

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



**CALIBRACIÓN DE MODELOS DE AHUELLAMIENTO  
PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL PROGRAMA  
HDM-4 EN EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

**ANA GABRIELA BARRERA FUENTES**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

**INGENIERA CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO 2018

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIO GENERAL :

**MSc. CRISTOBAL HERNAN RIOS BENITEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL**

SECRETARIO :

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

DIRECTOR :

**ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES**

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERA CIVIL**

Título :

**CALIBRACIÓN DE MODELOS DE AHUELLAMIENTO  
PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL PROGRAMA HDM-4  
EN EL SALVADOR**

Presentado por :

**ANA GABRIELA BARRERA FUENTES**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA**

SAN SALVADOR, MAYO 2018

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA**

## DEDICATORIA

**A DIOS:** Por brindarme salud, perseverancia, fortalece y por principalmente la vida. Por permitirme afrontar los retos que se presentaron en el transcurso de la carrera universitaria.

**A MI MADRE:** Concepción de Barrera, por su apoyo, esfuerzo y dedicación en formar una persona con principios y valores, y por ser mi soporte durante toda la carrera universitaria.

**A MI PADRE:** Saúl Barrera, por su apoyo, consejos y guía, por su lucha en formarnos a ser personas de bien.

**A MIS HERMANOS:** Laura, Saúl Ernesto y Andrés Barrera, por estar siempre pendientes de mí, animándome a seguir adelante luchando por mis propósitos.

**A MI FAMILIA:** A mis tíos, tías, primos y primas, por formar parte de mi crecimiento personal y profesional. Especialmente a mi tía Astrid Villalta, por sus consejos y amor.

**A MIS AMIGAS:** Karla Janeth, Karla Nohemi, Joselyn, Julissa, Lisseth mis compañeras de lucha durante la carrera universitaria, por todos los momentos compartidos, los consejos, noches de desvelo estudiando. A mis amigas de bachillerato Karina, Asiria y Evelin por su apoyo incondicional.

**A MIS PROFESORES:** Por instruirme y compartirme sus conocimientos, experiencia, han contribuido en mi formación profesional.

Mis profundos y sinceros agradecimientos, que Dios los bendiga.

**DECIR A DIOS ES CRECER.**

**ANA GABRIELA BARRERA FUENTES**

## **AGRADECIMIENTOS ESPECIALES:**

**A MI ASESOR:** Ing. Mauricio Ernesto Valencia por guiarme durante toda la investigación aclarando dudas y proporcionándome sus conocimientos. Así como la paciencia brindada.

**Al Ing. Dilber Sánchez:** Por su contribución en mi formación académica, por sus consejos y conocimiento. Por estar siempre dispuesto a impartir sus conocimientos.

**Al Ing. Gilberto Lima:** Por contribuir en la investigación proporcionando la información sobre la Red Vial requerida desde la Dirección de planificación de la obra pública (DPOP) del Ministerio de Obras Públicas (MOP).

A la **Dirección de Planificación de la Obra Pública** del Ministerio de Obras Públicas: Por facilitarme la información del Inventario Vial de nuestro país., necesaria para el desarrollo este Trabajo de graduación.

A la **Dirección de Inversión de la Obra Pública** del Ministerio de Obras Públicas: Especialmente al Ing. Raúl Alfaro coordinador de proyectos de

dicha dirección por su ayuda y consejos durante el desarrollo de la investigación.

Al **Dr. Marcelo G. Bustos**: Mis más sinceros agradecimientos por brindarme su valioso aporte de manera eficaz y elocuente en la realización de esta investigación al proporcionar su tiempo, conocimiento, sugerencias. Sin importar la distancia fue de mucho apoyo.

Al **Ing. Jorge Oswaldo Rivera Flores**: Por su atención y amabilidad en la disposición de aclarar cualquier respecto al desarrollo del trabajo de graduación.

Al **personal docente de la Escuela de Ingeniería Civil**: Especialmente a Roxana Galicia secretaria de la Escuela de Ingeniería Civil por brindarme la paciencia y conocimiento respecto a los procedimientos administrativos a lo largo de la carrera. Así como a todos los catedráticos por brindarnos todo el conocimiento básico de la carrera, los cuales aplicaremos en nuestro ámbito laboral.



## INDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>xx</b>
<b>CAPITULO I: ANTEPROYECTO</b> .....	<b>xxii</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.3 OBJETIVOS.....	8
1.3.1 OBJETIVO GENERAL: .....	8
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	8
1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	9
1.4.1 ALCANCES.....	9
1.4.2 LIMITACIONES.....	9
1.5 JUSTIFICACIONES.....	10
<b>CAPITULO II: GENERALIDADES.</b> .....	<b>12</b>
2.1 GENERALIDADES DE LOS PAVIMENTOS.....	13
2.1.1 ¿QUE ES UN PAVIMENTO? .....	13
2.1.2 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.....	14
2.1.3 TIPOS DE PAVIMENTO .....	18
2.2 EFECTO DE LAS CARGAS EN LOS PAVIMENTOS.....	30
2.3 DISTRIBUCCION DE PRESIONES SOBRE UN PAVIMENTO.....	34
2.4 COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS.....	37
2.4.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	37
2.4.2 ETAPA DE CONSTRUCCION.....	38
2.4.3 ETAPA DE DETERIORO LENTO Y POCO VISIBLE.....	38
2.4.4 ETAPA DE DETERIORO ACELERADO Y DE QUIEBRE.....	38
2.4.5 ETAPA DE DESCOMPOSICION TOTAL.....	39
2.5 TIPOS DE DAÑOS EN LOS PAVIMENTOS.....	41

2.5.1	DAÑOS: FISURAS Y GRIETAS.....	42
2.5.2	DEFORMACIONES SUPERFICIALES. ....	50
2.5.3	DESINTEGRACION EN PAVIMENTOS ASFALTICOS. ....	57
2.5.4	OTROS DETERIOROS.....	60
2.6	SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS.....	62
2.6.1	DEFINICIONES.....	63
2.6.2	CARACTERÍSTICAS.....	66
2.7	NIVELES DE GESTION DE PAVIMENTOS. ....	67
2.8	SISTEMAS DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS COMO HERRAMIENTA. 69	
2.8.1	HDM-4 EN LA GESTIÓN DE PAVIMENTO. ....	70

### **CAPITULO III: MODELO DE DETERIORO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES .. 75**

3.1	INTRODUCCION A LOS MODELOS DE DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS.....	76
3.2	TIPOS DE DETERIORO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES MODELADOS EN HDM-4.....	78
3.2.1	DETERIOROS SUPERFICIALES. ....	78
3.2.2	DETERIOROS RELACIONADOS CON LA DEFORMACION DEL PAVIMENTO.....	79
3.2.3	DETERIOROS RELACIONADOS CON LA TEXTURA SUPERFICIAL. ....	79
	.....	80
3.3	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE DETERIOROS MEDIANTE HDM-4. 81	
3.4	MODELO DE DETERIORO: AHUELLAMIENTO.....	83
3.4.1	DENSIFICACIÓN INICIAL:.....	83
3.4.2	DEFORMACIÓN ESTRUCTURAL:.....	85
3.4.3	DEFORMACIÓN PLÁSTICA:.....	86
3.4.4	USO DE LLANTAS CON ADITAMENTOS:.....	87
3.4.5	PROFUNDIDAD TOTAL DEL AHUELLAMIENTO:.....	88
3.5	CALIDAD DE CONSTRUCCION (CDS Y CDB).....	89
3.6	COMPACTACION RELATIVA (COMP).....	91

