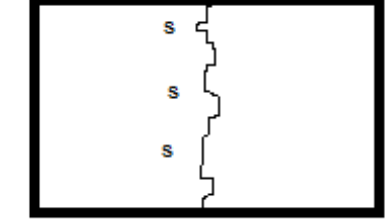
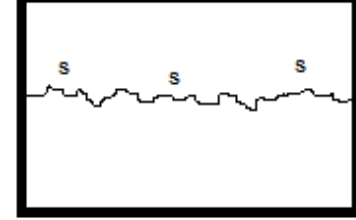
En terreno, se emplea un croquis a escala 1/200.

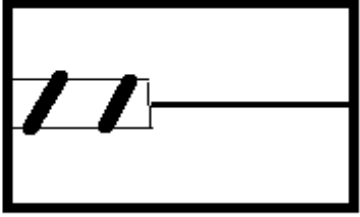
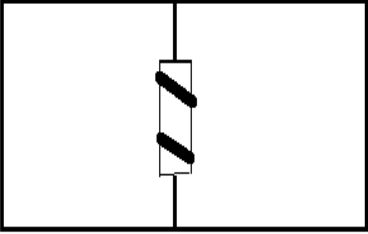
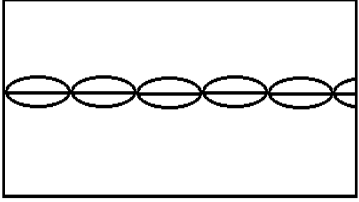
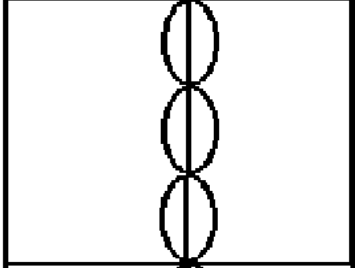
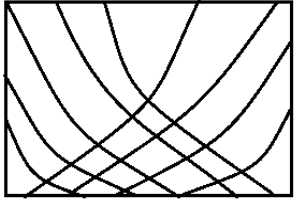
Para dibujar las fallas en los croquis, se emplean los símbolos adecuados, según el tipo del pavimento. En general la falla se dibuja y se rotula usando el número del tipo de falla y el nivel de severidad. Se agrega un símbolo adicional al costado del tipo de falla para indicar donde la grieta o junta se encuentra sellada. Cualquier falla que no esté descrita en el manual de identificación debe fotografiarse. La ubicación y extensión debe mostrarse y rotularse en el croquis.

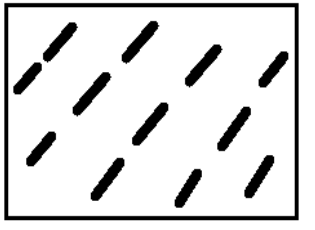
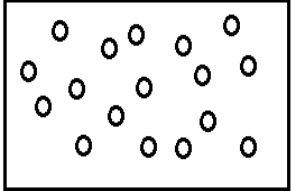
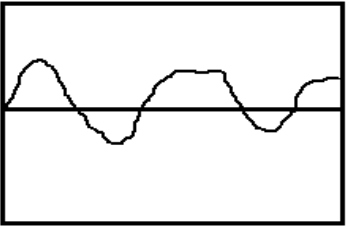

Pavimentos de concreto

Si las grietas tipo mapa, el pulimiento del agregado o la peladura se presentan en grandes áreas no se debe dibujar la extensión total.

En vez de eso, se anotan en el espacio de comentarios, Bajo el croquis apropiado, ubicación, extensión y nivel de severidad si es aplicable. Estas fallas deben dibujarse solo si se presentan en áreas localizadas. Los símbolos de deterioro para este tipo de pavimentos se presentan en la Tabla 4.5

Tipo de deterioro	Severidades	Símbolo
<p>1.grietas de esquina</p> <p>Número</p>	<p>B 10% Long. sin escalón, 1 trozo</p> <p>M 10% Long, 13 mm Escalón, 1 trozo</p> <p>A>10% long,>13 mm Escalon, >1 trozo</p>	
<p>2.Durabilidad</p> <p>Número de losas afectadas</p>	<p>B</p> <p>M trozos sueltos</p> <p>A trozos sueltos, material faltante</p>	
<p>3.Grietas transversales</p> <p>metros</p>	<p>B,M,A sss= sello</p>	
<p>4.Grietas longitudinales</p> <p>Metros</p>	<p>B,M,A sss= sello</p>	

<p>5.a Sello de juntas dañado transversales Número</p>	<p>B,M,A</p>	
<p>5.b Sello de junta dañado longitudinal Número</p>	<p>B,M,A</p>	
<p>6.Despostillamiento de junta transversal Número juntas y longitud</p>	<p>B,M,A</p>	
<p>7.Despostillamiento de junta longitudinal Número juntas y longitud</p>	<p>B,M,A</p>	
<p>8.a Mapeo</p>	<p>Sin severidad</p>	
<p>8.Peladuras Metros cuadrados</p>	<p>Sin severidad</p>	

9.Aragado pulido		Sin severidad	
Número			
10.Popouts	Sin severidad		
Número			
11.Levantamiento de borde		Sin severidad	
Número			
12.Escalonamiento de juntas y grietas transversales	Sin símbolo		
13.Descenso de hombros		Sin símbolo	
14.Separacion de hombros pavimentos	Sin símbolo		
15.Parches	B,M,A		
Metros cuadrados y	F= flexible		
Número	R= rígido		

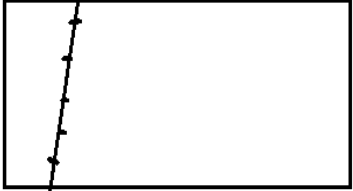
<p>14. Bombeo de agua y finos</p> <p>Número de ocurrencias y longitud afectada</p>	<p>Sin severidad</p>	
--	----------------------	---

Tabla 4.5: Deterioro de Pavimentos Rígidos y su simbología

III. Llenado de fichas de datos

Pavimento de concreto

Las fallas observadas se registran en escala en el croquis. Las fallas individuales y los niveles de severidad indicados en el croquis se miden y suman para obtener las cantidades apropiadas y se registran luego en fichas. Si un tipo de falla no existe se debe registrar como "0" como una indicación positiva que la falla fue tomada en cuenta al resumir el croquis.

El escalonamiento se mide transversalmente en dos posiciones, a 0.3 y 0.75m del borde externo del pavimento. En cada punto se hacen tres medidas, pero se registra el promedio redondeado al milímetro. Las medidas comienzan en el inicio de la zona y se toman cada 10.00 m. si la losa de aproximación es más alta que la losa de salida, se supone un signo positivo, pero no se indica. Si la losa de aproximación es más baja, se coloca un signo negativo.

El descenso de berma se mide como la diferencia de cota, redondeado al mm, entre la superficie del pavimento y la superficie del hombro adyacente. Las medidas comienzan en el inicio de la zona y se toman cada 10.00m, en cada punto se harán 3 medidas, pero se registrará el promedio de ellas.

El descenso de hombro ocurre típicamente por un asentamiento del hombro. Se supone un valor positivo. Sin embargo se puede presentar un levantamiento del hombro debido a hinchamientos del suelo o la acción de heladas. En este caso, el valor debe llevar signo negativo (-).

La separación hombro-pavimento es el ancho de la junta entre la pista externa y el hombro de de la superficie adyacente. Las mediciones se hacen cada 10m, comenzando en el inicio de la zona de inspección.

El levantamiento de los datos de terreno se registra en fichas como las mostradas en la figura 4.2, donde se dibujan los deterioros a escala, junto con características de severidad estas fichas son posteriormente procesadas obteniendo así la condición actual del pavimento.

Levantamiento de Deterioros
Autopista a Comalapa, entre Santo Tomas y Olocuilta - Km 19 al 23
Mayo, 2011

The figure displays three identical, vertically oriented grid-based forms for field data collection. Each form consists of a grid with a vertical axis on the left side, labeled with numerical values: 0.00, 1.00, 2.00, 3.00, and 3.65. The horizontal axis is divided into 20 equal-width columns. Below each grid, there are two horizontal lines for additional notes or observations.

Figura 4.4 Hoja de trabajo de campo para levantamiento de deterioros

La metodología se divide en tres etapas importantes:

- Visita al tramo de prueba para una inspección visual

Se realizaron dos visitas de inspección una dirigida por los asesores de la universidad nacional tomando incluso coordenadas geodésicas con GPS del tramo de inicio y final, logrando obtener nuestro tramo de prueba en los kilómetros del 19, 20, 21 y 22 de la Autopista Comalapa en los sentidos de Santo Tomás-Olocuilta y de Olocuilta-Santo Tomás, visita realizada el día Martes 3 de Mayo de 2011. La segunda visita guiada por nuestro asesor externo del Instituto del Cemento y el Concreto en fecha miércoles 4 de mayo de 2011, confirmando el tramo y los sentidos.

- Llenado de croquis en campo

El levantamiento de deterioros se realizó siguiendo la metodología descrita anteriormente, utilizando señalización adecuada para el desvío del tráfico y con colaboración de la policía de seguridad vial para el formalismo de la desviación del tráfico, se realizó en jornadas de 7 de la mañana hasta las 5 de la tarde tomando un total de 7 días entre las semanas del 6 de mayo hasta el 15 de mayo de 2011, los días 6,7,8 y 9 de mayo se logró obtener el levantamiento de deterioros del sentido Santo Tomas-Olocuilta carril derecho, y los días 13, 14 y 15 de Mayo se obtuvo los datos del levantamiento de deterioros del sentido Olocuilta-Santo Tomás carril derecho, luego se trabajó en ambos sentidos los carriles izquierdos entre los días 9, 10 y 23, 24 de Julio tomando un total de 4 días y cubriendo así el levantamiento de deterioros de todas las losas de tramo de prueba (ver tabla 4.6 de trabajo de campo)

logrando obtener los datos de todos los deterioros presentados en la carretera y para lo cual se presentan en anexos estos archivos.

TABLA 4.3 TRABAJO DE CAMPO EN LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS	
DIA	DESCRIPCION
SENTIDO SANTO TOMAS - OLOCUILTA CARRIL DERECHO	
6 DE MAYO	Levantamiento de deterioros, utilizando equipo del Instituto del Cemento y Concreto ISCYC como vehículo, conos y chalecos reflectivos, y vehículo particular los fines de semana, acompañados también de compañeros voluntarios a ayudar en el trabajo de campo
7 DE MAYO	
8 DE MAYO	
9 DE MAYO	
SENTIDO OLOCUILTA- SANTO TOMAS CARRIL DERECHO	
13 DE MAYO	Levantamiento de deterioros, utilizando equipo del Instituto del Cemento y Concreto ISCYC como vehículo, conos y chalecos reflectivos, y vehículo particular los fines de semana, acompañados también de compañeros voluntarios a ayudar en el trabajo de campo
14 DE MAYO	
15 DE MAYO	
SENTIDO OLOCUILTA- SANTO TOMAS CARRIL IZQUIERDO	
9 DE JULIO	Levantamiento de deterioros, utilizando equipo del Instituto del Cemento y Concreto ISCYC como conos y chalecos reflectivos, y vehículo particular los fines de semana, acompañados también de compañeros voluntarios a ayudar en el trabajo de campo
10 DE JULIO	
SENTIDO SANTO TOMAS - OLOCUILTA CARRIL IZQUIERDO	
23 DE JULIO	Levantamiento de deterioros, utilizando equipo del Instituto del Cemento y Concreto ISCYC como conos y chalecos reflectivos, y vehículo particular los fines de semana, acompañados también de compañeros voluntarios a ayudar en el trabajo de campo
24 DE JULIO	

Tabla 4.6: Trabajo de campo.

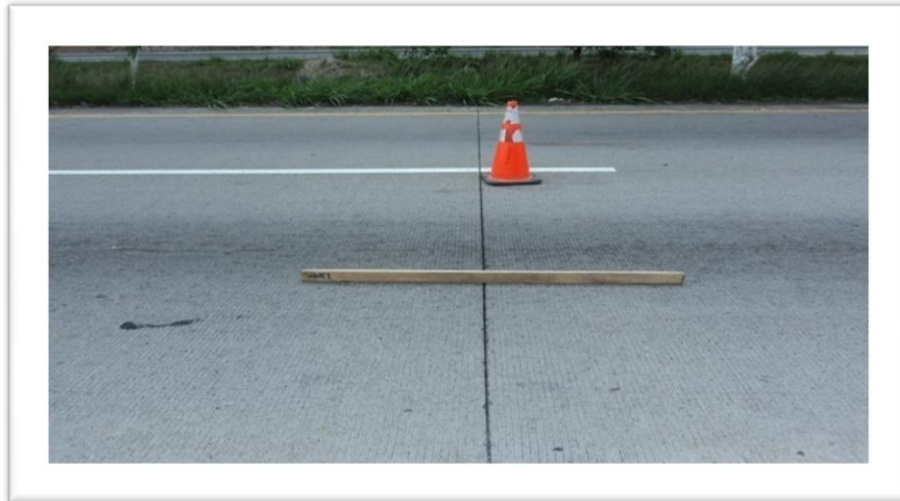


FIGURA 4.5: Medición de Escalonamiento en campo.



FIGURA 4.6: Despostillamiento visto en levantamiento de deterioros.

- Elaboración de tabla resumen de datos del levantamiento

El llenado de las hojas de resumen de los datos se realizó en oficina haciendo primero un conteo de los datos manual, y analizando los datos que fueran acordes a la realidad y apegados a los criterios utilizados en el campo, la tabulación de estos datos se realizó en las semanas siguientes obteniendo los datos finales para la semana del 6 al 10 de Junio. Los cuales se presentan a continuación.

4.2.2 Resultados del levantamiento de deterioros

A continuación se presentan los resultados obtenidos después de un trabajo de oficina, haciendo un resumen de los deterioros levantados en el tramo de prueba, por lo que se presentan las tablas resumen para cada carril en cada sentido:

RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS

SENTIDO SANTO TOMÀS – OLOCUILTA

CARRIL DERECHO

HOJA 1**LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON JUNTAS**

Nombre de la carretera: Autopista Comalapa (Ruta Nacional 05)

Tramo: Entre Santo Tomas y Olocuita (Kilómetro 19, 20, 21 y 22)

Sentido: Santo Tomás - Olocuilta

Carril: Derecho

Fecha del levantamiento: Mayo de 2011

TIPO DE DETERIORO	NIVEL DE SEVERIDAD		
	BAJO	MEDIO	ALTO
AGRIETAMIENTO			
1. Rotura de Esquina			
Número de losas afectadas	78	6	2
Número de roturas	85	6	2
2. Agrietamiento Oblicuo	0	0	0
3. Agrietamiento Longitudinal			
Número de losas afectadas	96	4	4
Número de grietas	134	4	4
Longitud en metros	258	9.7	5.3
Longitud sellada en metros	0	5.2	4.3
4. Agrietamiento transversal			
Número de losas afectadas	35	4	4
Número de grietas	49	7	5
Longitud en metros	68.20	13.60	13.20
Longitud sellada en metros	0	0	8
DEFICIENCIAS DE LAS JUNTAS			
5a. Sello dañado en junta transversal			
Número de juntas	10	1	879
5b. Sello dañado en junta longitudinal			
Número de juntas	5	48	1725
6. Desportillamiento de juntas longitudinales			
Número de juntas afectadas	423	20	2
7. Desportillamiento de juntas transversales			
Número de juntas afectadas	761	14	3

Tabla 4.7: Hoja N°1 sentido Santo Tomas Olocuilta, carril derecho.

HOJA 2LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON JUNTAS

Nombre de la carretera: Autopista Comalapa (Ruta Nacional 05)

Tramo: Entre Santo Tomas y Olocuita (Kilómetro 19, 20, 21 y 22)

Sentido: Santo Tomás - Olocuilta

Carril: Derecho

Fecha del levantamiento: Mayo de 2011

TIPO DE DETERIORO	NIVEL DE SEVERIDAD		
	BAJO	MEDIO	ALTO
DEFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE			
8a. Agrietamiento tipo mapa			
Número		0	
Metros cuadrados		0	
8b. Escamadura			
Número		0	
Metros cuadrados		0	
9. Agregado pulido			
Metros cuadrados		591	
10. Desprendimientos			
Número de losas afectadas		190	
OTROS DETERIOROS			
11. Estallamientos			
Número		0	
12. Escalonamiento de juntas transversales y grietas (Ver hoja 3)			
13. Hundimiento carril hombro(Ver hoja 4)			
14. Separación carril hombro (Ver hoja 4)			
15. Bacheo			
Número	3	0	0
Metros cuadrados	1.83	0	0
16. Sangrado de agua y bombeo			
Número de ocurrencias		0	
Longitud afectada		0	
Metros cuadrados		0	
17. Otros (describir)	-----	-----	-----

Tabla 4.8: Hoja N°2 sentido Santo Tomas Olocuilta, carril derecho.

HOJA 3**LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS PARA PAVIMENTOS S DE CONCRETO HIDRÁULICO CON JUNTAS**

Nombre de la carretera: Autopista Comalapa (Ruta Nacional 05)
 Tramo: Entre Santo Tomas y Olocuita (Kilómetro 19, 20, 21 y 22) (4 Km)
 Sentido: Santo Tomás - Olocuilta
 Carril: Derecho
 Fecha del levantamiento: Mayo de 2011

12. Escalonamiento de juntas transversales y Grietas

Distancia (m)	Junta o Grieta (J/G)	Longitud de Grieta (m)	Bien sellada (S/N)	Longitud de Desportillamiento de la junta (metros)			Escalonamiento (mm)
				Bajo	Medio	Alto	
0+661.5	G	1	S	-----	-----	-----	3
0+972.0	J	-----	N	0	0	0	+4
1+317.6	J	-----	N	3.65	0	0	+5
1+563.8	J	-----	N	0.40	0	0	+2
2+478.4	J	-----	N	3.65	0	0	+2
3+999.4	J	-----	N	0	0	0	+2

Tabla 4.9: Hoja N°3 sentido Santo Tomas Olocuilta, carril derecho.

RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS

SENTIDO SANTO TOMÀS – OLOCUILTA

CARRIL IZQUIERDO

HOJA 1**LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON JUNTAS**

Nombre de la carretera: Autopista Comalapa (Ruta Nacional 05)

Tramo: Entre Santo Tomas y Olocuita (Kilómetro 19, 20, 21 y 22)

Sentido: Santo Tomás - Olocuilta

Carril: Izquierdo

Fecha del levantamiento: Julio de 2011

TIPO DE DETERIORO	NIVEL DE SEVERIDAD		
	BAJO	MEDIO	ALTO
AGRIETAMIENTO			
1. Rotura de Esquina			
Número de losas afectadas	4	0	0
Número de roturas	4	0	0
2. Agrietamiento Oblicuo	0	0	0
3. Agrietamiento Longitudinal			
Número de losas afectadas	3	0	0
Número de grietas	3	0	0
Longitud en metros	4	0	0
Longitud sellada en metros	0	0	0
4. Agrietamiento transversal			
Número de losas afectadas	5	1	0
Número de grietas	5	1	0
Longitud en metros	15.45	2.60	0
Longitud sellada en metros	0	0	0
DEFICIENCIAS DE LAS JUNTAS			
5a. Sello dañado en junta transversal			
Número de juntas	0	74	815
5b. Sello dañado en junta longitudinal			
Número de juntas	0	0	1778
6. Desportillamiento de juntas longitudinales			
Número de juntas afectadas	127	0	0
7. Desportillamiento de juntas transversales			
Número de juntas afectadas	468	5	0

Tabla 4.11: Hoja N°1 sentido Santo Tomas Olocuilta, carril izquierdo.

HOJA 2**LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON JUNTAS**

Nombre de la carretera: Autopista Comalapa (Ruta Nacional 05)

Tramo: Entre Santo Tomas y Olocuilta (Kilómetro 19, 20, 21 y 22)

Sentido: Santo Tomás - Olocuilta

Carril: Izquierdo

Fecha del levantamiento: Julio de 2011

TIPO DE DETERIORO	NIVEL DE SEVERIDAD		
	BAJO	MEDIO	ALTO
DEFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE			
8a. Agrietamiento tipo mapa			
Número		5	
Metros cuadrados		3.4	
8b. Escamadura			
Número		0	
Metros cuadrados		0	
9. Agregado pulido			
Metros cuadrados		365.2	
10. Desprendimientos			
Número de losas afectadas		34	
OTROS DETERIOROS			
11. Estallamientos			
Número		0	
12. Escalonamiento de juntas transversales y grietas (Ver hoja 3)			
13. Hundimiento carril hombro(Ver hoja 4)			
14. Separación carril hombro (Ver hoja 4)			
15. Bacheo			
Número	3	0	0
Metros cuadrados	1.61	0	0
16. Sangrado de agua y bombeo			
Número de ocurrencias		0	
Longitud afectada		0	
Metros cuadrados		0	
17. Otros (describir)	-----	-----	-----

Tabla 4.12: Hoja N°2 sentido Santo Tomas Olocuilta, carril izquierdo.

RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS

SENTIDO OLOCUILTA - SANTO TOMÁS

CARRIL DERECHO

HOJA 1**LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON JUNTAS**

Nombre de la carretera: Autopista Comalapa (Ruta Nacional 05)

Tramo: Entre Santo Tomas y Olocuita (Kilómetro 19, 20, 21 y 22)

Sentido: Olocuilta - Santo Tomás

Carril: Derecho

Fecha del levantamiento: Mayo de 2011

TIPO DE DETERIORO	NIVEL DE SEVERIDAD		
	BAJO	MEDIO	ALTO
AGRIETAMIENTO			
1. Rotura de Esquina			
Número de losas afectadas	49	2	1
Número de roturas	52	2	1
2. Agrietamiento Oblicuo	0	0	0
3. Agrietamiento Longitudinal			
Número de losas afectadas	73	1	0
Número de grietas	97	1	0
Longitud en metros	173.9	3.2	0
Longitud sellada en metros	0	0	0
4. Agrietamiento transversal			
Número de losas afectadas	25	1	4
Número de grietas	36	1	5
Longitud en metros	50.95	3.65	13.95
Longitud sellada en metros	0	0	0
DEFICIENCIAS DE LAS JUNTAS			
5a. Sello dañado en junta transversal			
Número de juntas	4	14	882
5b. Sello dañado en junta longitudinal			
Número de juntas	180	234	1364
6. Desportillamiento de juntas longitudinales			
Número de juntas afectadas	296	0	0
7. Desportillamiento de juntas transversales			
Número de juntas afectadas	813	0	0

Tabla 4.15: Hoja N°1 sentido Olocuilta Santo Tomas, carril derecho.

*El sello dañado de junta longitudinal en esta tabla toma en cuenta la junta longitudinal central y la que está junto al hombro derecho, la junta longitudinal del hombro izquierdo esta en el conteo del otro carril de este mismo sentido.

HOJA 2**LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON JUNTAS**

Nombre de la carretera: Autopista Comalapa (Ruta Nacional 05)

Tramo: Entre Santo Tomas y Olocuita (Kilómetro 19, 20, 21 y 22)

Sentido: Olocuilta - Santo Tomás

Carril: Derecho

Fecha del levantamiento: Mayo de 2011

TIPO DE DETERIORO	NIVEL DE SEVERIDAD		
	BAJO	MEDIO	ALTO
DEFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE			
8a. Agrietamiento tipo mapa			
Número		202	
Metros cuadrados		447.9	
8b. Escamadura			
Número		0	
Metros cuadrados		0	
9. Agregado pulido			
Metros cuadrados		582.86	
10. Desprendimientos			
Número de losas afectadas		108	
OTROS DETERIOROS			
11. Estallamientos			
Número		0	
12. Escalonamiento de juntas transversales y grietas (Ver hoja 3)			
13. Hundimiento carril hombro(Ver hoja 4)			
14. Separación carril hombro (Ver hoja 4)			
15. Bacheo			
Número	9	0	1
Metros cuadrados	3.635	0	0.5
16. Sangrado de agua y bombeo			
Número de ocurrencias		0	
Longitud afectada		0	
Metros cuadrados		0	
17. Otros (describir)	0	0	0

Tabla 4.16: Hoja N°2 sentido Olocuilta Santo Tomas, carril derecho.

HOJA 3**LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON JUNTAS**

Nombre de la carretera: Autopista Comalapa (Ruta Nacional 05)
 Tramo: Entre Santo Tomas y Olocuita (Kilómetro 19, 20, 21 y 22) (4 Km)
 Sentido: Olocuilta - Santo Tomás
 Carril: Derecho
 Fecha del levantamiento: Mayo de 2011

12. Escalonamiento de juntas transversales y Grietas

Distancia (m)	Junta o Grieta (J/G)	Longitud de Grieta (m)	Bien sellada (S/N)	Longitud de Desportillamiento de la junta (metros)			Escalonamiento (mm)
				Bajo	Medio	Alto	
0+50	J	-----	N	3.65	0	0	+2
0+243	J	-----	N	3.65	0	0	+2
0+342	J	-----	N	3.65	0	0	+3
0+625	J	-----	N	3.65	0	0	+4
0+639	J	-----	N	3.65	0	0	+2
1+089	J	-----	N	3.65	0	0	+2
1+948	J	-----	N	3.65	0	0	+2
1+953.5	J	-----	N	3.65	0	0	+2
1+957.5	J	-----	N	3.65	0	0	+3
1+966.5	J	-----	N	3.65	0	0	+2
2+070	J	-----	N	3.65	0	0	+3
2+322	J	-----	N	3.65	0	0	+4
2+434.5	J	-----	N	3.65	0	0	+2
2+799	J	-----	N	3.65	0	0	+3
3+568.5	J	-----	N	3.65	0	0	+2
3+919.5	J	-----	N	3.65	0	0	+4

Tabla 4.17: Hoja N°3 sentido Olocuilta Santo Tomas, carril derecho.

HOJA 4**LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON JUNTAS**

Nombre de la carretera: Autopista Comalapa (Ruta Nacional 05)

Tramo: Entre Santo Tomas y Olocuita (Kilómetro 19, 20, 21 y 22) (4 Km)

Sentido: Olocuilta - Santo Tomás

Carril: Derecho

Fecha del levantamiento: Mayo de 2011

13. Hundimiento de carril hombro

14. Separación carril hombro

PUNTO	DISTANCIA (m)	Hundimiento carril hombro (mm)	Separación carril hombro (mm)	Bien sellada (S/N)
2+533.5	1.5	3	-----	N
2+538	1.0	3	-----	N

Tabla 4.18: Hoja N°4 sentido Olocuilta Santo Tomas, carril derecho.

RESULTADOS DEL LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS

SENTIDO OLOCUILTA - SANTO TOMÁS

CARRIL IZQUIERDO

HOJA 1**LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON JUNTAS**

Nombre de la carretera: Autopista Comalapa (Ruta Nacional 05)

Tramo: Entre Santo Tomas y Olocuita (Kilómetro 19, 20, 21 y 22)

Sentido: Olocuilta - Santo Tomás

Carril: Izquierdo

Fecha del levantamiento: Mayo de 2011

TIPO DE DETERIORO	NIVEL DE SEVERIDAD		
	BAJO	MEDIO	ALTO
AGRIETAMIENTO			
1. Rotura de Esquina			
Número de losas afectadas	5	0	0
Número de roturas	5	0	0
2. Agrietamiento Oblicuo	0	0	0
3. Agrietamiento Longitudinal			
Número de losas afectadas	18	0	0
Número de grietas	25	0	0
Longitud en metros	25.3	0	0
Longitud sellada en metros	0	0	0
4. Agrietamiento transversal			
Número de losas afectadas	8	1	1
Número de grietas	10	1	1
Longitud en metros	11.5	4	4.5
Longitud sellada en metros	0	0	0
DEFICIENCIAS DE LAS JUNTAS			
5a. Sello dañado en junta transversal			
Número de juntas	44	157	696
5b. Sello dañado en junta longitudinal *			
Número de juntas	0	0	990
6. Desportillamiento de juntas longitudinales			
Número de juntas afectadas	93	0	0
7. Desportillamiento de juntas transversales			
Número de juntas afectadas	514	16	0

Tabla 4.19: Hoja N°1 sentido Olocuilta Santo Tomas, carril izquierdo.

*Solo es considerado el daño del sello de la junta longitudinal del hombro izquierdo por que la junta longitudinal central y la del carril hombro derecho ya están consideradas en el conteo del carril derecho del sentido Olocuilta- Santo Tomás.

HOJA 2**LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON JUNTAS**

Nombre de la carretera: Autopista Comalapa (Ruta Nacional 05)

Tramo: Entre Santo Tomas y Olocuita (Kilómetro 19, 20, 21 y 22)

Sentido: Olocuilta - Santo Tomás

Carril: Izquierdo

Fecha del levantamiento: Mayo de 2011

TIPO DE DETERIORO	NIVEL DE SEVERIDAD		
	BAJO	MEDIO	ALTO
DEFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE			
8a. Agrietamiento tipo mapa			
Número		10	
Metros cuadrados		10	
8b. Escamadura			
Número		0	
Metros cuadrados		0	
9. Agregado pulido			
Metros cuadrados		163.5	
10. Desprendimientos			
Número de losas afectadas		29	
OTROS DETERIOROS			
11. Estallamientos			
Número		0	
12. Escalonamiento de juntas transversales y grietas (Ver hoja 3)			
13. Hundimiento carril hombro(Ver hoja 4)			
14. Separación carril hombro (Ver hoja 4)			
15. Bacheo			
Número	12	2	0
Metros cuadrados	4.37	2	0
16. Sangrado de agua y bombeo			
Número de ocurrencias		0	
Longitud afectada		0	
Metros cuadrados		0	
17. Otros (describir)	0	0	0

Tabla 4.20: Hoja N°2 sentido Olocuilta Santo Tomas, carril izquierdo.

HOJA 4**LEVANTAMIENTO DE DETERIOROS PARA PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON JUNTAS**

Nombre de la carretera: Autopista Comalapa (Ruta Nacional 05)

Tramo: Entre Santo Tomas y Olocuita (Kilómetro 19, 20, 21 y 22) (4 Km)

Sentido: Olocuilta - Santo Tomás

Carril: Izquierdo

Fecha del levantamiento: Mayo de 2011

13. Hundimiento de carril hombro

14. Separación carril hombro

PUNTO	DISTANCIA (m)	Hundimiento carril hombro (mm)	Separación carril hombro (mm)	Bien sellada (S/N)
1+219	9	10	0	N
1+593	2.5	5	0	N
1+683	3	10	0	N
1+692	3	8	0	N

Tabla 4.22: Hoja N°4 sentido Olocuilta Santo Tomas, carril izquierdo.

4.3. TRABAJO DE CAMPO CON PERFILÓMETRO LÁSER.

4.3.1 Metodología utilizada para realizar los trabajos.

I. Metodología para la medición del Índice de Rugosidad Internacional:

La medición de los trabajos de perfilometría se realizó con el Perfilómetro láser, RSP marca Dynatest, modelo 5051 Mark III, clasificado como clase 1 de acuerdo a ASTM E 950-98 (Standard Test Method For Measuring The Longitudinal Profile Of Traveled Surfaces With An Accelerometer Established Inertial Profiling Reference), de la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial (UIDV) del Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano.

El método de ensayo se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones indicadas en la especificación y normas de ensayo que se indican a continuación:

- 1) AASHTO PP-37 Standard Practice for Quantifying Roughness of pavements.
- 2) ASTM E 950 Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Establish Inertial Profiling reference.
- 3) AASHTO R36-04 (2009) Standard Practice for Evaluating Faulting of Concrete Pavements.

Inicialmente se colocó una cinta reflectiva en el inicio y final del tramo en análisis con el fin de que el equipo se active y desactive automáticamente al pasar por esa cinta logrando tener definido exactamente el tramo en análisis.

Luego de establecer los límites del tramo se procede a definir algunos parámetros para que el equipo realice las mediciones, tales como:

- Calcular el IRI para cada carril de la Autopista a Comalapa, programando el equipo para que lo calculara a cada 100.00m, para luego hacer un promedio y tener un valor de IRI para cada carril.
- Se definió utilizar para la medición una velocidad de 60 km/h, logrando mantenerla constante a lo largo del trayecto de medición.



FIGURA 4.7 Perfilómetro laser utilizado para la medición del Índice de Rugosidad Internacional y Escalonamiento.



FIGURA 4.8 Preparación de Perfilómetro laser utilizado para la medición del Índice de Rugosidad Internacional y Escalonamiento.

II. Metodología para la medición del escalonamiento:

Además de la medición del IRI, el Perfilómetro Láser mide el escalonamiento en el tramo de análisis para lo cual se definieron los siguientes parámetros:

- Longitud en losa de acercamiento: 150.00 mm
- Longitud en zona de escalonamiento: 10.00 mm
- Longitud en losa de salida: 150.00 mm
- Escalonamiento mínimo: 3.00 mm

4.3.3 Resultados Obtenido para Índice de Rugosidad Internacional

REGISTRO DE IRI							
LATERAL DERECHO (SENTIDOSAN SALVADOR -AEROPUERTO)							
ESTACIONAMIENTOS		Carril Externo			Carril Interno		
		Valores de IRI(m/km)			Valores de IRI(m/km)		
		Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas	Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas
0+000	0+100	2.52	2.71	2.62	2.25	2.38	2.32
0+100	0+200	1.83	1.81	1.82	1,98	1.94	1.94
0+200	0+300	2.44	2.13	2.29	2.17	2.27	2.22
0+300	0+400	2.17	2.04	2.11	2.52	2.15	2.34
0+400	0+500	2.03	2	2.02	2.13	2.18	2.16
0+500	0+600	2.35	2.44	2.4	2.25	2.16	2.21
0+600	0+700	2.24	2.51	2.38	2	2.27	2.27
0+700	0+800	1.98	2.25	2.12	1.89	2.09	1.99
0+800	0+900	1.86	2.26	2.06	2.04	2	2.02
0+900	1+000	2.39	2.23	2.31	2.4	2.43	2.42
1+000	1+100	2.55	2.43	2.49	2.21	2.4	2.31
1+100	1+200	2.63	2.29	2.46	2.64	2.33	2.49
1+200	1+300	2.71	2.3	2.51	2.49	2.61	2.55
1+300	1+400	2.54	2.28	2.41	2.27	2.12	2.57
1+400	1+500	2.37	2.35	2.36	2.2	2.3	2.25
1+500	1+600	2.81	2.74	2.78	2.47	2.34	2.41
1+600	1+700	2.75	2.63	2.69	2.7	2.71	2.71
1+700	1+800	2.69	2.5	2.6	2.45	2.21	2.33
1+800	1+900	2.88	3.01	2.95	3.09	2.97	3.03
1+900	2+000	3.01	2.88	2.95	2.99	3.33	3.16
2+000	2+100	2.52	2.35	2.44	2.61	2.92	2.77
2+100	2+200	2.56	2.82	2.69	2.45	3.2	2.83
2+200	2+300	2.63	2.77	2.7	2.82	2.97	2.9
2+300	2+400	3.03	3.09	3.06	2.97	2.8	2.89
2+400	2+500	3.03	2.91	2.97	2.81	2.67	2.74
2+500	2+600	2.67	2.54	2.61	2.3	2.18	2.24

Tabla 4.23: Registros de IRI lateral derecho.

REGISTRO DE IRI							
LATERAL DERECHO (SENTIDOSAN SALVADOR -AEROPUERTO) Continuación...							
ESTACIONAMIENTOS		Carril Externo			Carril Interno		
		Valores de IRI(m/km)			Valores de IRI(m/km)		
		Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas	Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas
2+600	2+700	2.87	2.44	2.66	2.37	2.03	2.2
2+700	2+800	2.69	2.35	2.52	2.59	2.47	2.53
2+800	2+900	2.74	2.22	2.48	2.86	2.1	2.48
2+900	3+000	2.77	2.45	2.61	2.76	2.38	2.57
3+000	3+100	3.55	3.19	3.37	3.3	3.11	3.21
3+100	3+200	2.6	2.44	2.52	2.68	2.75	2.72
3+200	3+300	2.98	2.55	2.77	2.87	2.75	2.81
3+300	3+400	2.89	2.51	2.7	2.77	2.91	2.84
3+400	3+500	2.95	2.7	2.83	2.71	2.86	2.79
3+500	3+600	3	3.19	3.1	3.28	3.38	3.33
3+600	3+700	3.34	3.18	3.26	3.09	2.88	2.99
3+700	3+800	2.72	2.66	2.69	2.74	2.69	2.72
3+800	3+900	3.55	3.46	3.51	3.13	3.57	3.35
3+900	4+000	3.35	2.73	3.04	3.08	2.78	2.93
4+000	4+100	3.17	2.82	3	-----	-----	-----

Tabla 4.24: Continuación de Registro IRI lateral derecho.

LATERAL IZQUIERDO (SENTIDO AEROPUERTO-SAN SALVADOR)							
ESTACIONAMIENTOS		Carril Externo			Carril Interno		
		Valores de IRI(m/km)			Valores de IRI(m/km)		
		Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas	Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas
4+100	4+000	3.38	3.51	3.45	-----	-----	-----
4+000	3+900	3.42	3.31	3.37	3.61	3.62	3.62
3+900	3+800	3.73	3.8	3.77	3.24	3.25	3.25
3+800	3+700	3.77	3.99	3.88	3.79	3.24	3.52
3+700	3+600	4.4	3.89	4.15	3.25	3.1	3.18
3+600	3+500	3.26	3.56	3.41	3.33	2.91	3.12
3+500	3+400	2.57	2.68	2.63	2.63	2.53	2.58
3+400	3+300	3.32	3.27	3.3	2.7	2.49	2.6
3+300	3+200	2.8	2.96	2.88	2.46	2.62	2.54
3+200	3+100	3.29	2.84	3.07	2.25	2.41	2.33
3+100	3+000	3.07	3.16	3.12	2.83	2.66	2.75
3+000	2+900	2.81	2.81	2.81	2.84	2.57	2.71
2+900	2+800	2.37	2.75	2.56	2.49	2.53	2.51
2+800	2+700	2.53	2.52	2.53	2.71	2.67	2.69
2+700	2+600	2.32	2.85	2.59	2.34	2.53	2.44
2+600	2+500	2.73	2.76	2.75	2.38	2.49	2.44
2+500	2+400	3.13	2.73	2.93	2.83	2.49	2.66
2+400	2+300	3.49	3.04	3.27	2.91	3.1	3.01
2+300	2+200	3.14	2.89	3.02	3.01	3.19	3.1
2+200	2+100	3.15	2.46	2.81	2.98	2.9	2.94
2+100	2+00	2.84	3.26	3.05	2.82	2.7	2.76
2+000	1+900	3.26	2.81	3.04	3.38	3.1	3.24
1+900	1+800	2.94	2.71	2.84	3.58	3.14	3.36
1+800	1+700	2.45	2.89	2.67	3.15	2.83	2.99
1+700	1+600	2.78	2.67	2.73	2.82	2.89	2.86
1+600	1+500	3.26	2.55	2.91	2.84	2.75	2.8
1+500	1+400	2.81	2.44	2.63	2.94	2.85	2.9
1+400	1+300	2.86	2.79	2.83	2.84	3.05	2.95
1+300	1+200	2.93	2.81	2.87	2.74	2.88	2.81
1+200	1+100	3	2.48	2.74	2.81	2.69	2.75
1+100	1+000	2.85	2.41	2.63	2.9	2.56	2.73

Tabla 4.25: Registros IRI lateral Izquierdo.

LATERAL IZQUIERDO (SENTIDO AEROPUERTO-SAN SALVADOR) Continuación....							
ESTACIONAMIENTOS		Carril Externo			Carril Interno		
		Valores de IRI(m/km)			Valores de IRI(m/km)		
		Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas	Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas
0+900	0+800	1.94	2.2	2.07	2.6	2.39	2.5
0+800	0+700	2.33	2.19	2.26	2.16	2.2	2.18
0+700	0+600	2.32	2.22	2.27	2.49	2.4	2.45
0+600	0+500	2.24	1.98	2.11	2.8	2.54	2.67
0+500	0+400	2.1	2	2.05	2.35	2.2	2.28
0+400	0+300	2.15	1.75	1.95	2.89	2.6	2.75
0+300	0+200	1.86	1.72	1.79	2.43	2.25	2.34
0+200	0+100	2.18	2.33	2.26	2.53	2.37	2.45
0+100	0+000	2.1	2.05	2.08	1.99	2	2

Tabla 4.26: Continuación Registro IRI lateral izquierdo.

4.3.2.1 Resumen de IRI obtenido en medición.

Sentido Santo Tomás – Olocuilta		Sentido Olocuilta – Santo Tomás	
Carril Derecho	Carril Izquierdo	Carril Derecho	Carril Izquierdo
2.750	2.703	2.724	2.709

Tabla 4.27: Resumen de IRI obtenido en mediciones.

Resultados Obtenido para el escalonamiento.

LATERAL DERECHO				
Carril Externo				
Estación	Rodera Izquierda (mm)	Linea Central del carril (mm)	Rodera Izquierda (mm)	Estacionamiento Promedio (mm)
1+000.19	4	3.1	3.8	3.6
1+349.26	4.4	4.5	4.1	4.3
1+597.38	3.8	0	3.8	3.8
1+918.54	-3.7	-3.8	0	-3.8
1+926.19	5.1	-4.6	0	0.3
1+929.62	-4.6	-4.9	0	-4.8
1+932.96	-4	-4.6	-3.7	-4.1
1+936.08	-3.3	-4.6	3.6	-1.4
1+941.71	-4	0	-3.9	-4
1+946.51	-4.6	0	-4.6	-4.6
1+948.64	-4.2	-4.8	-4.1	-4.4
1+950.56	-4.8	0	-4.1	-4.5
1+952.37	-5.3	-4.6	-4.2	-4.7

Tabla 4.28: Registro de Escalonamiento lateral derecho carril externo.

LATERAL DERECHO				
Carril Externo (Continuación)				
Estación	Rodera Izquierda (mm)	Línea Central del carril (mm)	Rodera Izquierda (mm)	Estacionamiento Promedio(mm)
1+954.06	-3.7	-3.8	-3	-3.5
1+955.68	-4.3	0	-4.1	-4.2
1+957.13	-5	-4.8	0	-4.9
1+958.72	4.4	0	4.3	4.3
1+960.01	-4.5	-4.8	-3.4	-4.2
1+961.36	-4.1	-4.9	-3.6	-4.2
1+962.65	-5.2	-4.5	0	-4.8
1+963.94	4.7	-3.6	-3.3	-0.7
1+965.14	-3.3	3.5	-4.4	-1.4
1+966.27	-5	-5.7	-5.3	-5.3
1+967.48	4.6	4.9	0	4.8
1+969.44	-4.5	0	-4.5	-4.5
1+970.47	4.8	-4.2	4.4	1.7
1+972.15	-3.6	-4.7	0	-4.2
1+974.44	0	-5.8	-3.4	-4.6
1+975.71	0	-6.7	-6.5	-6.6
1+976.76	0	-5.6	-6.3	-6
1+978.34	0	3.9	-3.6	0.2
1+526.51	4.5	0	4.3	4.4
1+097.72	4.5	0	3.7	4.1

Tabla 4.29: Continuación de Registro escalonamiento lateral derecho carril externo.

LATERAL DERECHO				
Carril Interno				
Estación	Rodera Izquierda (mm)	Línea Central del carril (mm)	Rodera Izquierda (mm)	Estacionamiento Promedio(mm)
0+012.412	6.5	4.9	0	5.7
1+900.777	-5.1	6.6	-6.1	-1.5
1+904.488	-3.6	0	5	0.7
1+907.881	3.4	0	-5.2	-0.9
1+911.213	0	5.3	-5.6	-0.2
1+914.203	-4.8	-4.8	5.5	-1.4
1+917.112	-5.4	-6.1	-6.2	-5.9
1+919.874	-4	-5.1	5.5	-1.2
1+924.644	-4.5	-4.9	-4.6	-4.7
1+926.772	-5	-5.1	5.3	-1.6
1+928.666	-4.4	-4.8	-3.9	-4.4
1+932.072	-4.7	0	-4	-4.3
1+933.647	-5.3	0	-4.7	-5
1+935.109	-4.3	-5.3	4.7	-1.6
1+936.623	5.3	6	-5.3	2
1+938.032	5.8	6.1	5.5	5.8
1+939.322	5.5	-6	-5.1	-1.9
1+940.565	5.9	-5.8	-5	-1.6
1+941.700	-5.2	0	-3.7	-4.5
1+942.918	0	-5.2	-5.1	-5.2
1+944.078	-5.4	-5.8	0	-5.6
1+945.319	6.4	6.5	5.2	6
1+946.371	4.3	4.7	4.7	4.6
1+948.266	3.8	-5.1	-5.9	-2.4
1+949.90	-4.3	-5.9	0	-5.1
1+951.686	5	5.8	0	5.4
1+953.562	-4.8	4	-4.8	-1.9
1+954.621	-4.7	5.8	-4.2	-1
1+956.142	-4.9	-5	0	-5
4+077.07	5.6	4.7	0	5.2

Tabla 4.30: Registro de escalonamiento lateral Derecho carril interno

LATERAL IZQUIERDO				
Carril Externo				
Estación	Rodera Izquierda (mm)	Línea Central del carril (mm)	Rodera Izquierda (mm)	Estacionamiento Promedio(mm)
0+646.21	-4.4	-3.8	0	-4.1
0+661.08	0	3.1	3.1	3.1
1+002.74	-3.8	0	-3.1	-3.5
1+020.07	5.4	5.6	4.2	5.1
1+051.86	3.3	0	3.7	3.5
1+888.76	-3	4.5	0	0.8
1+950.84	4.7	0	3.3	4
1+961.54	0	3	4.2	3.6
1+962.75	-3.4	0	4.4	0.5
1+973.56	-3.9	0	-3.8	-3.9
2+008.32	3.2	-3.2	0	-3.2
2+021.99	-3.8	-4.2	0	-4
2+028.08	-3.7	-5.3	0	-4.5
2+057.76	0	-5.1	-3.3	-4.2
2+062.00	3	4.3	0	3.7
2+069.57	0	4.6	3.1	3.9
2+072.95	0	-3.7	-3.5	-3.6
2+076.33	3.5	-4.8	0	0.7
2+079.44	-3.2	-3.4	-3.1	-3.2
2+093.04	-3.1	-3.2	-3	-3.1
2+095.48	3.6	-4	0	0.2
2+097.80	3.3	0	3.4	3.4
2+105.90	3	3.8	0	3.4
2+107.52	-6.2	-5.1	4.3	-2.3
2+562.16	5	4.2	5.4	4.9
2+842.83	3	3.7	3.2	3.3
3+437.82	3.4	3.8	3.6	3.6
3+974.38	0	3	4.2	3.6

Tabla 4.31: Registro de escalonamiento lateral izquierdo carril externo.