<b>CAPITULO IV: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....</b>	<b>92</b>
4.1 INTRODUCCIÓN.....	93
4.1.1. SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE DETERIORO HDM-4 .....	94
4.1.1 IMPORTANCIA DE LA SENSIBILIDAD DEL HDM-4 .....	96
4.1.2 SENSIBILIDAD EN LOS MODELOS DE DETERIOROS Y EFECTOS DE LAS OBRAS (RDWE). .....	99
4.2 DEFINICION DE LA INFORMACION A UTILIZAR. ....	113
4.2.1 DESCRIPCION DE DATOS QUE INCIDEN EN LA DETERMINACION DEL DETERIORO AHUELLAMIENTO EN HDM-4 ...	119
4.2.2 LA CLASIFICACION O CATEGORIA EN LAS VIAS EN ESTUDIO. ....	121
4.3 DISEÑO GEOMETRICO.....	125
4.4 FACTORES CLIMATOLÓGICOS. ....	132
4.4.1 INFORMACIÓN DE MEDIO AMBIENTE.....	134
4.4.2 CONDICIONES DE TEMPERATURA.....	135
4.4.3 CONDICIONES DE LLUVIA.....	135
4.5 DRENAJE .....	136
4.5.1 TIPOS, CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DEL DRENAJE. ....	138
4.5.2 CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES DEL PAVIMENTO. ...	140
4.6 DETERIOROS SUPERFICIALES EN PAVIMENTOS FLEXIBLES EN ESTUDIO. ....	140
4.7 TIPOS DE PAVIMENTOS CONSIDERADOS EN MODELO HDM-4.	147
4.8 HISTORIAL DE REPARACIONES DEL PAVIMENTO.....	148
4.9 SOLICITACIONES DEL TRANSITO.....	149
4.10 INFORMACIÓN DE TRANSITO PARA LOS TRAMOS DE ESTUDIO. ....	152
4.10.1 CARACTERISTICAS DEL TRANSITO. ....	152
4.10.2 COMPOSICION VEHICULAR.....	153
4.10.3 TASA DE CRECIMIENTO VEHICULAR .....	156
4.10.4 FACTOR CAMION (LEF´S) .....	156

4.10.5	ESPECIFICACIONES TECNICAS Y OPERACIONALES PARA VEHICULOS EN ESTUDIO.....	160
4.10.6	RETROCALCULO PARA DETERMINACION DE NUMERO ESTRUCTURAL (SN) .....	161

## **CAPITULO V: PROPUESTA DE CALIBRACIÓN DEL MODELO DE DETERIORO: AHUELLAMIENTO ..... 174**

5.1	DEFINICION DE CALIBRACIÓN.....	175
5.1.1	OBJETIVO DEL MODELO .....	176
5.1.2	LIMITANTES DE UN MODELO.....	177
5.1.3	ASPECTOS IMPORTANTES EN UNA CALIBRACION. ....	178
5.2	ADECUACIÓN DE LOS DATOS AL MODELO.....	179
5.3	CALIBRACIÓN A NIVEL DE PROYECTO.....	181
5.3.1	METODOLOGÍA DE TRAMOS TESTIGOS .....	181
5.3.2	CALIBRACIÓN ESTADISTICA DEL MODELO.....	183
5.4	METODOLOGIA DE CALIBRACIÓN DEL MODELO DE AHUELLAMIENTO EN HDM-4.....	186
5.4.1	CALIBRACION POR METODO GRAFICO.....	193
5.5	CALIBRACION DEL MODELO DE AHUELLAMIENTO.....	194
5.5.1	DETERMINACION DE FACTOR DE INICIAL DE CALIBRACION DE DENSIFICACION INICIAL ( <i>Krid</i> ) .....	195
5.5.2	DETERMINACION DE FACTOR DE CALIBRACION DE DEFORMACION ESTRUCTURAL O PROGRESION DE AHUELLAMIENTO ( <i>Krst</i> )	196
5.5.3	DETERMINACION DE FACTOR DE CALIBRACION DE DEFORMACION PLASTICA O INCREMENTO DE DEFORMACION PLASTICA AHUELLAMIENTO ( <i>Krpd</i> ) .....	197
5.6	CONFIABILIDAD EN LA CALIBRACIÓN.....	210

## **CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 215**

6.1	CONCLUSIONES.....	216
7.2	RECOMENDACIONES.....	216

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>220</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>224</b>
ANEXO A .....	225
ANEXO B .....	228