LATERAL IZQUIERDO				
Carril Interno				
Estación	Rodera Izquierda (mm)	Línea Central del carril (mm)	Rodera Izquierda (mm)	Estacionamiento Promedio(mm)
0+177.01	-3.9	0	-4.3	-4.1
0+581.32	-3.3	-3.4	0	-3.4
1+825.21	4	-4.9	-4.5	-1.8
1+847.86	-4.1	4	3.9	1.3
1+886.31	-3.5	-3.3	-4.3	-3.7
1+902.67	0	-5.2	-4.6	-4.9
1+917.49	3.6	-4.2	-4.2	-1.6
1+942.86	0	4.2	-3.8	0.2
1+953.78	-4.2	-3.7	0	-4
1+963.75	-3.1	-4.1	-3.4	-3.5
1+972.88	-5	0	-3.9	-4.5
1+981.21	-4.1	0	-4.7	-4.4
1+988.96	5	-5.7	-4.7	-1.8
1+996.04	-4.6	3.9	-4.6	-1.8
2+002.63	-5	0	-4.6	-4.8
2+008.89	-5.3	-5.1	-5.3	-5.2
2+014.59	0	-4.4	5.2	-4.8
2+020.13	5.3	-3.5	5.6	2.5
2+0.25.13	-4.5	-4.3	0	-4.4
2+034.67	5.4	-4.8	-5.2	-1.5
2+038.98	0	-3.4	4.8	0.7
2+047.00	-3.4	-3.2	3.3	-1.1
2+050.75	5	3.5	-3.7	1.6
2+054.15	-4.1	-4.3	-4.5	-4.3
2+057.49	-4.6	5.3	-4.7	-4.9
2+060.72	-3.6	0	-3.5	-3.5
2+063.90	3.9	4.9	4.4	1.8
2+066.72	-4.3	-4	-4.5	-4.3
2+069.43	0	-4.5	-4	-4.3
2+072.03	-3.7	5.2	-3.7	-0.7

Tabla 4.32: Registro escalonamiento lateral izquierdo carril interno.

LATERAL IZQUIERDO				
Carril Interno (continuación)				
Estación	Rodera Izquierda (mm)	Línea Central del carril (mm)	Rodera Izquierda (mm)	Estacionamiento Promedio(mm)
2+074.52	-3.1	0	-6	-4.6
2+076.89	-4	0	-4.8	-4.4
2+081.38	-4.9	-4.3	-4.5	-4.6
2+083.49	-5	5.3	-4.8	-5
2+085.43	-4.8	0	-3.9	-4.3
2+087.36	-4.6	4.1	-3.9	-0.3
2+089.03	0	-9.3	0	-8.1
2+502.60	5.4	5.4	-6.8	5.4
2+545.14	3.1	0	3.2	3.2

Tabla 4.33: Continuación Registro escalonamiento lateral izquierdo carril interno.

	Santo Tomás -Olocuilta		Olocuilta - Santo Tomás	
	Carril derecho	Carril izquierdo	Carril derecho	Carril izquierdo
Sumatoria de escalonamientos transversales encontrados (mm)	11.7	10.9	34.7	17.9
Escalonamientos transversales promedio por junta (mm)	0.01317568	0.0122748	0.03907658	0.02015766
Escalonamiento transversal Total de juntas (mm/km)	2.925	2.725	8.675	4.475
Escalonamiento transversal Total de juntas (pulg/milla)	0.185328	0.172656	0.54964801	0.28353601

Tabla 4.34: Resumen de escalonamiento obtenido en medición de campo.

4.4. TRABAJO DE CAMPO CON FWD (FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER)

4.4.1 Metodología utilizada para realizar los trabajos.

Al igual que con el Perfilómetro Láser el equipo utilizado es de la Unidad de Investigación y desarrollo vial (UIDV) del Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano, que es el **Falling Weight Deflectometer (FWD)**, como lo podemos ver en la Imagen 4.20, el FWD de marca dynatest, modelo 8000 y la carga aplicada en ensayo fue de 9000 lb, el diámetro de plato de carga de 30.00 cm y con 9 sensores (geófonos).

La medición de deflexiones fue realizada con base en las recomendaciones indicadas en:

- ✓ ASTM D 4694 Standard Test Method for Deflections with a Falling Weight Type Impulse Load Device.
- ✓ Manual for FWD testing in the Long Term Pavement Performance Program (SHRP-P-661)
- ✓ Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, edición 1993.

La determinación del valor de la eficiencia de la transferencia de carga en juntas transversales, se ha realizado con base en las recomendaciones establecidas en la Guía de Diseño Mecanístico -Empírico de Estructuras de Pavimento AASHTO 2002, parte 2, capítulo 5, sección 2.5.5.8, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia de transferencia de carga} = 100 \times \left(\frac{\Delta u_l}{\Delta l} \right)$$

Δu_l = Deflexión en losa no cargada, a 12 pulgadas del centro del plato de carga.

Δl = Deflexión en losa cargada, bajo el centro del plato de carga.

Los ensayos fueron realizados en el periodo comprendido entre las 8:30 p.m. del 28/06/11 y las 12:30 a.m. del 29/06/11.

En los puntos de ensayo la temperatura ambiente registrada osciló entre 24.19°C y 27.59°C.

Estos ensayos se ejecutaron en condiciones climáticas secas.



FIGURA 4.9: Falling Weight Deflectometer utilizado para realizar los trabajos en el tramo de análisis.

Se realizaron dos tipos de prueba, la primera en el centro de la losa para realizar un retrocálculo y conocer los módulos de las capas, además se realizó la transferencia de carga entre losas. La ubicación y la frecuencia de estos ensayos es tomada de las recomendaciones de la Guía de Diseño Empírica Mecanicista, la cual define un rango de 30.00 – 150.00 m para los ensayos en el centro de la losa, pero especifica que este valor puede ser variado dependiendo del proyecto que se esté realizando, para nuestro Trabajo de Graduación se tomó a bien realizar los trabajos a cada 250.00 m por pista intercalados por carril como se muestra en la figura 4.3. De igual manera para la transferencia de carga se realiza a la misma frecuencia que los ensayos en el centro de la losa, en la rodera derecha tal como se presenta en la figura 4.4.

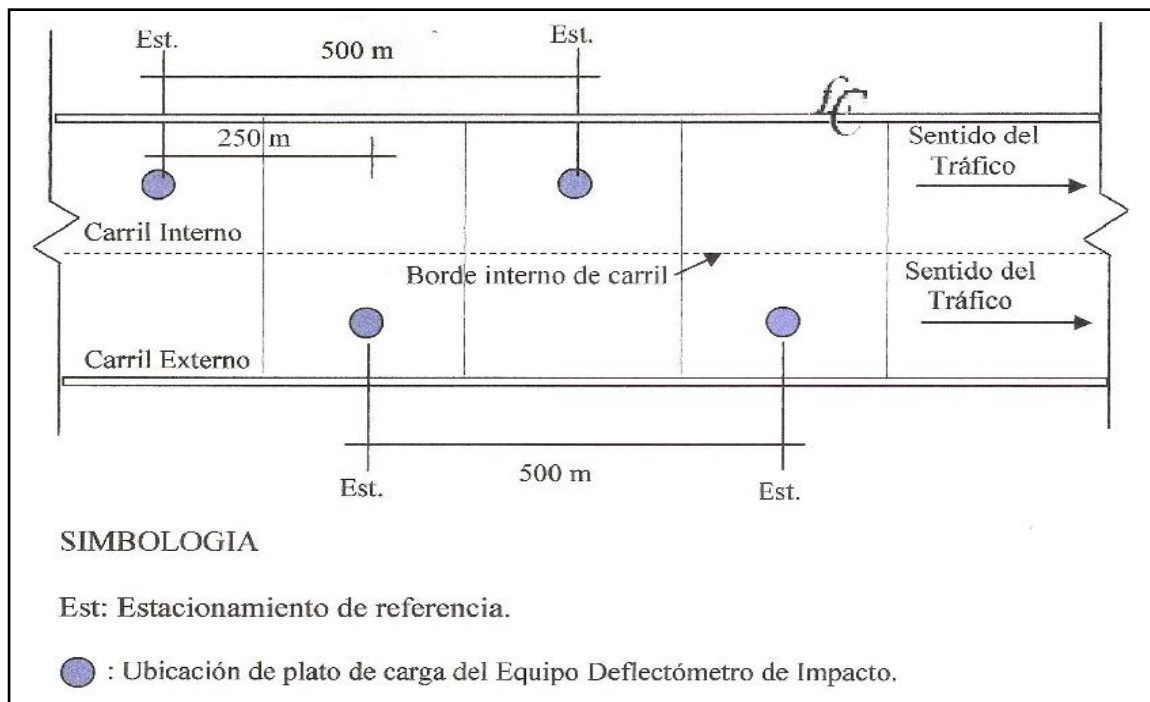


Figura 4.10: Esquema ubicación de ensayos en el centro de la losa con FWD.

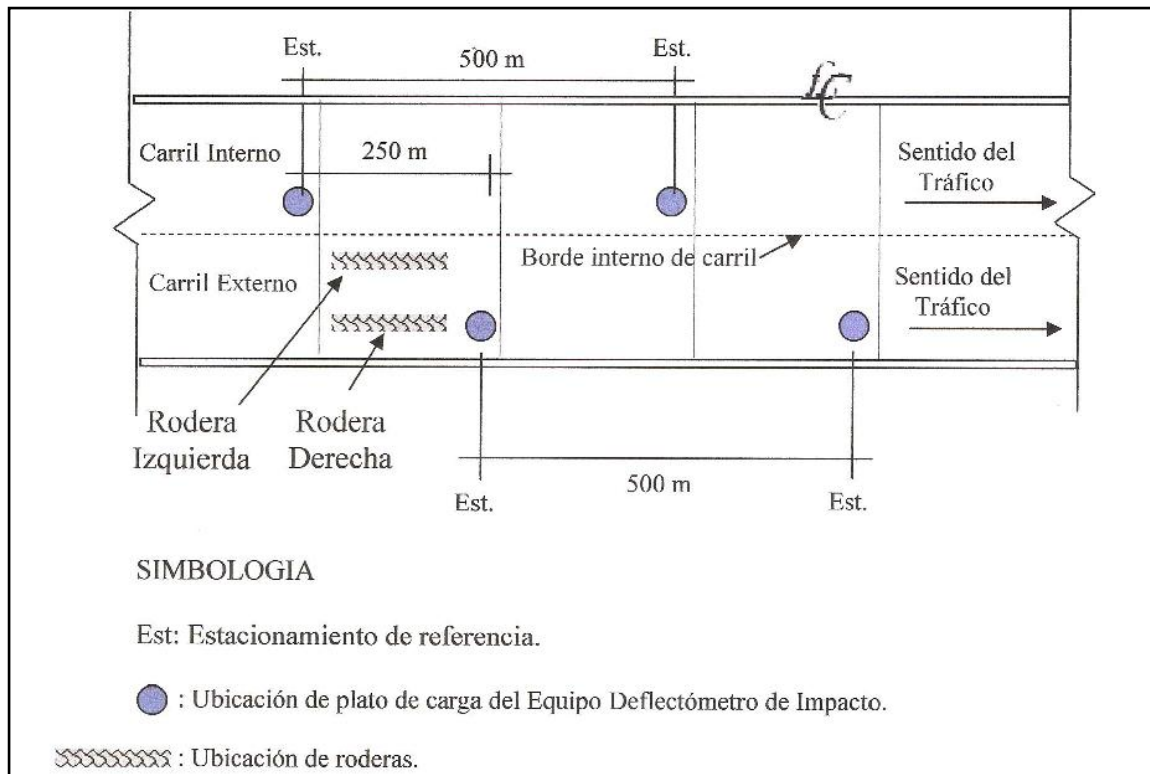


Figura 4.11: Esquema ubicación de ensayos en rodera derecha de la losa con FWD.

La carga recomendada para realizar estos ensayos es de 40 KN (9000 lb). Además se cumplió con la temperatura media indicada para la realización de los ensayos que es de 70°F (21°C), para lograr esto se realizaron los trabajos en la noche, obteniendo así los resultados deseados.

i. **Resultados Obtenidos con el Falling Weight Deflectometer.**

1. **Resultados de deflexiones en losa.**

Lateral Derecho (Sentido San Salvador – Aeropuerto)

Carril Externo

Est.	Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Fuerza (libras)	Deflexiones en milésimas de pulgadas(mils*)						
				d0	d 30	d 60	d 90	d 120	d 150	d 180
0+000	29.59	24.19	9039	2.55	2.33	2.01	1.69	1.43	1.19	0.98
0+500	28.99	24.39	8952	3.72	3.29	2.74	2.22	1.76	1.35	1.02
1+000	27.69	26.49	9017	4.37	4.06	3.45	2.86	2.33	1.83	1.41
1+503	28.29	24.79	9073	3.75	3.54	3.2	2.8	2.47	2.12	1.79
2+003	29.09	25.09	8913	3.71	3.15	2.61	2.19	1.82	1.49	1.23
2+503	29.09	24.89	9098	3.53	3.13	2.61	2.11	1.71	1.37	1.09
3+003	29.09	25.69	9066	4.63	3.97	3.15	2.46	1.89	1.48	1.17
3+505	28.49	25.89	9017	3.52	3.25	2.84	2.4	2.01	1.64	1.35
4+001	28.09	25.49	9041	6.69	6.19	4.53	3.25	2.3	1.64	1.19

Tabla 4.35: Registro deflexiones lateral derecho carril externo.

*1mils = 0.0254 mm

Carril Interno

Est.	Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Fuerza (libras)	Deflexiones en milésimas de pulgadas(mils*)						
				d0	d 30	d 60	d 90	d 120	d 150	d 180
0+250	29.59	27.99	9001	3.26	2.96	2.55	2.12	1.72	1.34	1.04
0+750	28.99	28.99	8970	2.17	1.75	1.31	0.94	0.67	0.47	0.3
1+251	27.69	27.79	9032	3.96	3.9	3.58	2.79	2.13	1.59	1.18
1+753	28.29	28.59	9017	0.99	0.76	0.61	0.53	0.5	0.45	0.42
2+251	29.09	28.19	8978	3.17	2.76	2.35	1.98	1.65	1.35	1.09
2+750	29.09	28.19	8958	3.58	3.2	2.7	2.24	1.78	1.42	1.11
3+251	29.09	28.99	9070	3.44	3.15	2.6	2.05	1.56	1.18	0.88
3+754	28.49	27.69	9010	3.19	2.88	2.46	2.02	1.64	1.3	1.04

Tabla 4.36: Registro deflexiones lateral derecho carril interno.

* 1 mils = 0.0254 mm

Lateral Izquierdo (Sentido Aeropuerto – San Salvador)

Carril Externo

Est.	Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Temperatura Ambiente(°C)	Fuerza (libras)	Deflexiones en milésimas de pulgadas(mils*)						
				d0	d 30	d 60	d 90	d 120	d 150	d 180
4+000	29.99	24.49	8974	3.35	2.84	2.32	1.83	1.41	1.08	0.81
3+500	29.39	26.39	8970	4.28	3.78	3.14	2.56	2.04	1.61	1.28
2+998	29.99	27.19	9046	4.13	3.87	3.46	3.08	2.76	2.49	0.91
2+496	29.49	27.59	8990	4.1	3.85	3.47	3.06	2.73	2.41	2.15
1+996	29.49	26.69	8999	3.87	3.59	3	2.49	2.05	1.67	1.35
1+498	29.49	26.69	9010	4.91	4.57	4	3.35	2.7	2.08	1.63
0+997	28.69	26.99	8952	3.82	3.45	2.92	2.4	1.93	1.52	1.19
0+499	28.49	25.79	9062	3.28	2.94	2.4	1.89	1.47	1.12	0.83
0-002	28.29	25.09	8974	5.46	5.3	4.93	4.57	3.73	2.83	2.13

Tabla 4.37: Registro deflexiones lateral izquierdo carril externo.

*1 mils = 0.0254 mm

Carril Interno

Est.	Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Temperatura Ambiente(°C)	Fuerza (libras)	Deflexiones en milésimas de pulgadas(mils*)						
				d0	d 30	d 60	d 90	d 120	d 150	d 180
3+747	29.19	26.29	8942	3	2.69	2.28	1.88	1.54	1.24	1
3+248	28.59	26.09	9046	3.46	3.17	2.76	2.37	2.02	1.56	1.17
2+750	29.79	26.39	8990	2.92	2.63	2.25	1.86	1.49	1.15	0.87
2+247	28.59	27.59	8985	3.61	3.33	2.87	2.44	2.02	1.65	1.37
1+750	27.29	26.69	9032	3.01	2.7	2.32	1.96	1.64	1.37	1.15
1+250	27.29	26.69	9026	3.56	3.19	2.7	2.2	1.78	1.41	1.12
0+750	26.59	24.69	9026	3.99	3.73	3.27	2.79	2.4	1.89	1.43
0+250	27.59	25.69	9005	3.21	3	2.65	2.29	1.91	1.5	1.14

Tabla 4.38: Registro deflexiones lateral izquierdo carril interno.

* 1 mils = 0.0254 mm

2. Resultados de eficiencia de la transferencia de carga a partir de deflexiones.

Lateral Derecho (Sentido San Salvador- Aeropuerto), Carril externo.

Est.	Temperatura ambiente	Fuerza (libras)	Deflexiones en milésimas de pulgada (mils*)		Eficiencia de transferencia de carga (%)
	(°C)		Δl	Δul	
0+003	22.59	8922	8.73	8.29	94.95
0+502	24.99	9032	5.12	4.76	92.93
1+003	24.19	8999	7.41	6.97	94.15
1+506	22.99	9005	7.22	6.48	89.8
2+006	25.29	9046	11.86	11.31	95.35
2+506	25.29	8994	6.3	5.78	91.69
3+007	24.69	9010	7.84	7.33	93.42
3+511	25.09	9041	10.74	10.02	93.22
4+005	25.39	9050	10.84	7.17	66.12

Tabla 4.39: Resultado de eficiencia de la transferencia de carga lateral derecho carril externo.

*1 mils = 0.0254 mm

Lateral Derecho (Sentido San Salvador- Aeropuerto), Carril Interno.

Est.	Temperatura ambiente	Fuerza (libras)	Deflexiones en milésimas de pulgada (mils*)		Eficiencia de transferencia de carga (%)
	(°C)		Δl	Δul	
0+003	24.89	8911	4.93	4.57	92.7
0+502	24.79	8994	3.96	3.44	86.87
1+003	24.69	9010	3.33	3.04	91.29
1+506	23.29	8974	3.69	3.38	91.6
2+006	24.59	8954	8.15	6.33	77.67
2+506	25.79	9082	6.35	5.96	93.86
3+007	24.69	9201	6.42	5.72	89.1
3+511	25.29	9023	7.96	7.37	92.59

Tabla 4.40: Resultado de eficiencia de la transferencia de carga lateral derecho carril interno.

*1 mils = 0.0254 mm

Lateral Izquierdo (Sentido Aeropuerto – San Salvador), Carril Externo

Est.	Temperatura ambiente	Fuerza (libras)	Deflexiones en milésimas de pulgada (mils*)		Eficiencia de transferencia de carga (%)
	(°C)		Δl	Δul	
3+998	24.89	8970	10.19	9.62	94.4
3+497	25.49	9001	9.74	8.95	91.88
2+993	24.69	9041	7.01	6.5	92.81
2+290	24.19	9062	7.28	6.8	93.35
1+992	24.09	8985	6.72	6.3	93.85
1+497	24.89	9005	9.26	5.67	61.27
0+996	24.59	8979	7.86	7.35	93.59
0+497	24.09	9023	6.41	5.92	92.32
0-003	23.59	9017	9.06	8.53	94.22

Tabla 4.41: Resultado de eficiencia de la transferencia de carga lateral izquierdo carril externo.

*1 mils = 0.0254 mm

Lateral Izquierdo (Sentido Aeropuerto – San Salvador), Carril Interno.

Est.	Temperatura ambiente	Fuerza (libras)	Deflexiones en milésimas de pulgada (mils*)		Eficiencia de transferencia de carga (%)
	(°C)		Δl	Δul	
3+747	24.89	8963	7.24	6.94	95.92
3+247	25.99	8886	6.31	6.05	95.88
2+748	25.99	8983	6.05	6.22	92.51
2+245	24.49	8983	6.22	7.08	97.61
1+748	24.29	8938	7.26	5.48	93.42
1+249	23.99	8913	5.86	5.79	92.34
0+749	25.39	9010	6.27	6.57	95.21
0+245	22.99	8999	6.51	5.99	92.08

Tabla 4.42: Resultado de eficiencia de la transferencia de carga lateral izquierdo carril interno.

*1 mils = 0.0254 mm

4.5. CONTEO VEHICULAR

4.5.1 Metodología utilizada para medir el tránsito diario.

Se realizó un conteo vehicular de 12 horas, desde las 6:00 am hasta las 6:00 pm, en un día que se consideró con condiciones normales de tránsito, luego se realizó una proyección de tránsito para tomar en cuenta el tránsito que circula en la Autopista a Comalapa por la noche y eso se hizo de la siguiente manera:

Según el conteo realizado tenemos en total un volumen de 14,638 vehículos en los cuatro carriles que forman parte del tramo en estudio, entre Dv. De Santo Tomas a Olocuilta, Carretera a Comalapa.

Ese volumen para convertirlo en un conteo corto representativo de TPDA, se necesita multiplicarlo por factores de expansión de las estaciones permanentes y semi permanentes que se tienen instaladas en la carretera a Comalapa , que hacen aforos vehiculares de 24 horas y dichos factores son los siguientes, datos obtenidos del Ministerio de Obras Publicas (MOP) , de la Unidad Planificacion Vial.

Código de estación semi permanente PAZIS004 -----FN = 1.2613

FD = 0.9862

Código de estación s permanente PAZIS001 ----- FM = 1.0768

Factor nocturno: FN = 1.2613

Factor diario: FD = 0.9862

Factor mensual: FM = 1.0768

$14,638 * 1.2613 = TD$

TD=18,463

$TDS = 18,463 * 0.9862$

TDS = 18,209

$18,209 * 1.0768 = TPDA$

TPDA = 19,606 para el año 2011.

El número de vehículos contados en las 12 horas lo multiplicamos por los tres factores anteriores logrando tener el TPDA correspondiente a este tramo para 24 horas, para posteriormente encontrar los ESAL'S por carril.

4.5.2 Resultados Obtenidos del conteo vehicular y cálculo de ESAL's para año 2011.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR															
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL															
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y VIAS TERRESTRES															
CONTEO VEHICULAR EN AUTOPISTA A COMALAPA ENTRE SANTO TOMAS Y OLOCUILTA															
SENTIDO : SANTO TOMÁS – OLOCUILTA															
CARRIL : DERECHO															
Hora/Tipo de vehículo	Auto-móvil	Pick - Up	Microbús liviano	Microbús mediano	Auto-bus	C2	C3	C4	T2 - S1	T2 - S2	T3	T3 - S1	T3 - S2	T3 - S3	Otros
6:00 - 7:00 am	138	78	55	17	30	38	1	0	0	0	3	0	9	0	0
7:00 - 8:00 am	135	105	51	15	19	46	6	0	0	0	3	0	3	1	0
8:00 - 9:00 am	107	109	46	9	17	70	8	0	0	0	5	1	7	2	0
9:00 - 10:00 am	81	97	41	8	15	54	5	1	0	0	5	1	8	2	0
10:00 - 11:00 am	112	107	36	8	18	36	4	0	0	0	3	0	6	1	0
11:00 - 12:00 md	107	122	32	9	14	33	1	1	0	0	1	0	4	2	0
12:00 - 1:00 pm	92	99	41	14	17	25	2	0	0	0	1	0	8	1	0
1:00 - 2:00 pm	86	92	23	10	11	50	2	0	0	1	0	0	12	0	0
2:00 - 3:00 pm	85	97	29	13	16	25	0	0	0	0	3	1	2	2	0
3:00 - 4:00 pm	78	78	24	12	21	31	5	1	0	1	1	0	4	5	0
4:00 - 5:00 pm	86	76	21	11	24	27	5	0	0	0	0	0	3	0	2
5:00 - 6:00 pm	110	73	48	16	18	13	3	0	0	0	0	0	8	0	0
Total	1217	1133	447	142	220	448	42	3	0	2	25	3	74	16	2

Tabla 4.43: Conteo vehicular carril derecho, sentido Santo Tomás – Olocuilta

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR															
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL															
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y VIAS TERRESTRES															
CONTEO VEHICULAR EN AUTOPISTA A COMALAPA ENTRE SANTO TOMAS Y OLOCUILTA															
SENTIDO : SANTO TOMÁS – OLOCUILTA															
CARRIL : IZQUIERDO															
Hora/Tipo de vehículo	Auto- móvil	Pick - Up	Microbús liviano	Microbús mediano	Auto- bus	C2	C3	C4	T2 – S1	T2 – S2	T3	T3 – S1	T3 – S2	T3 – S3	Otros
6:00 – 7:00 am	237	84	42	14	14	14	0	0	0	0	0	0	1	1	0
7:00 – 8:00 am	293	131	36	1	5	23	1	0	0	0	0	0	3	0	0
8:00 – 9:00 am	209	127	23	2	3	22	0	1	0	0	1	0	0	0	0
9:00 – 10:00 am	156	121	16	1	1	19	0	0	0	0	2	0	1	0	0
10:00 – 11:00 am	139	110	17	4	1	16	0	0	0	0	0	0	2	0	0
11:00 – 12:00 md	132	107	25	5	2	19	0	0	1	0	0	0	1	1	0
12:00 – 1:00 pm	148	85	29	0	3	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00 – 2:00 pm	152	87	25	3	7	10	0	0	0	0	0	0	1	0	0
2:00 – 3:00 pm	105	90	19	0	2	10	2	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00 – 4:00 pm	81	62	17	3	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00 – 5:00 pm	131	68	23	2	3	5	1	0	0	0	0	0	2	1	0
5:00 – 6:00 pm	184	70	17	2	4	5	2	0	0	0	1	0	1	0	0
Total	1967	1142	289	37	46	158	7	1	1	0	4	0	12	3	0

Tabla 4.44: Conteo vehicular carril izquierdo, sentido Santo Tomás – Olocuilta

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR															
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL															
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y VIAS TERRESTRES															
CONTEO VEHICULAR EN AUTOPISTA A COMALAPA ENTRE SANTO TOMAS Y OLOCUILTA															
SENTIDO : -OLOCUILTA-SANTO TOMÁS															
CARRIL : DERECHO															
Hora/Tipo de vehículo	Auto - móvil	Pick - Up	Microb ús liviano	Microb ús mediano	Auto-bus	C2	C3	C4	T2 - S1	T2 - S2	T 3	T3 - S1	T3 - S2	T3 - S3	Otros
6:00 - 7:00 am	133	58	51	18	27	9	0	0	0	0	0	0	1	2	14
7:00 - 8:00 am	115	83	54	13	23	16	1	1	0	0	0	0	2	2	32
8:00 - 9:00 am	116	97	49	12	16	16	2	1	0	0	2	0	1	0	14
9:00 - 10:00 am	58	85	30	11	13	30	4	0	0	0	4	0	7	1	14
10:00 - 11:00 am	71	51	31	5	9	36	9	36	4	0	0	0	7	2	7
11:00 - 12:00 md	73	78	34	9	13	35	3	0	0	0	1	0	5	1	9
12:00 - 1:00 pm	103	89	31	12	15	24	4	0	0	0	1	0	8	0	11
1:00 - 2:00 pm	109	66	30	12	15	26	4	1	0	0	0	0	8	3	16
2:00 - 3:00 pm	103	82	51	9	16	34	3	0	1	0	1	0	9	0	10
3:00 - 4:00 pm	105	89	38	13	17	32	4	0	0	0	2	0	9	2	13
4:00 - 5:00 pm	88	91	44	18	30	53	5	0	0	0	0	0	5	0	16
5:00 - 6:00 pm	135	67	52	17	24	43	1	0	5	0	0	0	5	3	8
Total	1209	936	495	149	218	354	40	39	10	0	1	0	67	16	164

Tabla 4.45: Conteo vehicular carril derecho, sentido Olocuilta - Santo Tomás

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR															
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL															
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y VIAS TERRESTRES															
CONTEO VEHICULAR EN AUTOPISTA A COMALAPA ENTRE SANTO TOMAS Y OLOCUILTA															
SENTIDO : OLOCUILTA-SANTO TOMÁS															
CARRIL : IZQUIERDO															
Hora/Tipo de vehículo	Auto-móvil	Pick - Up	Microbús liviano	Microbús mediano	Auto-bus	C2	C3	C4	T2 - S1	T2 - S2	T3	T3 - S1	T3 - S2	T3 - S3	Otros
6:00 - 7:00 am	175	63	20	2	5	13	1	0	0	0	0	0	2	1	4
7:00 - 8:00 am	185	95	27	3	5	9	0	0	0	0	0	0	0	2	1
8:00 - 9:00 am	157	77	21	2	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	3
9:00 - 10:00 am	101	71	11	2	1	6	0	0	0	0	0	0	3	0	1
10:00 - 11:00 am	103	73	8	4	4	15	2	0	0	0	0	0	0	2	3
11:00 - 12:00 md	122	67	9	0	3	19	0	0	1	0	0	0	2	0	1
12:00 - 1:00 pm	150	70	15	2	5	12	0	0	0	0	0	0	3	0	4
1:00 - 2:00 pm	159	97	26	3	2	13	2	0	0	0	0	0	2	0	1
2:00 - 3:00 pm	188	112	29	4	2	23	2	0	3	0	0	0	4	0	0
3:00 - 4:00 pm	123	88	21	2	4	32	2	0	0	0	1	0	2	0	1
4:00 - 5:00 pm	173	117	31	2	4	34	8	0	5	0	0	0	4	2	1
5:00 - 6:00 pm	210	116	25	1	3	25	0	0	5	0	0	0	0	0	1
Total	1846	1046	243	27	40	205	17	0	14	0	1	0	22	7	21

Tabla 4.46: Conteo vehicular carril izquierdo, sentido Olocuilta – Santo Tomás.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR																
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL																
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y VIAS TERRESTRES																
RESUMEN DE CONTEO VEHICULAR EN AUTOPISTA A COMALAPA ENTRE SANTO TOMAS Y OLOCUILTA																
SENTIDO : SANTO TOMÁS – OLOCUILTA																
CANTIDAD DE VEHICULOS																
Carril	Auto-móvil	Pick - Up	Microbús liviano	Microbús mediano	Auto-bus	C2	C3	C4	T2 -S1	T2 - S2	T3	T3 - S1	T3 - S2	T3 - S3	Otros	Total
Derecho	1217	1133	447	142	220	448	42	3	0	2	25	3	74	16	2	3774
Izquierdo	1967	1142	289	37	46	158	7	1	1	0	4	0	12	3	0	3667
Total	3184	2275	736	179	266	606	49	4	1	2	29	3	86	19	2	7441
PORCENTAJE DE CADA VEHICULOS POR CARRIL																
Carril	Auto-móvil	Pick - Up	Microbús liviano	Microbús mediano	Auto-bus	C2	C3	C4	T2 -S1	T2 - S2	T3	T3 - S1	T3 - S2	T3 - S3	Otros	Total
Derecho	38.22	49.80	60.73	79.33	82.71	73.93	85.71	75.00	0.00	100.00	86.21	100.00	86.05	84.21	100.00	51
Izquierdo	61.78	50.20	39.27	20.67	17.29	26.07	14.29	25.00	100.00	0.00	13.79	0.00	13.95	15.79	0.00	49
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Carril	Auto-móvil	Pick - Up	Microbús liviano	Microbús mediano	Auto-bus	C2	C3	C4	T2 -S1	T2 - S2	T3	T3 - S1	T3 - S2	T3 - S3	Otros	Total
Derecho	32.25	30.02	11.84	3.76	5.83	11.87	1.11	0.08	0.00	0.05	0.66	0.08	1.96	0.42	0.05	100.00
Izquierdo	53.64	31.14	7.88	1.01	1.25	4.31	0.19	0.03	0.03	0.00	0.11	0.00	0.33	0.08	0.00	100.00

Tabla 4.47: Conteo vehicular sentido Santo Tomás - Olocuilta.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR																
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL																
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y VIAS TERRESTRES																
RESUMEN DE CONTEO VEHICULAR EN AUTOPISTA A COMALAPA ENTRE SANTO TOMAS Y OLOCUILTA																
SENTIDO : OLOCUILTA- SANTO TOMÁS																
CANTIDAD DE VEHICULOS																
Carril	Auto- móvil	Pick - Up	Microbús liviano	Microbús mediano	Auto- bus	C2	C3	C4	T2 - S1	T2 - S2	T3	T3 - S1	T3 - S2	T3 - S3	Otros	Total
Derecho	1209	936	495	149	218	354	40	39	10	0	11	0	67	16	164	3708
Izquierdo	1846	1046	243	27	40	205	17	0	14	0	1	0	22	7	21	3489
Total	3055	1982	738	176	258	559	57	39	24	0	12	0	89	23	185	7197
PORCENTAJE DE CADA VEHICULOS POR CARRIL																
Carril	Auto- móvil	Pick - Up	Microbús liviano	Microbús mediano	Auto- bus	C2	C3	C4	T2 - S1	T2 - S2	T3	T3 - S1	T3 - S2	T3 - S3	Otros	Total
Derecho	39.57	47.23	67.07	84.66	84.50	63.33	70.18	100	41.67	0.00	91.67	0.00	75.28	69.57	88.65	52
Izquierdo	60.43	52.77	32.93	15.34	15.50	36.67	29.82	0	58.33	0.00	8.33	0.00	24.72	30.43	11.35	48
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	100	0	100	100	100	100
Carril	Auto- móvil	Pick - Up	Microbús liviano	Microbús mediano	Auto- bus	C2	C3	C4	T2 - S1	T2 - S2	T3	T3 - S1	T3 - S2	T3 - S3	Otros	Total
Derecho	32.61	25.24	13.35	4.02	5.88	9.55	1.08	1.05	0.27	0.00	0.30	0.00	1.81	0.43	4.42	100
Izquierdo	52.91	29.98	6.96	0.77	1.15	5.88	0.49	0.00	0.40	0.00	0.03	0.00	0.63	0.20	0.60	100

Tabla 4.48: Conteo vehicular sentido Olocuilta- Santo Tomás

Valores históricos de TPDA por carril

CARRIL DERECHO SENTIDO SANTO TOMAS OLOCUILTA						
	2002	2003	2005	2009	2010	2011
Automóvil	1546	1122	430	614	1047	1629
Pick-Up	1442	1049	1195	1307	607	1448
Micro bus	143	280	402	397	355	804
Bus	242	538	640	701	503	296
C2	431	601	638	612	489	588
C3	153	478	539	326	317	62
C4	0	0	0	0	0	22
T2-S1	0	16	22	67	86	8
T2-S2	0	231	231	269	348	1
T2-S3	0	167	184	186	306	0
T3-S1	0	0	0	0	0	23
T3-S2	150	514	586	378	472	103
T3-S3	71	376	908	329	608	24

Tabla 4.49: TPDA históricos carril derecho sentido Santo Tomas – Olocuilta.

CARRIL IZQUIERDO SENTIDO SANTO TOMAS OLOCUILTA						
	2002	2003	2005	2009	2010	2011
Automovil	2498	1814	695	992	1692	2633
Pick-Up	1453	1057	1204	1317	612	1460
Micro bus	79	155	222	220	196	445
Bus	51	112	134	147	105	62
C2	152	212	225	216	172	207
C3	26	80	90	54	53	10
C4	0	0	0	0	0	7
T2-S1	0	16	22	67	86	8
T2-S2	0	77	77	90	116	0
T2-S3	0	56	61	62	102	0
T3-S1	0	0	0	0	0	8
T3-S2	24	83	95	61	77	17
T3-S3	13	71	170	62	114	5

Tabla 4.50: TPDA históricos carril izquierdo sentido Santo Tomas – Olocuilta.

CARRIL DERECHO SENTIDO OLOCUILTA - SANTO TOMÁS						
	2002	2003	2005	2009	2010	2011
Automovil	1537	1116	428	611	1041	1620
Pick-Up	1314	956	1089	1191	553	1320
Micro bus	151	294	423	418	373	846
Bus	238	528	628	688	494	291
C2	355	495	525	504	402	484
C3	120	376	424	256	250	49
C4	0	0	0	0	0	28
T2-S1	0	13	18	54	69	7
T2-S2	0	222	222	258	335	1
T2-S3	0	161	177	179	294	0
T3-S1	0	0	0	0	0	22
T3-S2	126	432	493	318	397	86
T3-S3	56	299	721	261	482	19

Tabla 4.51: TPDA históricos carril derecho sentido Olocuilta –Tomas Santo.

CARRIL IZQUIERDO SENTIDO OLOCUILTA - SANTO TOMÁS						
	2002	2003	2005	2009	2010	2011
Automóvil	2348	1705	653	932	1590	2475
Pick-Up	1468	1068	1216	1330	618	1474
Micro bus	63	123	177	175	156	355
Bus	44	97	115	126	91	53
C2	205	286	304	292	233	280
C3	51	160	180	109	106	21
C4	0	0	0	0	0	0
T2-S1	0	18	25	75	97	9
T2-S2	0	74	74	86	112	0
T2-S3	0	54	59	60	98	0
T3-S1	0	0	0	0	0	7
T3-S2	41	142	162	104	130	28
T3-S3	25	131	315	114	211	8

Tabla 4.52: TPDA históricos carril izquierdo sentido Olocuilta –Santo Tomas.

De los datos anteriores se calculan lo ESAL'S para cada carril como se puede ver en el anexo 4.0 del cual tomamos la tabla 4.35 en la que se hace un resumen general:

ESAL'S				
AÑO	SANTO TOMÁS - OLOCUILTA		OLOCUILTA - SANTO TOMAS	
	DERECHO	IZQUIERDO	DERECHO	IZQUIERDO
2001	1000000	300000	1000000	400000
2002	1241581	320023	1078794	421538
2003	3704643	900836	3235765	1191934
2004	4299198	1027099	3730175	1389063
2005	4893754	1153362	4224585	1586192
2006	4585847	1110789	3981962	1491562
2007	4277941	1068217	3739336	1396933
2008	3970034	1025644	3496712	1302303
2009	3662127	983071	3254087	1207673
2010	4117066	1086515	3611740	1389847
2011	4572005	1189959	3969393	1572021
ACUMULADO	40324196	10165515	35322549	13349066

Tabla 4.53: Resumen General de cálculo de ESAL'S para cada carril.

Los ESAL'S colocado en la tabla anterior para el año 2011 fue encontrado extrapolando, dado que el valor encontrado por el conteo vehicular varía ya que la fecha en el que se hizo el conteo no era época de zafra en la que la cantidad de vehículos pesados es mayor.

CAPITULO V

CAPITULO V

ANALISIS DE RESULTADOS

5.1. JUSTIFICACIÓN DE LOS DATOS UTILIZADOS EN LOS MODELOS DE DETERIORO.

Diámetro de dovela (Pulg.)

El diámetro de la dovela adoptado en el diseño fue de 1 1/8", dado que el diámetro de la dovela debe ser de 1/8 del espesor de la losa, el cual cumple con el espesor que tiene la misma.

Factor de ajuste debido a la retención de fricción entre la losa y la base

Este depende del tipo de base por la que esté constituida la estructura del pavimento, así:

0.80 si la base es no estabilizada

0.65 si la base es estabilizada

En el caso de la Autopista Comalapa que es un Whitetopping consideramos un valor de 0.65, es decir asumiendo que la base es estabilizada.

Distancia entre juntas transversales (Pies):

Es la separación en dirección longitudinal a la que se encuentran las juntas transversales, estando definido esto por el largo de la losa de concreto, teniendo un valor de 4.5 m (14.76 pies).

Coefficiente termal del concreto (por ° F):

El coeficiente termal de expansión se usa para determinar las fuerzas de arqueamiento o curvamiento producidas en un pavimento de concreto sujeto a diferencias de temperatura entre la superficie y la base de la losa. Estas fuerzas son mayores en los bordes de la losa y pueden resultar en una fisuración de la misma, generalmente, cerca de su punto medio.

El coeficiente termal de expansión varía con factores tales como la relación del agua con el cemento, la edad del concreto, la riqueza de la mezcla, la humedad relativa y el tipo de agregado de la mezcla. La siguiente tabla muestra los valores típicos del coeficiente termal del hormigón según el tipo de agregado. Generalmente se usa un valor de 5.5×10^{-6} por °F en el análisis de pavimentos de concreto.

Valores típicos del coeficiente térmico del concreto

Tipo de agregado	Coefficiente termal del concreto (10^{-6} por °F)
Cuarzo	6.6
Piedra arenisca	6.5
Grava	6.0
Granito	5.3
Basalto	4.8
Piedra caliza	3.8

Tabla 5.1: Valores típicos de coeficiente térmico del concreto. Fuente AASHTO 1993

Revisando lo anterior se ha considerado un valor de 4.8×10^{-6} .

Rango de temperatura (°F):

Es el rango temperatura mensual obtenido entre la diferencia de la temperatura máxima y la mínima para cada mes.

Tomamos en cuenta la estación más cercana al tramo en análisis (Ilopango) para encontrar la temperatura máxima y mínima promedio, teniendo en cuenta que en nuestro país no hay altas variaciones de temperatura por lo que este valor se considera representativo para todo el año.

Estación	Temperatura máxima promedio °C (°F)	Temperatura mínima promedio °C (°F)	Rango de Temperatura °C (°F)
Ilopango	30.4 (86.72)	18.7 (65.66)	11.7 (21.06)

Tabla 5.2: Datos de temperaturas.

Fuente: Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA)

Coefficiente de contracción del concreto:

Las losas del pavimento de concreto están sujetas a variaciones diarias en la temperatura y la humedad, lo que conlleva efectos de contracción o de expansión. Una losa con un movimiento no restringido en dirección horizontal podría no desarrollar fuerzas bajo los efectos de expansión o contracción. Por lo tanto, en condiciones reales, existe alguna resistencia entre la losa y la base subyacente.

El encogimiento de los pavimentos de concreto está causado por la pérdida de agua en el proceso de secado. El coeficiente de encogimiento por falta de humedad (γ) se usa en la elevación de la apertura y cierre de las juntas causadas por variaciones en la temperatura media a la que está sujeta la losa.

El encogimiento y la resistencia del concreto están fuertemente relacionados a la relación entre el agua y el cemento. Valores muy altos de agua con relación al cemento reducirán la resistencia del hormigón y aumentarán el potencial de encogimiento.

El encogimiento se considera inversamente proporcional a la resistencia a la tracción indirecta del hormigón. La siguiente tabla se puede usar para estimar el coeficiente de contracción del concreto.

Resistencia a la tracción indirecta Kg/cm² (psi)	Coeficiente de contracción
< 21 (300)	0.0008
28 (400)	0.0006
35 (500)	0.00045
42 (600)	0.0003
>49 (700)	0.0002

Tabla 5.3: Correlación entre coeficiente de contracción y resistencia a la tracción indirecta. Fuente AASHTO 1993

La resistencia a la tracción del concreto utilizado para la construcción de la Autopista a Comalapa es del 85% del Módulo de Ruptura del concreto ($640 \times 0.85 = 550.4$ psi), por lo tanto el valor de coeficiente de contracción a utilizar es de 0.00037.

Módulo de soporte de la dovela (PCI):

El valor adoptado y recomendado es de 1, 500,000 Psi/in.

Módulo de elasticidad de la dovela (PSI):

Dado que las dovelas son grado 60, el valor del módulo de elasticidad de la dovela es de 29, 000,000 psi.

Módulo de ruptura del concreto (psi):

El dato utilizado corresponde a la resistencia de flexión del concreto y deberá ser el valor medio obtenido a los 28 días utilizando una viga simple con carga en los tercios del claro según AASTHO T97/ASTM C78. Recomendando tomar en cuenta la resistencia a la compresión de diseño del concreto para poder aproximar el módulo de ruptura de diseño.

Valores Típicos		
Resistencia a la compresión (psi)	Valor en Tercio del claro de vigas (psi)	Valor en centro de claro del viga (psi)
3000	550	650
4000	630	765
5000	700	825

Tabla 5.4: Modulo de ruptura

Se adoptó un valor conservador de 640 psi ya que en nuestro medio es el promedio de resultados obtenidos en ensayos de laboratorio.

Los modelos de deterioro de los pavimentos de concreto del HDM-4 consideran el módulo de ruptura, MR, a largo plazo. El valor a largo plazo se estima aumentando en un 11% el módulo de ruptura de 28 días (MR28).

Si tenemos un MR a 28 días de 640 psi y lo aumentamos en un 11% nos da 710.4 psi, siendo este valor el correspondiente al módulo de ruptura a largo plazo a utilizar en el modelo de deterioro.

Módulo de elasticidad del concreto (psi):

El valor utilizado en el diseño del pavimento es el recomendado por la Guía AASHTO para estimar E_c en función del módulo de ruptura, de acuerdo a lo siguiente:

Módulo de Elasticidad (psi)	Módulo de Ruptura (psi)
3400000	500
3700000	550
4100000	600
4400000	650
4700000	700
5100000	750
5400000	800

Tabla 5.5: Modulo de elasticidad

En vista de que el Valor de Módulo de Ruptura considerado es 640 psi y retomando dichas recomendaciones el valor de E_c es de 4, 320,000 psi.

Espesor de la losa de concreto (pulg):

Este valor es tomado del diseño de la carretera que corresponde a 21.00 cm (8.27 pulgadas).

Relación de Poisson del concreto:

Este valor generalmente está entre 0.15 y 0.25, por lo que para nuestro estudio se adoptó un valor de 0.15.

Módulo de reacción de la subrasante (PCI):

Según el diseño original de la carretera se tiene un valor de módulo de reacción de la subrasante de 400 PCI, siendo este valor el que se utilizará en nuestro estudio.

Carga total aplicada por cada rueda de un eje axial simple (Lb):

Un eje axial simple pesa 18,000 Lb, dado que este está constituido por dos ruedas, cada rueda transmite la mitad de la carga, es decir que la carga total aplicada por cada rueda de un eje axial simple es de 9000 Lbs.

Porcentaje de transferencia de carga entre las juntas:

En los trabajos con el Perfilómetro laser se encontraron las transferencias de carga para uno de los puntos evaluado por carril, lo que podemos observar en la tabla 5.6

PORCENTAJE DE TRANSFERENCIA DE CARGA EN JUNTAS TRANSVERSALES								
Estacionamiento	Santo Tomás - Olocuilta				Olocuilta - Santo Tomás			
	Externo		Interno		Externo		Interno	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
0+000	8.73	8.29			10.19	9.62		
	95.0%				94.4%			
0+250			4.93	4.57			7.24	6.94
			92.7%				95.9%	
0+500	5.12	4.76			9.74	8.95		
	93.0%				91.9%			
0+750			3.96	3.44			6.31	6.05
			86.9%				95.9%	
1+000	7.41	6.97			7.01	6.5		
	94.1%				92.7%			
1+250			3.33	3.04			6.72	6.22
			91.3%				92.6%	
1+500	7.22	6.48			7.28	6.8		
	89.8%				93.4%			
1+750			3.69	3.38			7.26	7.08
			91.6%				97.5%	
2+000	11.86	11.31			6.72	6.3		
	95.4%				93.8%			
2+250			8.15	6.33			5.86	5.48
			77.7%				93.5%	
2+500	6.3	5.78			9.26	5.67		
	91.7%				61.2%			
2+750			6.35	5.96			6.27	5.79
			93.9%				92.3%	
3+000	7.84	7.33			7.86	7.35		
	93.5%				93.5%			
3+250			6.42	5.72			6.9	6.57
			89.1%				95.2%	
3+500	10.74	10.02			6.41	5.92		
	93.3%				92.4%			
3+750			7.96	7.37			6.51	5.99
			92.6%				92.0%	
4+000	10.84	7.17			9.06	8.53		
	66.1%				94.2%			
Promedio	90.2%		89.5%		89.7%		94.4%	
	89.8%				92.0%			
	90.9%							

Tabla 5.6: Valores de transferencia de carga para el tramo en análisis.

*Unidades de las deflexiones en mils (1 mil = 0.0254 mm)

De lo anterior concluimos utilizar un valor de transferencia de carga del 90%.

Coefficiente de drenaje:

Este valor es tomado del diseño del pavimento, en el cual se adoptó un valor de 1.175.

Índice de congelamiento (°F-día):

Lo que interesa es la permanencia de temperaturas bajo cero lo que provocará, dadas ciertas condiciones de tipo de suelo y presencia de agua, la penetración de la helada en la estructura de pavimento. Para la determinación de éste, es fundamental contar con registro de temperaturas.

Grado Día: Es la diferencia entre la temperatura media de un día y cero grado, la temperatura media se toma a 1.35 m sobre el piso. Graficando la suma algebraica de los grados días consecutivos se obtiene una curva, la diferencia entre el punto máximo de grados días positivos y el punto mínimo de grados días negativos se le llama Índice de congelamiento para ese período.

Índice de congelamiento de Diseño: Es el promedio de los índices de congelamiento de los 3 inviernos más fríos de los últimos 30 años o el más frío de los 10 últimos años.

En nuestro país no tenemos el efecto de congelamiento por lo que este valor lo tomamos como cero.

Precipitación promedio anual (pulg):

La precipitación promedio anual a utilizar en los modelos de deterioro es tomada de la estación más cercana al tramo en análisis, la cual es la de Estación Meteorológica Ilopango, de la cual la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA, antes SNET), nos brindó la siguiente información:

Estación	Precipitación media anual para cada estación mm (pulg)
Ilopango	141.1 (5.56)

Tabla 5.7: Precipitación media anual

Tipo de base:

Los modelos de comportamiento solo toman en cuenta el tipo de base, si ésta es estabilizada o no, tomando un valor de cero si la base es no estabilizada y un valor de 1 si la base es estabilizada, tomando un valor de 1 por que se tiene una base de asfalto.

Carril ancho:

Este valor es adoptado de la siguiente tabla en función del estatus de la construcción del pavimento.

Estatus de la construcción del pavimento	WIDENED
Carril no ensanchado u hombros unidos de concreto	0
Provisión de carriles exteriores ensanchados	1
Colocación de hombros de concreto durante la construcción inicial del pavimento	1
Colocación de hombros de concreto después de la construcción inicial del pavimento	0.5

Tabla 5.8: Carril Anchado

El estatus de construcción del pavimento correspondiente a la Autopista a Comalapa es “Colocación de hombros de concreto durante la construcción inicial del pavimento” por lo que el valor de WIDENED es de 1.

Número de años del pavimento desde la construcción:

La Autopista a Comalapa fue construida en 2001, hasta la fecha lleva 11 años de haberse hecho la reconstrucción.

Coefficientes basados en la zona climática:

Estos valores son tomados de la siguiente tabla:

Tipo de Clima	a0	a1
Seco con heladas	6.29	436.36
Seco sin heladas	7.68	436.36
Húmedo con heladas	5.03	327.27
Húmedo sin heladas	6.66	218.18

Tabla 5.9: Zonas climáticas

El tipo de clima que tenemos en nuestro país es húmedo sin heladas, utilizando valores para a0 y a1 de 6.66 y 218.18 respectivamente.

Temperatura en la cima y en el fondo de la losa (°F).

Este valor es tomado de una prueba experimental hecha en el Instituto del Cemento y del Concreto, en la cual se hizo el colado de una losa en la que se le colocaron sensores para medir la temperatura en el fondo y en la cima de la losa. En la tabla 5.10 se presenta la temperatura del concreto en la cima y fondo de la losa a diferentes edades y horas del día:

Edad (días)	Hora (00:00 am, pm)	Temperatura en la cima de la losa (°C)	Temperatura en el fondo de la losa (°C)	Diferencia de temperatura (°C) ($\Delta T = T \text{ cima} - T \text{ fondo}$)
1	11:00 am	31	28.5	2.5
3	11:00 am	32	25	7
7	11:40 am	37.5	28	9.5
14	9:40 am	26.5	24	2.5
28	03:20 pm	30	29.5	0.5

Tabla 5.10: Distribución de temperaturas en la cima y el fondo de la losa de concreto.

A partir de los datos anteriores y considerando la mayor diferencia de temperatura para utilizarla en los modelos de comportamiento, utilizaremos el valor de temperatura en la cima de la losa de aproximadamente 38°C (100.4 °F) y en el fondo de la losa de 28 °C (82.4° F), por lo que la diferencia de temperatura a utilizar es de 10 °C o 18 ° F.

Espacio central entre las llantas de un eje axial simple (pulg):

Consideramos una separación central entre las llantas de un eje axial simple de 72 pulgadas (6 pies), tomando este valor como un valor patrón.

Presión de los neumáticos (Lb):

Utilizamos la presión de los neumáticos de manera que sea un patrón para poder trabajar en los modelos de deterioro, adoptando un valor de 90 psi.

Localización de las ruedas, dada por la distancia promedio entre la rueda exterior y el borde (pulg):

El valor utilizado es de 22 pulg con una desviación estándar de 8.4 pulg, dado que este valor es asumido también para la creación de la fórmula que calcula la relación de cobertura lateral (LCR), que es simplemente una medida de la probabilidad de las veces que la carga de una rueda pasa sobre un punto crítico del borde.

Eficiencia de la transferencia de carga entre la losa y el hombro (%):

La capacitación de los hombros puede aumentar la capacidad estructural del pavimento, disminuyendo la presión crítica en el borde del concreto y en los desvíos hacia las esquinas. El valor del parámetro LTEsh usado en las ecuaciones para predecir el agrietamiento transversal se utilizará como se describe en la siguiente tabla:

Estatus de la construcción del pavimento	LTesh (%)
Carril no ensanchado u hombros unidos de concreto	0
Provisión de carriles exteriores ensanchados	20
Colocación de hombros de concreto durante la construcción inicial del pavimento	20
Colocación de hombros de concreto después de la construcción inicial del pavimento	10

Tabla 5.11: Condición de construcción del pavimento.

Conociendo que el tramo en análisis fue construido con hombros de concreto desde el inicio de la construcción el valor a tomar para el análisis de agrietamiento transversal para la Eficiencia de la transferencia de carga entre la losa y el hombro es de 20%.

Módulo de elasticidad de la base estabilizada (psi):

La rigidez de la base influencia a todos los comportamientos de los pavimentos de concreto, principalmente, como resultado del soporte provisto para las losas. Los efectos del drenaje tienen una significativa influencia en el comportamiento de la base como se explica a continuación. Una base más rígida proveerá generalmente un mejor soporte a la losa, lo que debería reducir la producción de roturas en las juntas transversales. No obstante, una base demasiado rígida aumentará el efecto de arqueamiento inducido por los cambios en la temperatura o en la humedad lo que aumentará la fisuración transversal.

Para nuestro estudio el módulo de elasticidad de la base que utilizaremos es el módulo de elasticidad de la capa de mezcla asfáltica que se encuentra debajo de la losa de concreto, adoptando un valor de 450,000 psi.

Espesor de la base estabilizada (pulg):

Este valor es tomado del diseño de la carretera, haciendo mención que este espesor corresponde al espesor de capa asfáltica que constituía la carretera antes de realizar los trabajos de rehabilitación, siendo este valor de 12.00 cm (4.7244 pulgadas).

Frecuencia de gradiente de temperatura:

Para conocer este valor es necesario conocer la diferencia entre la temperatura medida en la superficie y en la base de la losa ($^{\circ}\text{F}$) (ΔT), obteniendo un valor medio de ΔT de 10°C o 18°F .

Utilizando este valor y con la siguiente tabla encontramos el valor de la Frecuencia de gradiente de temperatura (FREQ):

Distribución de Gradiente de Temperatura

Diferencia de Temperatura (ΔT) en °F	Frecuencia (FREQ)			
	Seco con heladas	Seco sin heladas	Húmedo con heladas	Húmedo sin heladas
-8	0,086660	0,073237	0,090494	0,086209
-6	0,092003	0,067994	0,094611	0,072691
-4	0,076447	0,057834	0,081522	0,052129
-2	0,058163	0,039585	0,067007	0,039496
0	0,057014	0,031803	0,052426	0,033466
2	0,034749	0,029573	0,036817	0,030790
4	0,036162	0,024472	0,039393	0,031347
6	0,037122	0,019472	0,033196	0,021113
8	0,031273	0,021223	0,033254	0,024858
10	0,036200	0,028565	0,032462	0,032160
12	0,021978	0,027069	0,026291	0,025427
14	0,037272	0,029359	0,034706	0,038571
16	0,026134	0,036464	0,029423	0,037274
18	0,032394	0,030194	0,034758	0,038976
20	0,033724	0,037439	0,032034	0,038803
22	0,023131	0,032684	0,017874	0,037385
24	0,009683	0,036172	0,006422	0,027180
26	0,000047	0,024021	0,000078	0,011631
28	0,000000	0,013717	0,000000	0,001188

Tabla 5.12: Gradiente de temperaturas

Por lo que adoptamos un valor de 0.038976, que corresponde a la columna "húmedo sin heladas" que es el tipo de clima que en el país se tiene.

Presencia de líquido sellante en las juntas:

Solo se requiere conocer si existe o no, colocando un valor de 1 si existe y 0 si no existe.

En la Autopista a Comalapa adoptamos un valor de 0 ya que esto no se aplica en nuestro país.

Presencia de sellante preformado en las juntas:

Igualmente que para la presencia de líquido sellante en juntas solo se requiere conocer si existe o no, colocando un valor de 1 si existe y 0 si no existe. En la Autopista a Comalapa adoptamos un valor de 0 ya que no está presente.

Número de días con la temperatura media mayor a 90°F al año:

Es el número de días del año en los que la temperatura ambiental excede los 90° F (32° C) y se identifica como DAYS90. Según fuente del DGOA para la zona en la que se encuentra el tramo en análisis tenemos una cantidad de 292 días al año con temperatura mayor a 90° F (32° C) que representa el 80% de los días del año.

Protección a la corrosión de la dovela:

Los valores que se pueden adoptar son:

Utilizar 0 si la dovela está protegido o no existe dovela

Utilizar 1 si la dovela está desprotegida.

En la autopista a Comalapa las dovelas si están protegidas contra la corrosión por lo que se utilizará un valor de 0.

Presencia de silicona en las juntas:

El sellado de juntas se aplica para disminuir la infiltración de agua de la superficie y materiales incompresibles en las juntas del sistema. Esta disminución de la cantidad de agua en sobre y bajo el firme, reduce el potencial de reblandecimiento de la explanada, de bombeo y de erosión de las bases y las explanadas finas. Reducir la cantidad de los materiales incompresibles, disminuye el potencial de desconchado y bultos.

En este caso solo se requiere conocer la existencia o no de silicona en las juntas adoptando un valor de 1 si este está presente y un valor de 0 si no existe.

Cuando se construyó la Autopista a Comalapa se colocó el sello de silicona en las juntas, adoptando un valor de 1.

Valor de IRI inmediatamente después de construido (in/milla):

Este valor de IRI inicial no se conoce, ya que cuando se construyó esta Autopista no era un requisito que se pedía para la construcción, ya que tenemos valores de IRI para diferentes años, el valor de IRI inicial lo sacamos prolongando la línea de tendencia hasta el año 2001 que es donde se dio la apertura al tráfico de esta carretera.



Imagen 5.1: Valores de IRI.

De lo anterior sacamos que el IRI inicial es de 2.556 m/km (161.95 pulg/milla).

Peso unitario de la losa de concreto (Lb/pul³):

El peso unitario del concreto utilizado en la construcción de la losa de concreto es de 2,400 kg/m³ (0.08652 lb/pulg³).

Peso unitario de la base (Lb/pul³):

Ya que estamos tomando como base la carpeta asfáltica que existía en la carretera antes de la rehabilitación el peso unitario a utilizar es de 1,700 kg/m³ (0.061287987 lb/pulg³).

Máxima deformación de la losa en esquina debido a los alabeos por cambios de temperatura y humedad. (Pulg):

El valor de deformación de la losa en esquina debida a un efecto combinado de cargas, humedad y temperatura es de 2.5 mm, para el efecto de deformación solo por humedad y temperatura, utilizando un valor máximo éste se tomará de 1.00 mm (0.03937 pulg).

Factor que representa la erosionabilidad de la base:

Se adoptan valores entre 1 y 5, 1 cuando la base es extremadamente resistente y 5 cuando es muy erosionable por lo que adoptamos un valor de 1 ya que la base es una mezcla asfáltica.

Porcentaje que pasa el tamiz No.200 de material de subrasante:

Utilizaremos un valor de 8% de material que pasa el tamiz No.200 de material de subrasante, dadas las condiciones de esta en el estudio para la rehabilitación de la Autopista a Comalapa.

Número promedio de días al año con más de 0.1 pulg. De lluvia:

AÑO	NUMERO DE DIAS CON LLUVIA > A 2.5mm	PROMEDIO
2001	83	91
2002	81	
2003	88	
2004	92	
2005	86	
2006	100	
2007	83	
2008	96	
2009	95	
2010	99	

Tabla 5.13: Precipitación mayor a 2.5 mm.

Fuente: Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA).

Escalonamiento medio inmediatamente después de construido (Pulg)

Tomando como referencia la forma en la que se construyó la Autopista a Comalapa y específicamente el tramo en análisis se tiene que este valor es aproximadamente 1.00 mm.

Porcentaje de tiempo en el que la losa de concreto está por debajo de los 32°F:

Este valor es cero porque en nuestro país no tenemos temperaturas menores a 32 °F, colocando a este valor cero.

Tensión de trabajo del concreto:

Este valor lo encontramos correlacionando la resistencia a la compresión del concreto con la siguiente ecuación:

$$\sigma = 1.99 * \sqrt{f'_c}$$

Donde:

σ Resistencia a la tensión del concreto (kg/cm²)

f'_c Resistencia a la compresión del concreto (kg/cm²)

Sustituyendo valores en la ecuación:

$$\sigma = 1.99 * \sqrt{400} = 39.8 \text{ Kg/cm}^2 = 564.93 \text{ PSI}$$

Por lo tanto utilizaremos un valor de tensión del concreto de 565 PSI.

Porcentaje de contenido de aire en el concreto:

Este valor se saca del diseño de la mezcla del concreto, siendo este del 2%.

Presencia del sellador:

Solo se requiere conocer si este existe o no tomando los valores siguientes para cada caso:

1 si el sellador está presente

0 si existe otro tipo de sello o no existe

Colocando un valor de 1 dado que al inicio de la construcción esto fue utilizado.

Resistencia a la compresión del concreto (Psi):

A partir de los resultados obtenidos del diseño de mezcla se ha tomado un valor de resistencia a la compresión de 5680 psi (400 Kg/cm²)

Número de ciclos de congelamiento en el año:

Este valor es cero porque no tenemos ningún ciclo de congelamiento en nuestro país.

Relación agua cemento:

Tomado del diseño de la mezcla que se tiene para el concreto que se utilizó para la construcción de la Autopista a Comalapa este valor es de 0.45.

5.2 RESUMEN DE DATOS REQUERIDOS POR CADA UNO DE LOS MODELOS DE COMPORTAMIENTO PARA EL HDM-4 Y LA GUIA DE DISEÑO EMPRICA MECANICISTA.

RESUMEN DE DATOS A UTILIZAR EN LOS MODELOS DE COMPORTAMIENTO DEL HDM-4

1	Escalonamiento	
1.1	Diámetro de dovela (Pulg)	1 1/8
1.2	Factor de ajuste debido a la retención de fricción entre la losa y la base	0.65
1.3	Distancia entre juntas transversales (Pies)	14.76
1.4	Coeficiente termal del concreto (por ° F)	4.80E-06
1.5	Rango de temperatura (°F)	21.06
1.6	Coeficiente de contracción del concreto	0.00037
1.7	Módulo de soporte de la dovela (PCI)	1500000
1.8	Módulo de elasticidad de la dovela (PSI)	29000000
1.9	Módulo de elasticidad del concreto (psi)	4320000
1.10	Espesor de la losa de concreto (pulg)	8.27
1.11	Relación de Poisson del concreto	0.15
1.12	Módulo de reacción de la subrasante (pci)	400
1.13	Carga total aplicada por cada rueda de un eje axial simple (Lb)	9000
1.14	Porcentaje de transferencia de carga entre las juntas	90
1.15	Número de ejes sencillos equivalentes acumulados desde la construcción (ESAL's). Ver cálculo de ESAL'S	
1.16	Coeficiente de drenaje	1.175
1.17	Índice de congelamiento (°F-día)	0
1.18	Precipitación promedio anual (pulg)	5.56
1.19	Número de años del pavimento desde la construcción	11

Tabla 5.14: Datos para modelo Escalonamiento del HDM-4

2	Agrietamiento Transversal	
2.1	Distancia entre juntas transversales (Pies)	14.76
2.2	Espesor de la losa de concreto (pulg)	8.27
2.3	Coeficientes basados en la zona climática	
	a0	6.66
	a1	218.18
2.4	Temperatura en la cima de la losa (°F)	100.4
2.5	Temperatura en el fondo de la losa (°F)	82.4
2.6	Módulo de elasticidad del concreto (psi)	4320000
2.7	Coeficiente termal del concreto (por ° F)	4.80E-06
2.8	Módulo de reacción de la subrasante (pci)	400
2.9	Espacio central entre las llantas de un eje axial simple (pulg)	72
2.10	Carga total aplicada por cada rueda de un eje axial simple (Lb)	9000
2.11	Presión de los neumáticos (psi)	90
2.12	Relación de Poisson	0.15
2.13	Localización de las ruedas, dada por la distancia promedio entre la rueda exterior y el borde (pulg)	22
2.14	Eficiencia de la transferencia de carga entre la losa y el hombro (%)	20
2.15	Módulo de elasticidad de la base estabilizada (psi)	450000
2.16	Espesor de la base estabilizada (pulg)	4.724
2.17	Módulo de ruptura del concreto (psi)	710.4
2.18	Frecuencia de gradiente de temperatura	0.038976
2.19	Número de ejes sencillos equivalentes acumulados desde la construcción (ESAL's). Ver cálculo de ESAL'S.	

Tabla 5.15: Datos para modelo Agrietamiento Transversal del HDM-4.

3	Despostillamiento	
3.1	Edad desde la construcción (años)	10
3.2	Espaciamiento entre juntas (pies)	14.76
3.3	Presencia de líquido sellante en las juntas	0
3.4	Presencia de sellante preformado en las juntas	0
3.5	Número de días con la temperatura media mayor a 90°F al año	292
3.6	Protección a la corrosión de la dovela	0
3.7	Índice de congelamiento (°F-día)	0
3.8	Presencia de silicona en las juntas	1
4	Índice de Rugosidad Internacional (IRI)	
4.1	Espaciamiento entre juntas (pies)	14.76
4.2	Valor de IRI inmediatamente después de construido (in/milla)	161.95

Tabla 5.16: Datos para modelo Despostillamiento e IRI del HDM-4.

RESUMEN DE DATOS A UTILIZAR EN LOS MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE LA GUÍA DE DISEÑO EMPÍRICA MECANICISTA

1	Escalonamiento	
1.1	Espesor de la losa de concreto (Pulg)	8.27
1.2	Peso unitario de la losa de concreto (Lb/pul ³)	0.086524217
1.3	Espesor de la base (Pulg)	4.7244
1.4	Peso unitario de la base (Lb/pul ³)	0.061287987
1.5	Máxima deformación de la losa en esquina debido a los alabeos por cambios de temperatura y humedad. (Pulg)	0.016
1.6	Factor que representa la erosionabilidad de la base	1
1.7	% que pasa el tamiz No.200 de material de subrasante	8
1.8	Número promedio de días al año con más de 0.1 pulg. de lluvia	91
1.9	Escalonamiento medio inmediatamente después de construido (Pulg)	0.0394
1.10	Energía de deformación en esquina de losas	-----
1.11	Porcentaje de tiempo en el que la losa de concreto está por debajo de los 32°F	0
2	Grietas transversales	
2.1	Tensión de trabajo del concreto	565
2.2	Número de repeticiones de carga prevista (para cada mes). Ver análisis del modelo	
2.3	Número admisible de pasadas de carga (para cada mes). Ver análisis del modelo	
2.4	Módulo de ruptura del concreto (Psi)	640

Tabla 5.17: Datos para modelo Escalonamiento y Grietas transversales de la Guía Empírica Mecanicista.

3	Índice de Rugosidad internacional (IRI)	
3.1	Porcentaje de contenido de aire en el concreto	2
3.2	Presencia del sellador	1
3.3	Resistencia a la compresión del concreto (Psi)	5680
3.4	Número de ciclos de congelamiento en el año	0
3.5	Espesor de la losa de concreto (Pulg)	8.27
3.6	Relación agua cemento	0.45
3.7	Edad del pavimento (años)	10
3.8	Índice de congelamiento (°F -día)	0
3.9	% que pasa el tamiz No.200 de material de subrasante	8
3.10	IRI inicial después de construcción (Pulg/milla)	161.95

Tabla 5.18: Datos para modelo IRI de la Guía Empírica Mecanicista.

5.2.1 RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS MODELOS DE DETERIORO DEL HDM-4

La metodología utilizada para verificar si estos modelos de comportamiento predicen en forma adecuada los deterioros en pavimentos rígidos, fue reproducir los modelos en hojas electrónicas de cálculo, cuyo objetivo es que estos sean una herramienta fácil de utilizar y estar a disposición de quien lo necesite, para ello se presenta a continuación las hojas de cálculo que se desarrollaron con los datos de la Autopista a Comalapa, Tramo entre el kilómetro 19 y 23, cuyos valores están justificados en los apartados anteriores.

Antes de mostrar los resultados obtenidos presentamos un resumen de los deterioros del pavimento en análisis:

Deterioros	Sentido											
	Santo Tomas- Olocuilta						Olocuilta- Santo Tomas					
	Carril Derecho			Carril Izquierdo			Carril Derecho			Carril Izquierdo		
Escalonamiento promedio en junta transversal (mm)	0.013175675			0.012274774			0.039076576			0.020157657		
% de losas con agrietamiento transversal	B	3.94%	4.84%	B	0.56%	0.67%	B	2.78%	3.33%	B	0.89%	1.11%
	M	0.45%		M	0.11%		M	0.11%		M	0.11%	
	A	0.45%		A	0.00%		A	0.44%		A	0.11%	
% de juntas transversales despostilladas	B	85.51%	87.42%	B	52.58%	53.14%	B	90.23%	90.23%	B	57.05%	58.83%
	M	1.57%		M	0.56%		M	0.00%		M	1.78%	
	A	0.34%		A	0.00%		A	0.00%		A	0.00%	
IRI (m/km)	RD*	2.667	2.750	RD	2.697	2.703	RD	2.671	2.724	RD	2.655	2.709
	RI*	2.833		RI	2.709		RI	2.776		RI	2.762	

Tabla 5.19: Deterioros Observados en la Autopista a Comalapa año 2011.

*RD: rodera derecha, RI: rodera izquierda.

5.2.1.1 ESCALONAMIENTO

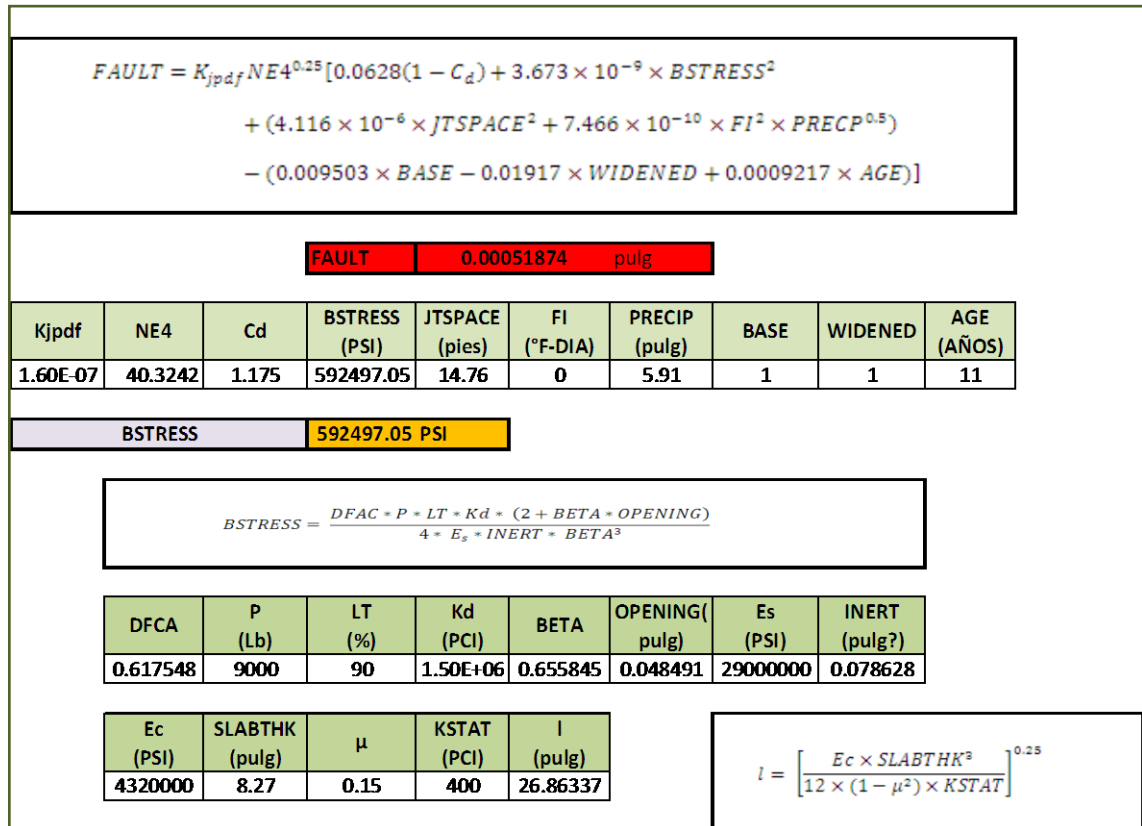


FIGURA 5.2: Modelo Escalonamiento HDM-4.

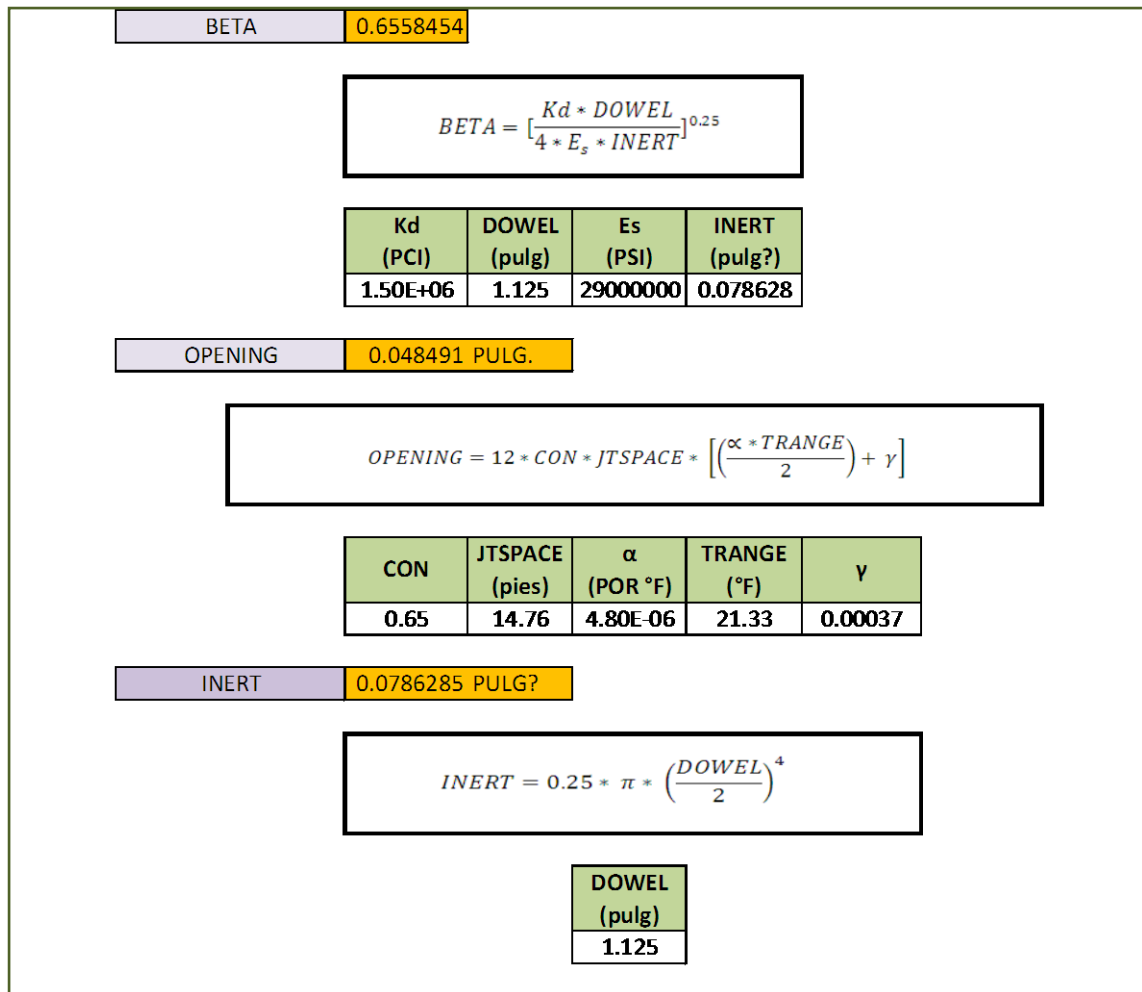


FIGURA 5.3: Continuación Modelo Escalonamiento HDM-4.

5.2.1.2 AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL

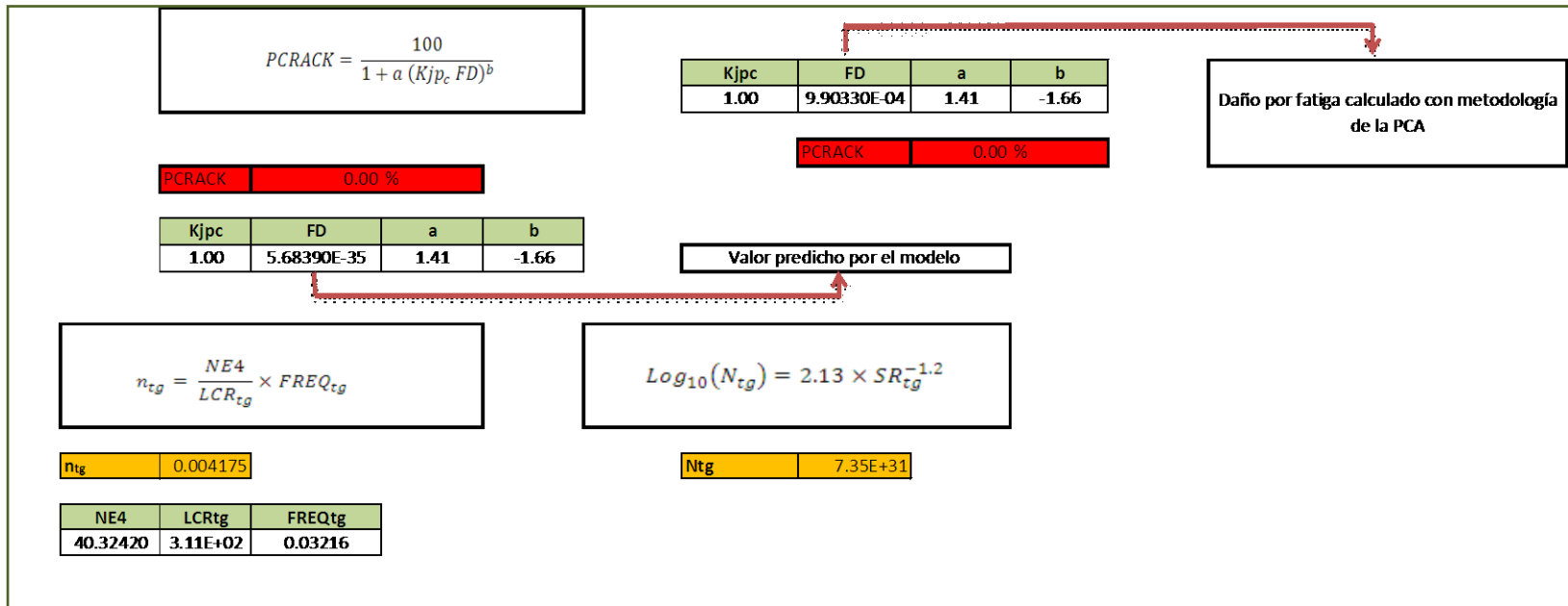


FIGURA 5.4: Modelo Agrietamiento transversal HDM-4.

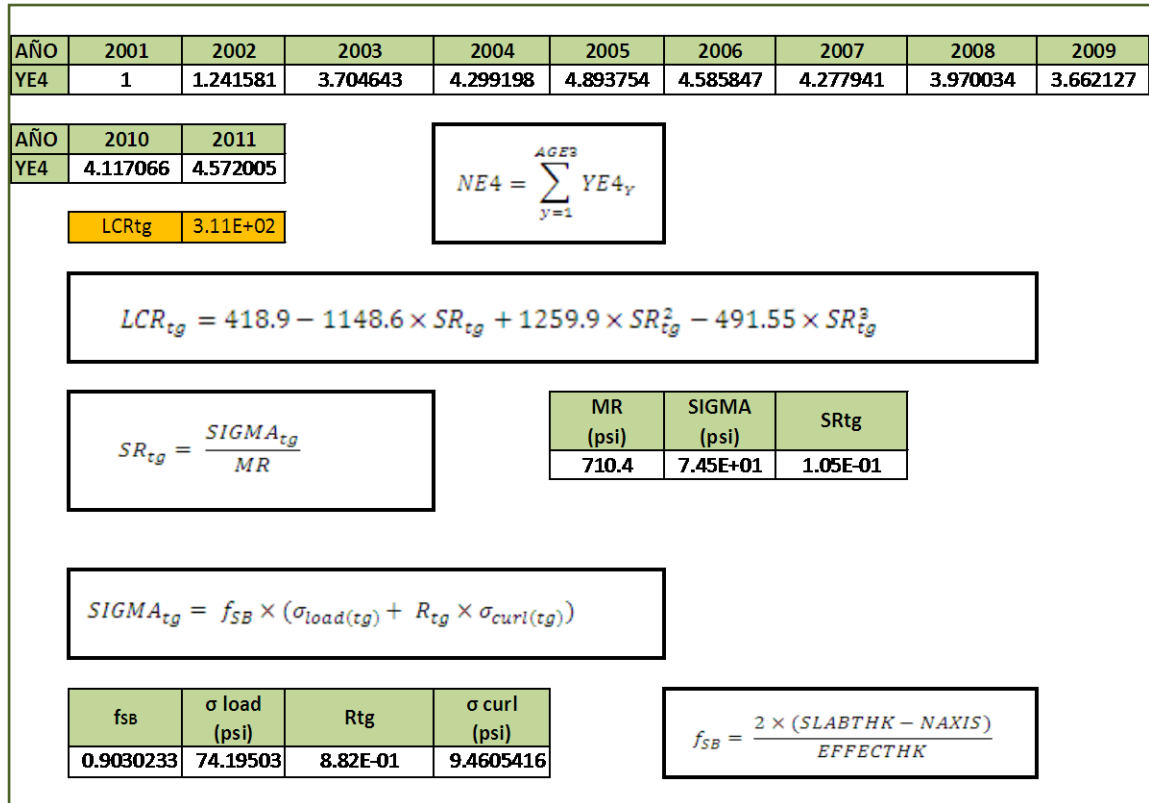


FIGURA 5.5: Continuación Modelo Agrietamiento Transversal HDM-4.

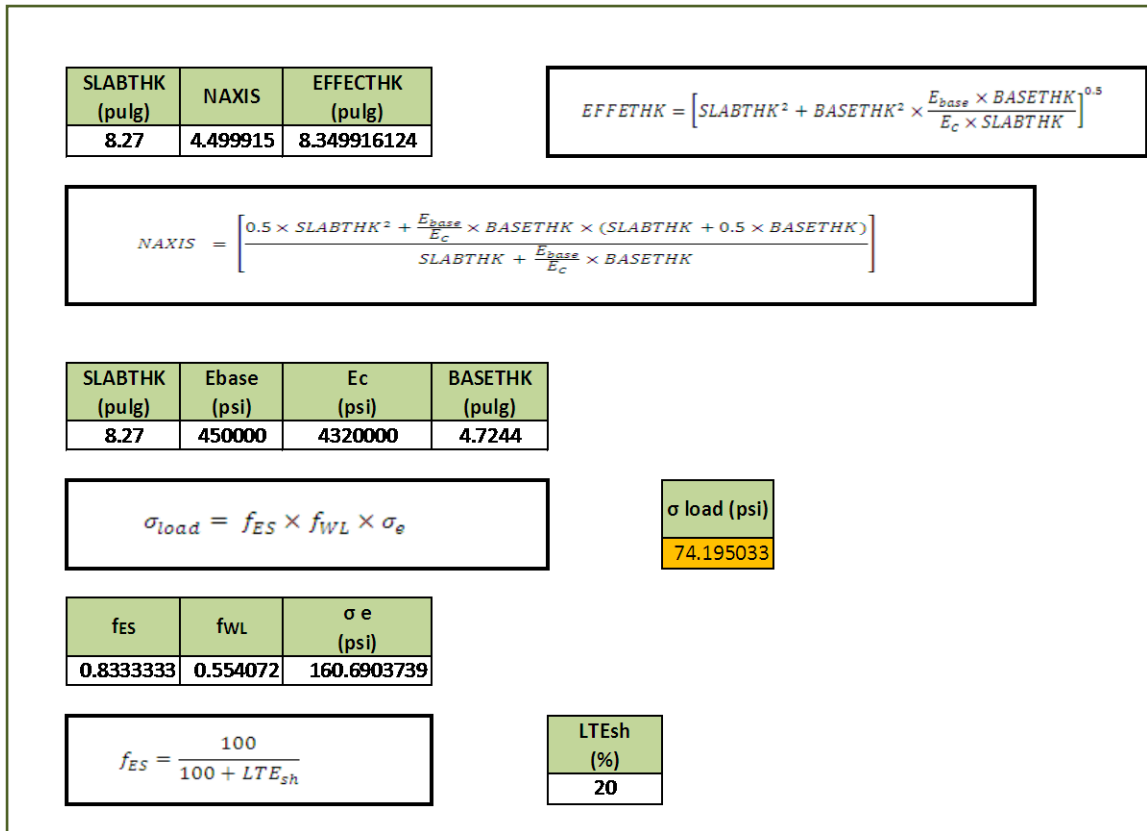


FIGURA 5.6: Continuación Modelo Agrietamiento Transversal HDM-4.

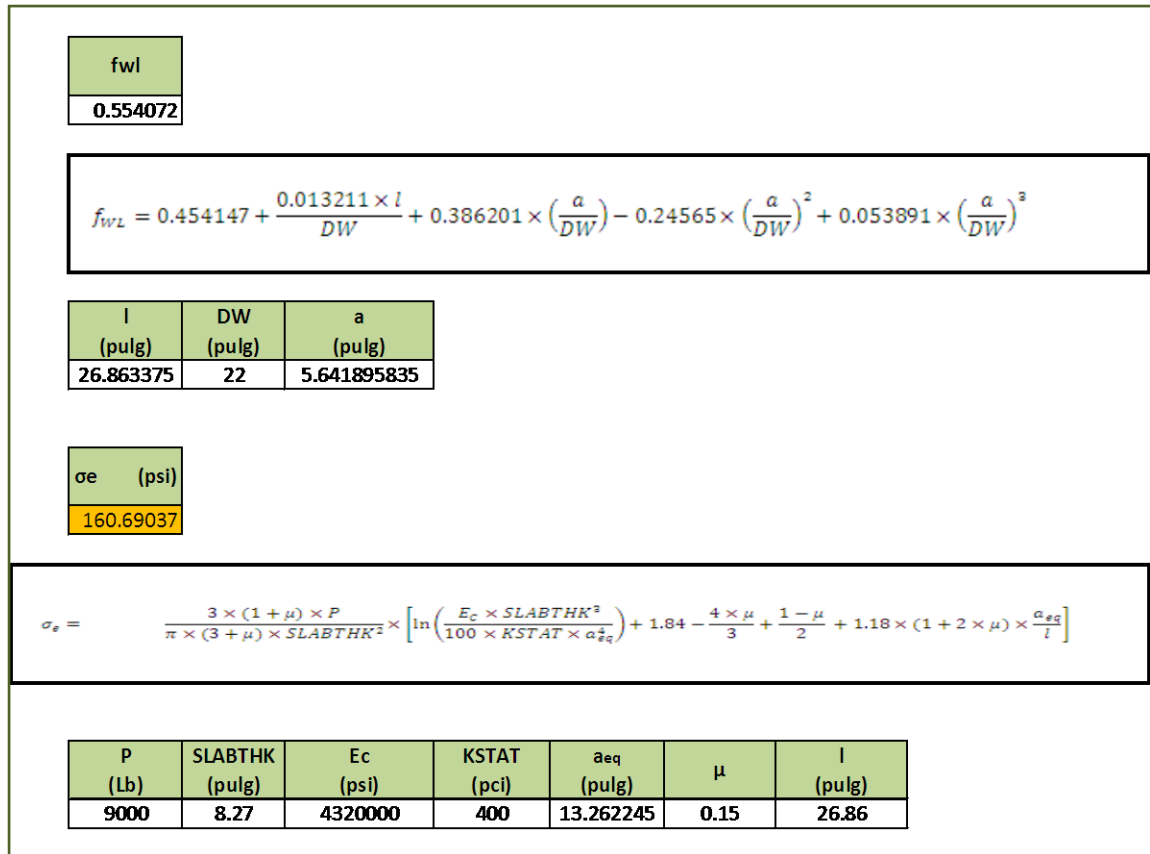


FIGURA 5.7: Continuación Modelo Agrietamiento Transversal HDM-4.

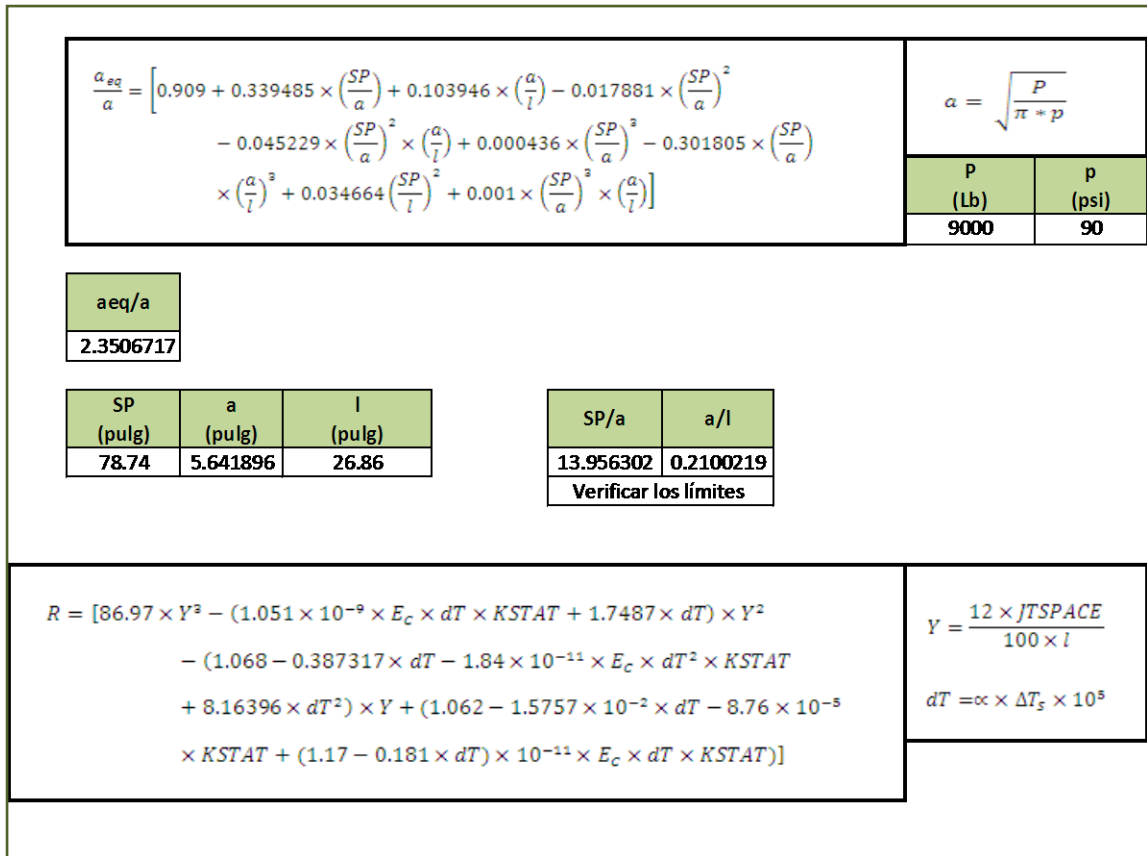


FIGURA 5.8: Continuación Modelo Agrietamiento Transversal HDM-4.

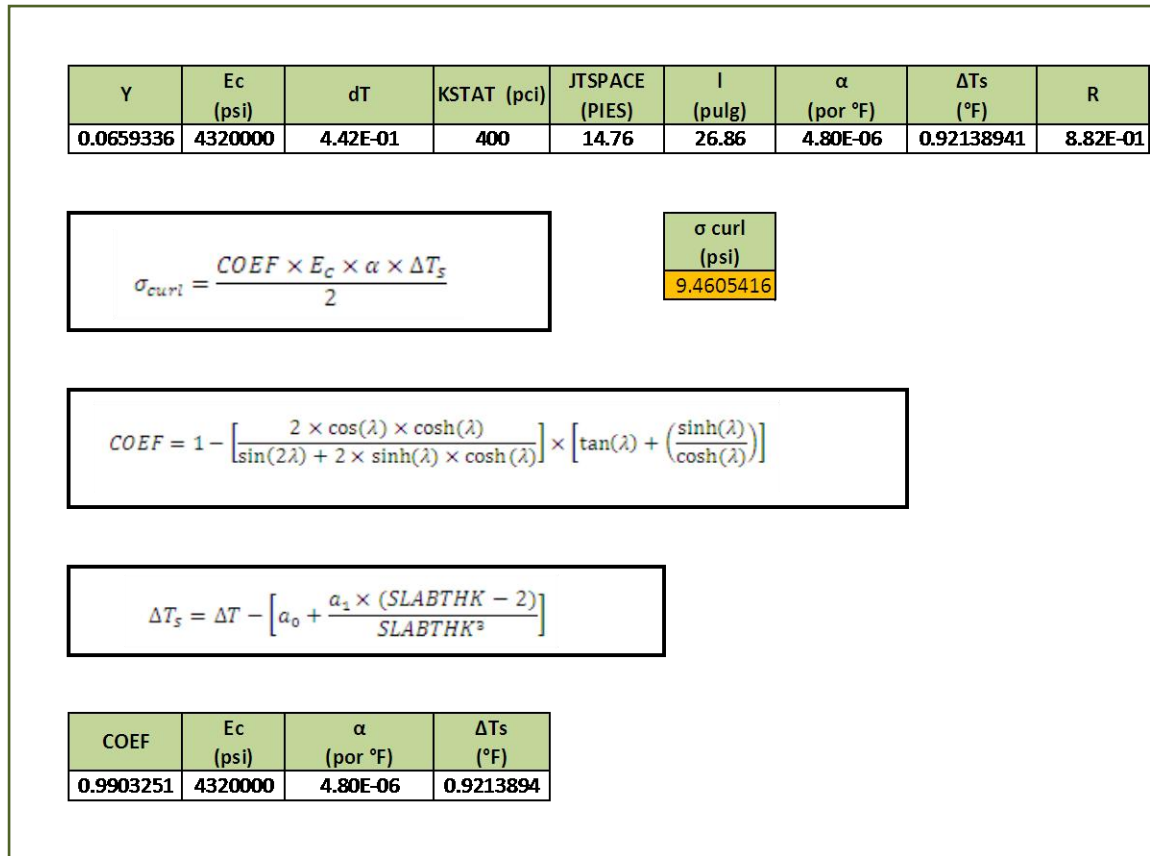


FIGURA 5.9: Continuación Modelo Agrietamiento Transversal HDM-4.

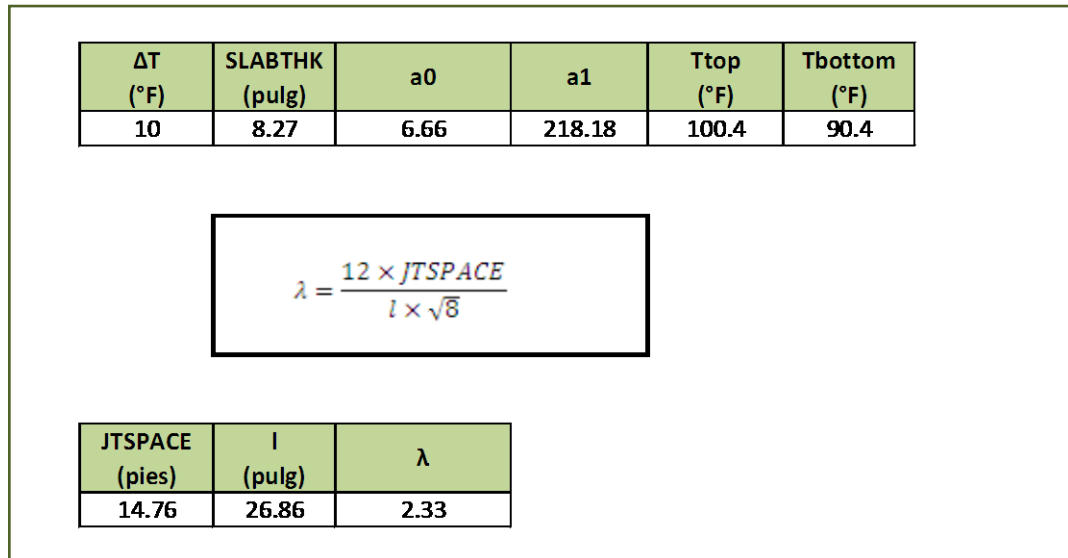


FIGURA 5.10: Continuación Modelo Agrietamiento Transversal HDM-4.

5.2.1.3 DESPOSTILLAMIENTO

SPALL		87.4172924 %						
Kjps	AGE (AÑOS)	JTSPACE (pies)	LIQSEAL	PREFSEAL	DAY90 (DÍAS)	DWLCOR	FI (°F-DÍA)	SILSEAL
1.73659	11	14.76	0	0	292	0	0	1

Imagen 5.11: Modelo Despostillamiento HDM-4.

5.2.1.4 INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)

$IRI = K_{jpr} \times (IRI_0 + 2.6098 \times TFAULT + 1.8407 \times SPALL + 2.2802 \times 10^{-6} \times TCRACKS^2)$				
IRI		174.2231912 in/milla		
		2.74973466 m/km		
Kjpr	IRI₀ (pulg/milla)	TFaultT (pulg/milla)	Spall (%)	Tcrack (número/milla)
0.53879	161.95	0.185560878	87.42	17.31
$TCRACKS = \frac{5280 PCRACK}{100 JTSPACE}$		$TFAULT = \frac{5280 FAULT}{JTSPACE}$		
TCRACK	17.31 número/milla		TFAULT	0.18556088 pulg/milla
JTSPACE (pies)	PCRACK (%)			FAULT (pulg)
14.76	4.84			0.00051873

Imagen 5.12: Modelo Índice de Rugosidad Internacional HDM-4.

Los valores predichos por los modelos anteriormente presentados, son comparados con los valores medidos en el trabajo de campo en la siguiente tabla:

	Sentido		Sentido	
	Santo Tomas- Olocuilta		Olocuilta – Santo Tomas	
	Carril Derecho	Carril Izquierdo	Carril Derecho	Carril Izquierdo
Escalonamiento				
Valor medido (pulg)	0.00051873	0.00048326	0.000153845	0.00079361
Valor predicho (pulg) con factor de calibración predeterminado $k_{jpdf} = 1$	3249.2354	2302.3540	3143.4225	2464.6342
Coefficiente de calibración ajustado	1.5965E-7	2.10 E -07	4.89 E-07	3.22 E-07
Agrietamiento Transversal				
Valor medido (%)	4.84	0.67	3.33	1.11
Valor predicho (%) con factor de calibración predeterminado $k_{jpc} = 1$	Dado que el valor repeticiones de carga admisible se vuelve ilimitado este valor es cero. *Ver análisis.			
Coefficiente de calibración ajustado	Ya que el valor de repeticiones de carga admisible es demasiado alto, este valor debería de ser extremadamente alto y se vuelve incoherente un valor para este factor. *Ver análisis.			
Despistillamiento				
Valor medido (%)	87.42	53.14	90.23	58.83
Valor predicho (%) con factor de calibración predeterminado $k_{jps} = 1$	50.34	50.34	50.34	50.34
Coefficiente de calibración ajustado	1.73659	1.05562	1.79241	1.16865
Índice de Rugosidad Internacional (IRI)				
Valor medido (%)	2.75	2.703	2.724	2.709
Valor predicho (%) con factor de calibración predeterminado $k_{jpr} = 1$	5.104	4.107	5.2	4.277
Coefficiente de calibración ajustado	0.53879	0.65814	0.52385	0.63339

Tabla 5.20: Comparación entre datos predichos por los modelos y los obtenidos en campo.

5.2.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS MODELOS DE HDM-4

Los valores de **escalonamiento** que predice el modelo son bastante elevados por lo que el factor de calibración debe ser modificado para ajustarlo al valor medido, haciendo esto para cada carril ya que los modelos están para desarrollarse por carril.

Si observamos los valores de calibración por carril, nos damos cuenta que los valores se vuelven más cercanos en los carriles de la misma dirección, dándose esto porque el sentido de Olocuilta Santo Tomás los vehículos circulan hacia arriba generando velocidades más lentas y que el vehículo genere mayor fricción y permanezca más tiempo la carga, incrementando el escalonamiento. Debido a eso proponemos dos factores de calibración, uno para el sentido Santo Tomás – Olocuilta $((1.5965E-7+2.10 E^{-07})/2 = 1.8483E-07)$, siendo este el promedio de los dos carriles y el otro para el sentido Olocuilta – Santo Tomás $((4.89E-07+3.22E-07)/2=4.055E-07)$.

Para el **agrietamiento transversal** observamos que el valor de cargas admisibles se vuelve ilimitado por que la relación de esfuerzos es menor a 0.5, lo que nos generan valores de agrietamiento transversal de 0.00%, viendo esto no podemos modificar el factor de calibración porque nos daría un valor demasiado grande que no es lógico.

Observando que el problema está en el cálculo del daño por fatiga, se decidió calcular éste por la metodología de la PCA, de esta manera al introducir el valor real de daño por fatiga verificaremos si la fórmula predice en forma adecuada el % de losas agrietadas.

$$PCRACK = \frac{100}{1 + a (Kj p_c FD)^b}$$

5.2.2.1 Cálculo del Daño por Fatiga por metodología PCA para carril derecho sentido Santo Tomás Olocuilta.

Para la determinación del daño por fatiga es necesario conocer las cargas por eje tanto simple como tándem, para ello se solicitó al Vice- Ministerio de Transporte datos de pesaje de la estación fija más cercana al tramo en análisis, siendo esta la “Estación de pesaje Zacatecoluca” de la que nos proporcionaron la información presentada en las tablas 5.21 y 5.22 para el día 10 de agosto de 2011.

PESO MAXIMO PERMISIBLE POR TIPO DE VEHICULOS




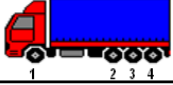
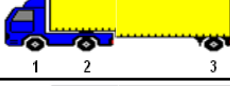
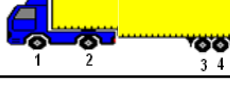
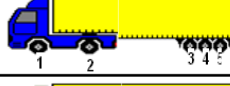
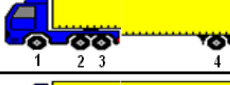
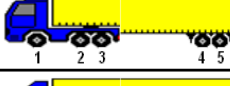
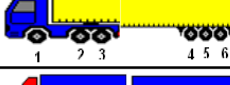
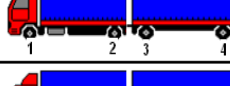
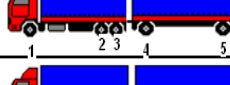
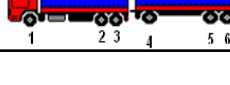
COD	TIPO DE VEHICULO	ESQUEMA DEL VEHICULO	PESO MAXIMO AUTORIZADO										PESO TOTAL EN TON. Mts.	DIMENSIONES MAXIMAS EN METROS			
			1er. EJE	2 do. EJE	3er. EJE	4to. EJE	5to. EJE	6to. EJE	7° EJE	8° EJE	9° EJE	10° EJE		LARGO	ANCHO	ALTO	
			1	C-2A		1.5 A 4.0	2.5 A 6.0										
2	C-2		5.00	10.00										15.00	12.	2.6	4.15
3	C-3		5.00	16.50										21.50	12.0	2.6	4.15
4	C-4		5.00	20.00										25.00	16.75	2.6	4.15
5	T2-S1		5.00	9.00	9.00									23.00	16.75	2.6	4.15
6	T2-S2		5.00	9.00	16.00									30.00	17.5	2.6	4.15
7	T2-S3		5.00	9.00	20.00									34.00	17.5	2.6	4.15
8	T3-S1		5.00	16.00		9.00								30.00	20.3	2.6	4.15
9	T3-S2		5.00	16.00		16.00								37.00	20.3	2.6	4.15
10	T3-S3		5.00	16.00		20.00								41.00	20.3	2.6	4.15
11	C2-R2		5.00	10.00	4.5a	4.5a							24.00	18.3	2.6	4.15	
			5.00	10.00	4.5a	7.0b						26.50					
			5.00	10.00	7.0a	7.0b						29.00					
12	C3-R2		5.00	16.50		4.5a	4.5a						30.50	18.3	2.6	4.15	
			5.00	8.25		4.5a	7.0b					33.00					
			5.00	8.25		7.0b	7.00					35.50					
13	C3-R3		5.00	16.50		4.0a	13.00						38.50	18.3	2.6	4.15	
			5.00	8.25	8.25	6.5b	6.50	6.50				41.00					

Tabla 5.21: Pesos máximos permitidos por tipo de vehículo ¹

¹ Fuente: Vice Ministerio de Transporte (VMT).

TIPO VEHICULO	EJE 1	SobrePeso 1	EJE 2 - 3	SobrePeso 2	EJE 4, 5 - 6	SobrePeso 3	PESO MAXIMO PERMISIBLE	PESO TOTAL	TOTAL SOBREPESO
C-2	4200	0	7650	0			15,000	11,850	0
C-2	5100	100	8400	0			15,000	13,500	0
C-2	3300	0	6550	0			15,000	9,850	0
C-2	4150	0	5950	0			15,000	10,100	0
C-2	2850	0	5450	0			15,000	8,300	0
C-2	2500	0	4550	0			15,000	7,050	0
C-2	2850	0	5300	0			15,000	8,150	0
C-2	3000	0	3750	0			15,000	6,750	0
C-2	3900	0	8350	0			15,000	12,250	0
C-2	5100	100	10650	650			15,000	15,750	750
C-2	4300	0	7400	0			15,000	11,700	0
C-2	4250	0	8050	0			15,000	12,300	0
C-2	4450	0	6800	0			15,000	11,250	0
C-2	3750	0	5900	0			15,000	9,650	0
C-2	3000	0	6850	0			15,000	9,850	0
C-2	3100	0	3700	0			15,000	6,800	0
C-2	3750	0	4350	0			15,000	8,100	0
C-2	3950	0	7600	0			15,000	11,550	0
C-2A	2150	0	5750	0			10,000	7,900	0
C-2A	2650	0	6650	650			10,000	9,300	0
C-2A	3200	0	3900	0			10,000	7,100	0
C-2A	2200	0	5500	0			10,000	7,700	0
C-2A	1900	0	4950	0			10,000	6,850	0
C-2A	2050	0	3000	0			10,000	5,050	0
C-3	4650	0	16000	0			21,500	20,650	0
C-3	5000	0	16700	200			21,500	21,700	200
T3-S2	4600	0	7700	0	4950	0	37,000	17,250	0
T3-S2	5100	100	14250	0	13200	0	37,000	32,550	0
T3-S2	4900	0	12650	0	13000	0	37,000	30,550	0
T3-S2	5050	50	10250	0	8150	0	37,000	23,450	0
T3-S2	4800	0	10650	0	9350	0	37,000	24,800	0
T3-S2	4900	0	10450	0	8800	0	37,000	24,150	0
T3-S2	3550	0	19750	3750	15400	0	37,000	38,700	1700
T3-S2	4750	0	18150	2150	15850	0	37,000	38,750	1750
T3-S3	4650	0	9150	0	12300	0	41,000	26,100	0
T3-S3	4700	0	17700	1700	18200	0	41,000	40,600	0
T3-S3	4650	0	18200	2200	18050	0	41,000	40,900	0

Tabla 5.22: Pesaje en estación Zacatecoluca para un día.²² Fuente: Vice Ministerio de Transporte (VMT).

Además necesitamos información de la Autopista a Comalapa, tales como el espesor de la losa de concreto, k compuesto, módulo de ruptura, factor de seguridad, si la junta es con dovela y si los hombros son de concreto, cuyos valores aparecen en la tabla 5.24.

Revisando la información que de pesajes y viendo que la cantidad de datos no es representativa para definir los pesos de todos los vehículos, decidimos utilizarlos únicamente para sacar el factor de seguridad, es decir, observando cual es el tipo de vehículo que presenta mayor sobrepeso y ver en qué porcentaje este sobrepasa el peso permitido, para luego incrementar los pesos sugeridos por este método en ese factor. Del total de vehículos pesados en ese día el 10.81% sobrepasan el peso permitido. Promediando los sobrepesos encontrados con el número de vehículos pesados ese día tenemos que el sobrepeso promedio por vehículo es de 0.41%, de lo que se propone utilizar un factor de seguridad del 1% para incrementar los pesos por eje.

El número de repeticiones esperadas se calcula para cada peso por eje, para ello necesitamos conocer el número de vehículos comerciales que pasan por la Autopista a Comalapa, sacando esto de los registros históricos de TPDA en el Tramo de prueba.

Multiplicando el número de vehículos comerciales por el factor que se presenta en la tabla 5.23 encontramos el número de repeticiones de carga para cada peso de los ejes simples y tándem.

Carga por eje (KN)	Ejes por 1000 comerciales (ajustado)	Carga por eje (KN)	Ejes por 1000 comerciales (ajustado)
Eje Simple		Eje Tándem	
125-133	0.58	213-231	1.96
115-125	1.35	195-213	3.94
107-115	2.77	178-195	11.98
97.8-107	5.92	160-178	34.27
88.8-97.8	9.83	142-160	81.42
80-88.8	21.67	125-142	85.54
71.1-80	28.24	107-125	152.23
62.2-71.1	38.83	88.8-107	90.52
53.3-62.2	53.94	71.1-88.8	112.81
44.4-53.3	168.85	53.3-71.1	124.69

Tabla 5.23: Datos sobre distribución de las cargas del tránsito.

Espesor de la losa:	210	mm
k estático:	108.84	Mpa/m
Módulo de Ruptura, MR:	4.42	Mpa
Factor de seguridad:	1.1	

Junta con dovela	Si	<u> x </u>	No	<u> </u>
Hombro de concreto	Si	<u> x </u>	No	<u> </u>
Año de análisis	2002			

Carga por eje (KN)	Carga factorizada (KN)	Repeticiones Esperadas	Repeticiones Admisibles	Daño por fatiga
Esfuerzo Equivalente:				1.172
Ejes Sencillos				Relaciones de Esfuerzos:
				0.265
133.00	0.00	0.00	5000000	0
125.00	0.00	0.00	ilimitado	0
115.00	0.00	0.00	ilimitado	0
107.00	0.00	0.00	ilimitado	0
98.00	0.00	0.00	ilimitado	0
89.00	0.00	0.00	ilimitado	0
80.00	0.00	0.00	ilimitado	0
Esfuerzo Equivalente:				0.982
Eje Tándem				Relaciones de Esfuerzos:
				0.222
231.00	0.00	0.00	ilimitado	0
213.00	0.00	0.00	ilimitado	0
195.00	0.00	0.00	ilimitado	0
178.00	0.00	0.00	ilimitado	0
160.00	0.00	0.00	ilimitado	0
142.00	0.00	0.00	ilimitado	0
125.00	0.00	0.00	ilimitado	0
TOTAL				0

Tabla 5.24: Cálculo del daño por fatiga.

El análisis anterior se calculó para cada año de la vida del pavimento. A continuación se presenta una tabla resumen con los valores de daño por fatiga para cada año y acumulado:

Año	Daño por fatiga	Daño por fatiga acumulado
2001	0.000033872	0.000033872
2002	0.0000340837	0.0000679557
2003	0.000100939	0.000168894
2004	0.00011635	0.000285245
2005	0.00013172	0.000416964
2006	0.000121728	0.000538692
2007	0.000111735	0.000650427
2008	0.000101743	0.00075217
2009	0.0000917508	0.000843921
2010	0.000111227	0.000955148
2011	0.00011267	0.001066415

Tabla 5.25: Daño por fatiga acumulado durante la vida del pavimento.

Con este valor acumulado de daño por fatiga lo sustituimos en el modelo y encontramos el porcentaje de losas agrietadas, haciendo todo lo anterior para cada carril. A continuación se presenta la tabla resumen:

	Sentido Santo Tomás - Olocuilta		Sentido Olocuilta - Santo Tomás	
	Carril Derecho	Carril Izquierdo	Carril Derecho	Carril Izquierdo
Agrietamiento Transversal				
Valor medido (%)	4.84	0.67	3.33	1.11
Daño por fatiga encontrado	0.001066415	0.000279872	0.000909422	0.000402272
Valor predicho (%) con factor de calibración predeterminado $K_{jpc} = 1$	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 5.26: Resumen de agrietamiento transversal.

El porcentaje de losas agrietadas encontrado por el modelo es del 0.00%, luego al calcular el daño por fatiga por la metodología de la PCA, el resultado sigue siendo 0.00%, de lo que podemos concluir que las grietas transversales que presenta la Autopista a Comalapa no son generadas por daño por fatiga, además de tener una relación de esfuerzos menor de 0.5, lo que significa que el número de repeticiones admisibles se vuelve ilimitado y no tendremos daño por fatiga.

Al comparar el valor de **despostillamiento** medido con el predicho nos damos cuenta que el valor de coeficiente de calibración hay que modificarlo para que estos valores coincidan, al hacerlo obtenemos valores de coeficiente de calibración para cada carril cercanos entre sí. Haciendo un promedio de estos factores de calibración proponemos que este valor sea de 1.4383175 para la Autopista a Comalapa.

Para el **IRI** necesitamos los valores de los deterioros predichos ya modificados por sus factores de calibración. El escalonamiento, el despostillamiento y el agrietamiento transversal ya están modificados y adaptados a los resultados medidos en campo. Por lo tanto se desarrolló con los valores que aparecen en las imágenes de las hojas de Excel anteriores y juntando obtuvimos un factor de calibración promedio de 0.5885425 el cual es el que proponemos para la Autopista a Comalapa.

5.2.3 RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS MODELOS DE DETERIORO DE LA GUÍA DE DISEÑO EMPIRICA MECANICISTA.

De la misma manera que para los modelos de comportamiento del HDM-4, la metodología utilizada para verificar si estos modelos de comportamiento predicen en forma adecuada los deterioros en pavimentos rígidos, fue reproducir los modelos en hojas electrónicas de cálculo, cuyo objetivo es que estos sean una herramienta fácil de utilizar y estar a disposición de quien lo necesite, para ello se presenta a continuación las hojas de cálculo que se desarrollaron con los datos de la Autopista a Comalapa, Tramo entre el kilómetro 19 y 23, cuyos valores están justificados en los apartados anteriores.

5.2.3.1 ESCALONAMIENTO

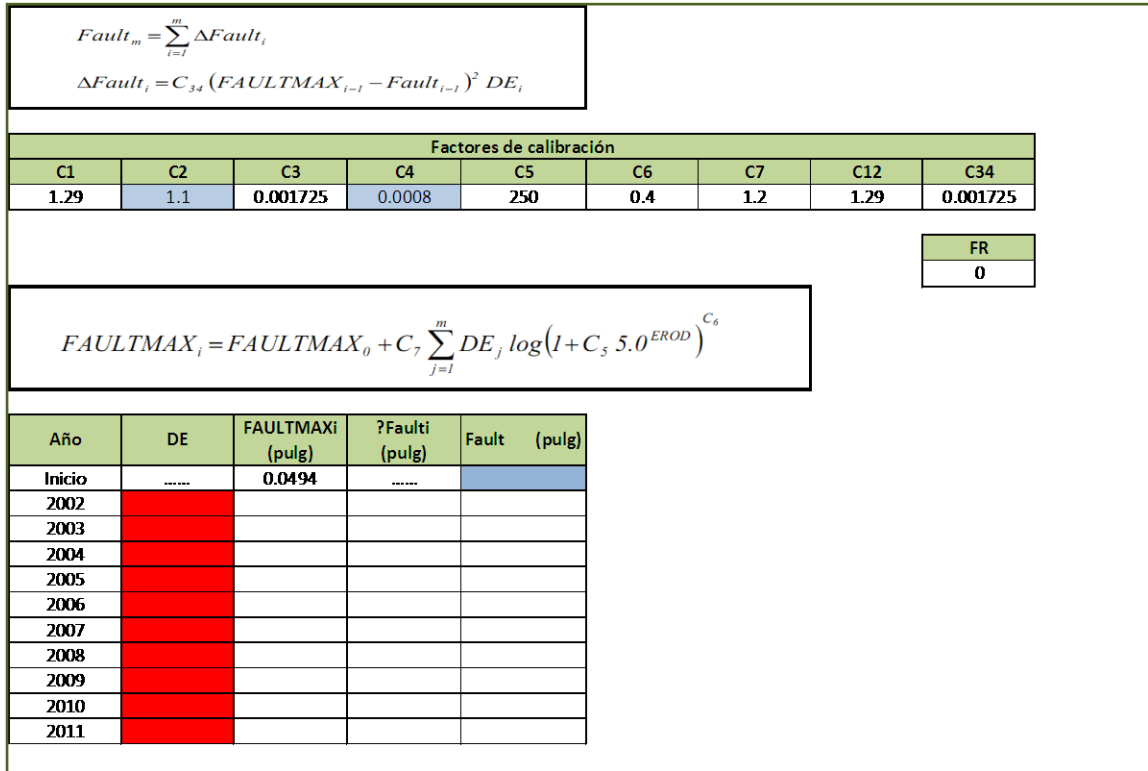


FIGURA 5.13: Modelo Escalonamiento Guía Empírica Mecanicista.

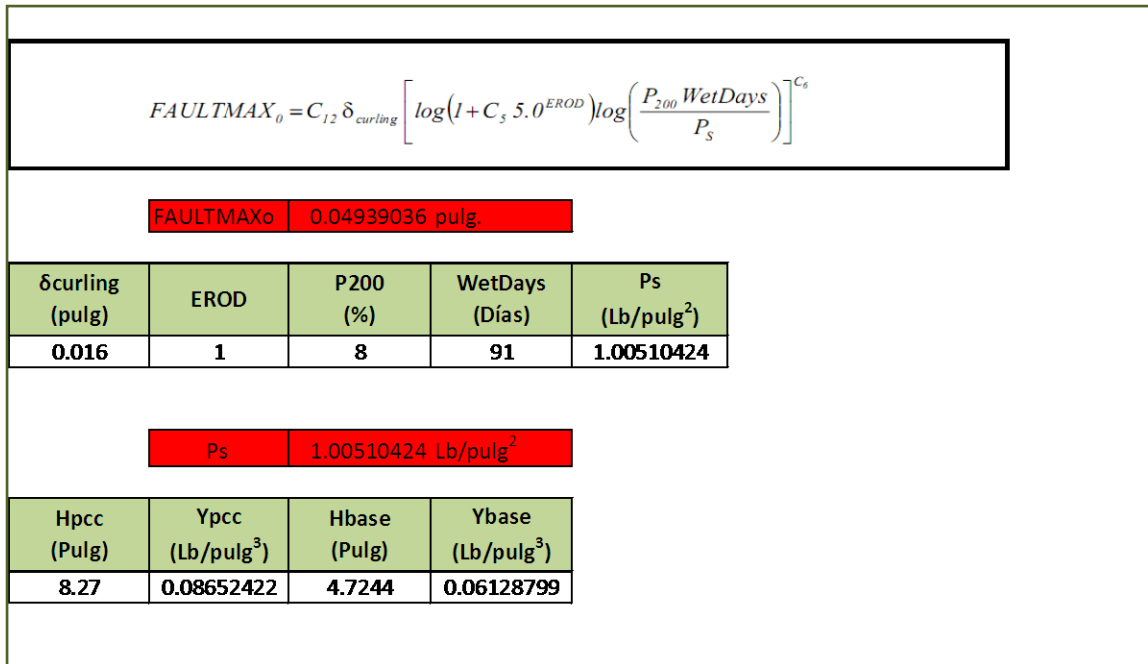


FIGURA 5.14: Continuación Modelo Escalonamiento Guía Empírica Mecanicista.

5.2.3.2 AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL

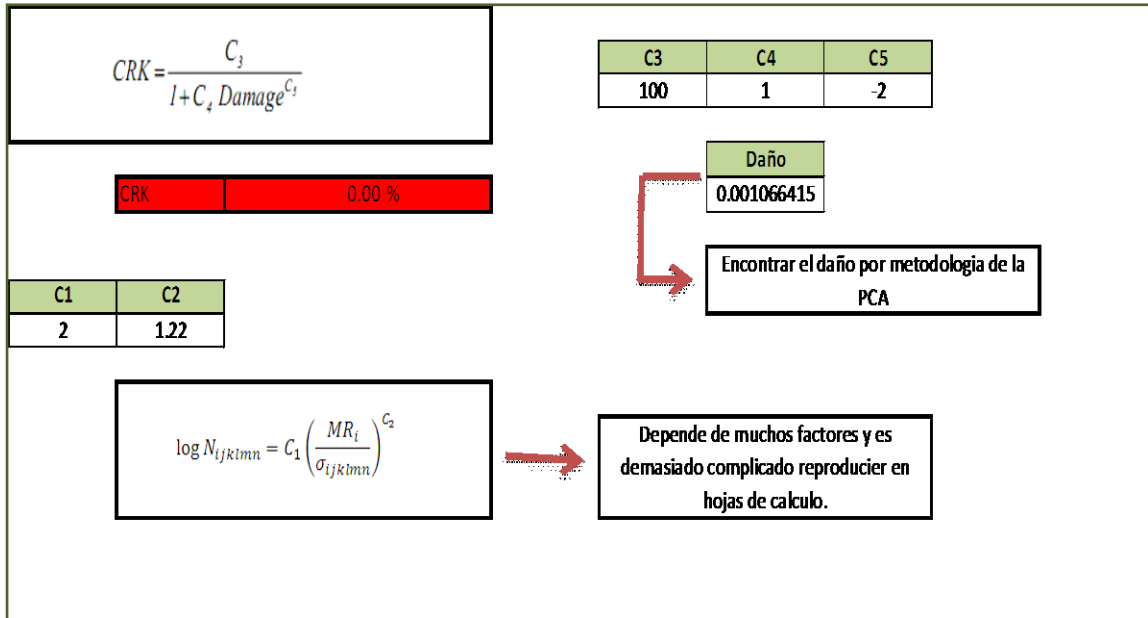


FIGURA 5.15: Modelo Agrietamiento Transversal Guía Empírica Mecanicista.

5.2.3.3 INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)

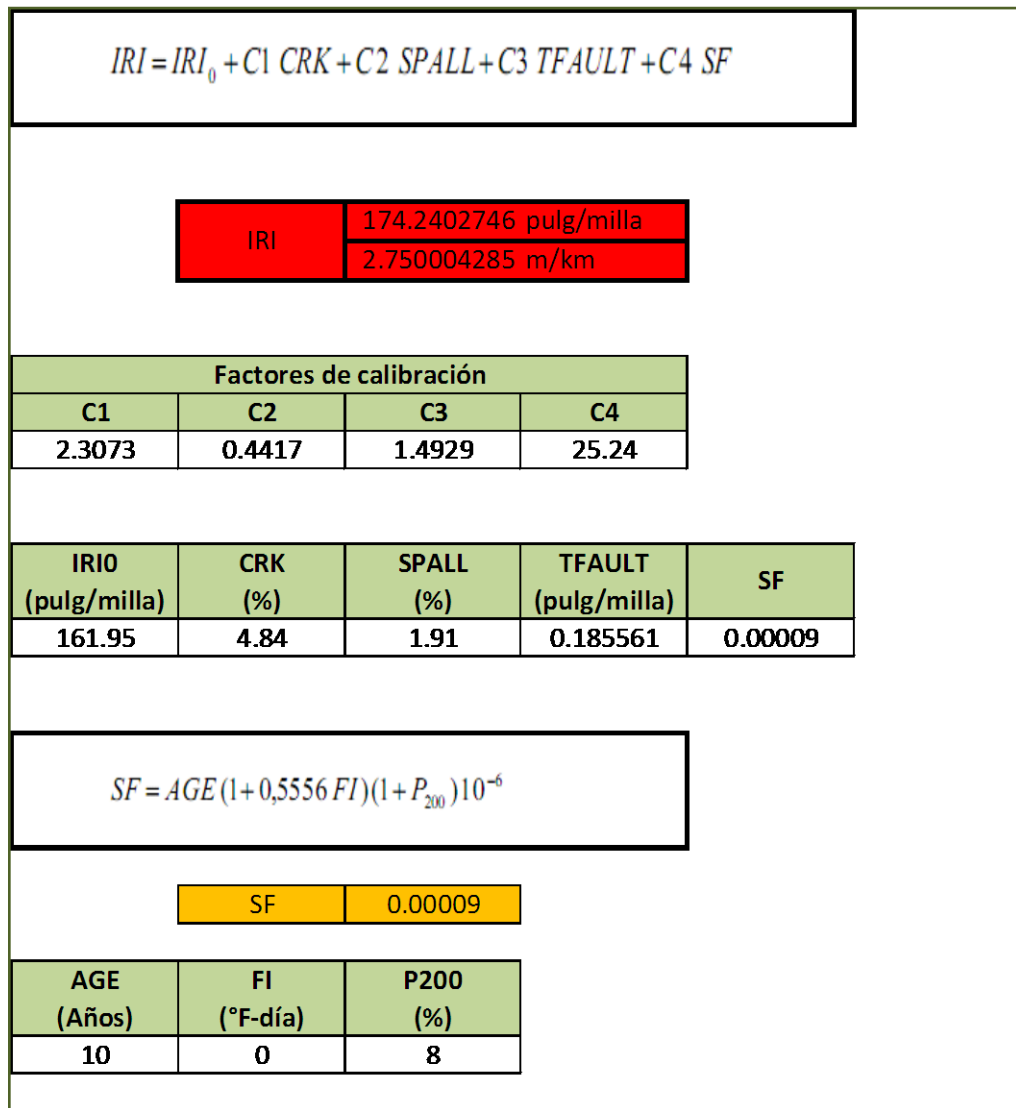


FIGURA 5.16: Modelo IRI Empírica Mecanicista.

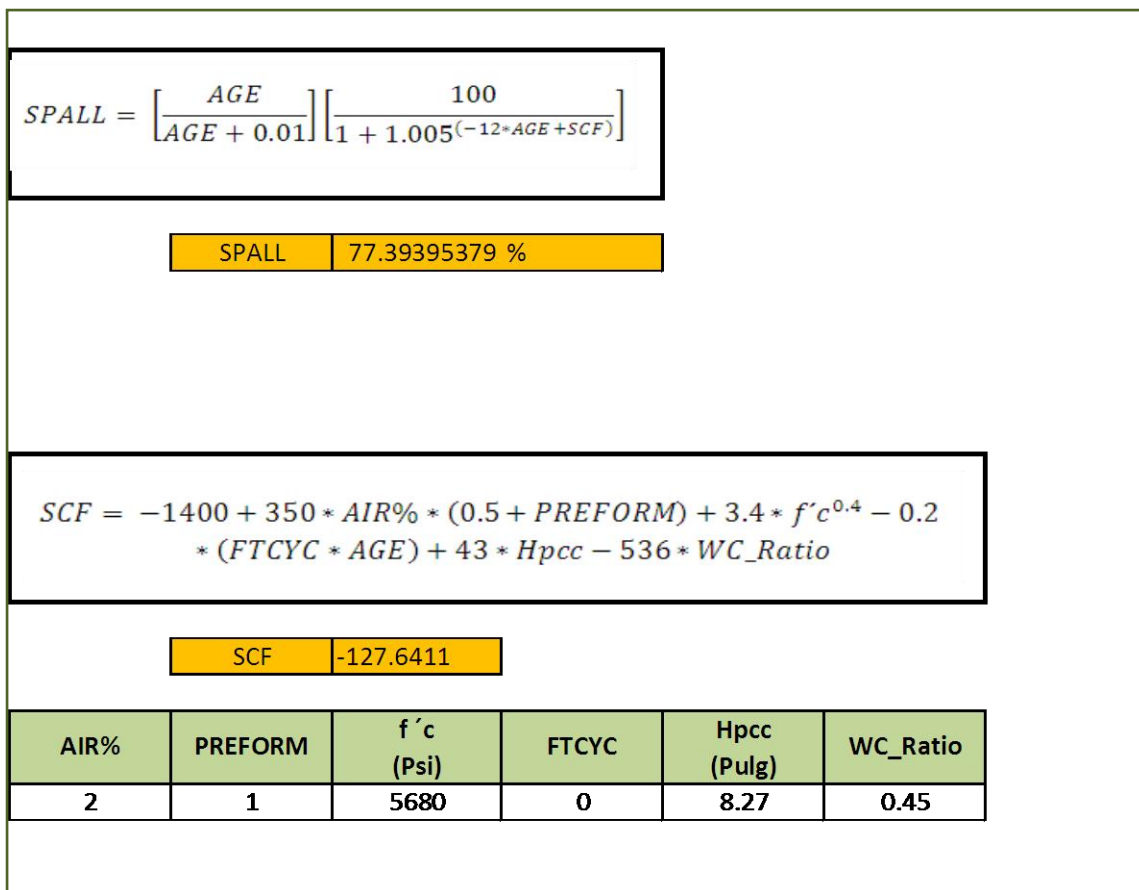


FIGURA 5.17: Continuación Modelo IRI Empírica Mecanicista.

5.2.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS MODELOS DE LA GUÍA DE DISEÑO

EMPIRICA MECANICISTA

El **modelo de escalonamiento** requiere información que si se tiene en nuestro medio, pero también solicita información que por el momento no está en nuestro alcance, por lo que en nuestro país este modelo no puede ser aplicado por el momento hasta que podamos obtener los valores que se requieren.

El **Agrietamiento Transversal** requiere el cálculo del número admisible de pasadas de carga a la edad “i” (teniendo en cuenta cambios en MR, adherencia entre losa y base y deterioro de banquina), mes “j” (considerando cambios en el valor de k), tipo de eje “k”, intervalo de cargas “l”, diferencia de temperatura “m” y zona transitada por la rueda “n”. Lo cual vuelve muy compleja su reproducción en hojas electrónicas de cálculo.

Para solventar esto se realizó el cálculo del daño por fatiga por medio de la metodología de la PCA (Portland Cement Association), de igual manera que se hizo para el modelo de agrietamiento transversal del HDM-4 y poder realizar la predicción del agrietamiento transversal.

Con este valor acumulado de daño por fatiga lo metemos al modelo de agrietamiento y encontramos el agrietamiento transversal. Encontrando lo siguiente:

	Sentido Santo Tomás - Olocuilta		Sentido Olocuilta - Santo Tomás	
	Carril derecho	Carril izquierdo	Carril Derecho	Carril Izquierdo
Agrietamiento transversal				
Valor medido (%)	4.84	0.67	3.33	1.11
Valor predicho (%) con factores de calibración por defecto	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 5.27: Comparación de valores predichos por el modelo y los obtenidos en campo.

De igual manera que para el HDM-4 nos damos cuenta que el % de losas agrietadas que existen en la Autopista a Comalapa no es generado por fatiga, verificando esto en ambos modelos tanto de la Guía de Diseño Empírica Mecanicista como del HDM-4, utilizando el modelo y la metodología de la PCA para calcularlo y verificar lo que estamos concluyendo.

El modelo del IRI trae implícito el cálculo del despostillamiento, y este no puede ser calibrado lo cual vuelve al modelo deficiente en este aspecto. Si observamos el valor predicho (77.39% severidades media y alta) no coincide con los valores observados que son entre 0 y 2 % para diferentes carriles.

Ya que para el modelo del IRI requerimos el escalonamiento y éste no pudo ser calculado utilizaremos el valor obtenido en campo así como también el despostillamiento que fue mal predicho, viendo así si este modelo predice el IRI en forma adecuada.

Los valores de IRI predichos deben ser modificados porque estos valores difieren en un rango pequeño del valor medido, para ello se realizó una prueba de sensibilidad para ver que factor hacía que estos valores se modificaran, encontrando que el valor a modificar es el C1 (valor por defecto = 0.8203), encontrando los siguientes valores por carril:

	Sentido Santo Tomás - Olocuilta		Sentido Olocuilta - Santo Tomás	
	Carril derecho	Carril Izquierdo	Carril Derecho	Carril Izquierdo
Índice de Rugosidad Internacional (IRI)				
Valor medido (m/km)	2.750	2.703	2.724	2.709
Valor predicho (m/km) con factores de calibración predeterminados	2.636	2.573	2.612	2.59
Factor de calibración C1 modificado	2.3073	13.1409	2.9486	7.6399

Tabla 5.28: Comparación de valores predichos por el modelo y los obtenidos en campo.

Observando los valores de calibración C1, estos no son similares para cada carril, siendo esto lógico dado que este factor está afectando directamente al porcentaje de losas agrietadas que varía con carril, y que a medida que este daño cambie el factor C1 también variará por lo que no es posible calibrar solo con modificar este valor, si no que se requiere generar una ecuación que ayude a encontrarlo, teniendo esta una relación con el incremento de las losas agrietadas, y de igual forma para los otros factores de calibración que afectan los otros deterioros del modelo de IRI de la Guía de Diseño Empírica Mecanicista.

CAPITULO VI

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. El modelo de escalonamiento para el HDM-4 utilizando el factor de calibración por defecto nos genera valores bastante altos, por lo que el factor de calibración se vuelve considerablemente menor, sin embargo el valor que proporciona el modelo ya calibrado es lógico y adaptado a lo que se midió en campo, es decir nos predice un escalonamiento promedio por junta.
2. El Agrietamiento Transversal según el modelo del HDM-4 es del 0.00%, generado esto por tener un número ilimitado de repeticiones de carga admisible de acuerdo a la ley le Miner, verificándose un valor de relación de esfuerzos menor a 0.5, por lo que concluimos que el agrietamiento transversal existente en la Autopista a Comalapa no es generado por fatiga, demostrando ésto con los resultados obtenidos respecto al tipo de agrietamiento observado en el levantamiento de deterioros, y por la respuesta obtenida en la metodología de la PCA para el cálculo del daño por fatiga que se utilizó para verificarlo.
3. El modelo de despostillamiento con el factor de calibración propuesto para la Autopista a Comalapa predice valores coherentes, siendo este el modelo más sencillo del HDM-4. Es importante mencionar, que si el sello de juntas de la Autopista a Comalapa se hubiera realizado el año cinco como se demanda en este tipo de intervención, el despostillamiento medido sería más bajo y se aproximaría más al valor predicho, modificándose menos el factor de calibración.

4. El modelo del HDM-4 para la predicción del IRI requiere los valores de escalonamiento, despostillamiento y porcentaje de losas agrietadas, utilizando los valores medidos en campo con el Perfilómetro laser de la UIDV y aplicando un factor de calibración considerado en el presente trabajo específicamente para el caso de la Autopista a Comalapa, podemos decir que este modelo predice de forma correcta el IRI.

5. El modelo de escalonamiento para la guía de diseño empírica mecanicista requiere información que por el momento en nuestro país no puede ser obtenida, por lo que este modelo no puede ser utilizado actualmente para la predicción del escalonamiento en carreteras locales. Es importante aclaración que para posteriores estudios no se deben utilizar los factores de calibración C2 y C4 ya que estos dependen de una condición climática que no existe en nuestro país.

6. Para el modelo de agrietamiento transversal para la guía de diseño empírica mecanicista generó como resultado cero por ciento de losas agrietadas, esto debido a que el daño por fatiga es considerablemente bajo, generándose similar respuesta en el modelo de agrietamiento de HDM-4 explicado en detalle en la conclusión 2 del presente trabajo.

7. Una de las limitantes que tiene la Guía de Diseño Empírica Mecanicista es que el despostillamiento no puede ser calibrado afectando así el resultado del modelo de IRI. Para poder tener una visión de los valores predichos por el modelo IRI de la Guía de Diseño Empírica Mecanicista se desarrolló utilizando los valores observados en campo, generando resultados cercanos al valor de IRI medido utilizando los factores de calibración por defecto. Haciendo un análisis de sensibilidad se confirma que el factor que más influye en los resultados depende del tipo de deterioro que presente mayor frecuencia en el pavimento, por lo que concluimos que cada factor debería tener una ecuación que esté en función del incremento del deterioro en el tiempo permitiendo así, desarrollar un proceso adecuado de calibración.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que se realice un estudio similar al presentado en este Trabajo de Graduación, desarrollado en un grupo de carreteras tomadas como base del estudio, para tener valores más representativos para el país.
2. Hacer un inventario vial en el cual se pueda obtener toda la información que se requiere en los modelos tanto de la Guía de Diseño Empírica Mecanicista como del HDM-4, con información histórica confiable y desarrollada bajo un control de calidad de la información que permita tener certeza de los valores a utilizar en posteriores estudios.
3. Se recomienda seguir controlando el progreso de los deterioros de la Autopista a Comalapa e ir verificando como varían en el tiempo para poder afinar los resultados obtenidos en esta investigación.
4. Para posteriores estudios, se recomienda realizar una campaña de pesaje con básculas móviles en el tramo de análisis, dado que en este estudio se obtuvieron pero de una estación fija cercana, siendo lo ideal verificar los pesos justo en el tramo que se está analizando.
5. Se recomienda que para tener un análisis completo de los modelos, se generen ecuaciones para encontrar los factores de calibración, en donde estas ecuaciones sean función de los parámetros que influyen propiamente en el deterioro y que se relacionan directamente con los coeficientes de calibración, obteniéndose de esta manera factores representativos para nuestro país.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORT OFFICIALS

(AASHTO), 1993

GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURA VIAL

Hernán de Solminihaç T.

Ediciones Universidad Católica de Chile, Tercera Edición

THE HIGHWAY DEVELOPMENT AND MANAGEMENT SERIES

Volume IV: Analytical Framework and Model Descriptions

J. B. Odoki, Henry G. R. Kerali

PIARC

MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS

Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA)

Noviembre, 2002.

CALIBRACIÓN A CONDICIONES LOCALES EN ARGENTINA DE LA GUÍA EMPÍRICO-MECANICISTA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

MSc. Ing. Oscar Víctor Cordo, Dr. Ing. Marcelo Gastón Bustos, MSc. Ing. Pablo Girardi Mancini, Ing. Miguel Oscar Pereyra.

Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña. Facultad de Ingeniería, 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.

THE LITTLE BOOK OF PROFILING, BASIC INFORMATION ABOUT MEASURING AND INTERPRETING ROAD PROFILES

Michael W. Sayers

Steven M. Karamihas

September 1998.

USO Y CALIBRACIÓN DE DEFLECTÓMETROS DE IMPACTO EN LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS

Publicación Técnica No 252

Sanfandila, Qro, 2004

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

Javier Ernesto Argueta Mejía, Elsa Elida Castro Hernández

Septiembre 2009

DISTRESS IDENTIFICATION MANUAL FOR THE LONG-TERM PAVEMENT PERFORMANCE PROYECT.

Strategic Highway Research Program (SHARP-P-338)

INGENIERIA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS

Alfonso Montejo Fonseca

Bogotá D.C. 2002

GUIDE FOR MECHANISTIC-EMPIRICAL DESIGN OF NEW AND REHABILITATED PAVEMENT STRUCTURES

National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board National Research Council (NCHRP)

ANEXOS