### INDICE DE FIGURAS.

FIGURA: 2.1.1: PARTES QUE CONSTITUYEN UNA ESTRUCTURA TÍPICA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE Y RÍGIDO.....	14
FIGURA: 2.1.2: CAPA DE SELLO EN UN PAVIMENTO .....	17
FIGURA: 2.1.3: BOULEVARD MONSEÑOR ROMERO, PAVIMENTO RÍGIDO.....	18
FIGURA: 2.1.4: CARRETERA TRONCAL DEL NORTE, PAVIMENTOS FLEXIBLE.....	19
FIGURA: 2.1.5: SECCIÓN TRANSVERSAL: PAVIMENTO RÍGIDO.....	20
FIGURA: 2.1.6: TIPOS DE PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	21
FIGURA: 2.1.7: PAVIMENTO DE CONCRETO SIMPLE SIN DOVELA (JPCP).....	22
FIGURA: 2.1.8: PAVIMENTO DE CONCRETO SIMPLE CON DOVELA (JPCP) .....	22
FIGURA: 2.1.9: PAVIMENTO DE CONCRETO CON REFUERZO DISCONTINUO (JRCP) .	23
FIGURA: 2.1.10: PAVIMENTO DE CONCRETO CON REFUERZO CONTINUO (CRCP). ..	24
FIGURA: 2.1.11: SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.....	25
FIGURA: 2.2.1: EJE SIMPLE.....	30
FIGURA: 2.2.2: EJE SIMPLE DE DOBLE RUEDA .....	31
FIGURA: 2.2.3: EJE TÁNDEM. ....	31
FIGURA: 2.2.4: EJE TRIDEM.....	32
FIGURA: 2.3.1: MODELO DE BOUSSINESQ PARA LA DISTRIBUCIÓN DE CARGAS A LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE. ....	34
FIGURA: 2.3.2: DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN UN PAVIMENTO.....	35
FIGURA: 2.3.3: DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN UN PAVIMENTO RÍGIDO. ....	36
FIGURA: 2.3.4: DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN UN PAVIMENTO FLEXIBLE. ....	37
FIGURA: 2.4.1: DETERIORO DEL PAVIMENTO A TRAVÉS DEL TIEMPO.....	41

FIGURA: 2.5.1: PIEL DE COCODRILO.....	43
FIGURA: 2.5.2: FISURA EN BLOQUE.....	44
FIGURA: 2.5.3: FISURA EN ARCO. ....	45
FIGURA: 2.5.4: FISURA TRANSVERSAL.....	47
FIGURA: 2.5.5: FISURA LONGITUDINAL. ....	48
FIGURA: 2.5.6: FISURAS POR DEFLEXIÓN DE JUNTAS. ....	50
FIGURA: 2.5.7: AHUELLAMIENTOS. ....	51
FIGURA: 2.5.8: CORRIMIENTO.....	53
FIGURA: 2.5.9: CORRUGAMIENTO. ....	54
FIGURA: 2.5.10: HINCHAMIENTO. ....	55
FIGURA: 2.5.11: HUNDIMIENTO.....	56
FIGURA: 2.5.12: BACHE. ....	57
FIGURA: 2.5.13: PELADURA.....	58
FIGURA: 2.5.14: DESINTEGRACIÓN DE BORDES CON ACUMULACIÓN DE AGUA. ....	59
FIGURA: 2.5.15: EXUDACIÓN DE ASFALTO. ....	60
FIGURA: 2.5.16: PARCHADO.....	62
FIGURA: 2.6.1: DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE PRINCIPALES ACTIVIDADES QUE COMPONEN UN SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS. ....	65
FIGURA: 3.2.1: INTERACCIÓN ENTRE LOS MODELOS DE DETERIORO DE HDM-4 PARA PAVIMENTOS ASFALTICOS.....	80
FIGURA: 3.3.1: PROCEDIMIENTO PARA LA PREDICCIÓN DEL DETERIORO.....	82
FIGURA: 4.1.1: INICIO Y PROGRESIÓN DEL DETERIORO AHUELLAMIENTO.. ....	100
FIGURA: 4.1.2: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL HDM-4, PARA LOS MODELOS RDWE.....	105
FIGURA: 5.2.1: EFECTO DE LA CONDICIÓN EXISTENTE Y DESPUÉS DE ALGUNA INTERVENCIÓN. ....	180
FIGURA: 5.3.1: CALIBRACIÓN DE MODELOS DE DETERIORO EN TRAMOS TESTIGOS..	183
FIGURA: 5.3.2: MINIMIZACIÓN DE CUADRADOS DE LA DIFERENCIA ENTRE VALORES ESTIMADOS Y MEDIDOS. ....	184

FIGURA: 5.3.3: SUMA DE DIFERENCIA DE LOS CUADRADOS DE LAS DIFERENCIAS DE LOS DATOS PREDICHOS Y MEDIDOS CONTRA EL VALOR DE LOS FACTORES DE CALIBRACIÓN  $K_i$  ..... 185

## INDICE DE TABLAS

TABLA 3.4:1: VALORES POR DEFECTO PARA MODELO DE DENSIDAD INICIAL. .... 84

TABLA 3.4:2: VALORES POR DEFECTO PARA EL MODELO DE DEFORMACIÓN ESTRUCTURAL..... 86

TABLA 3.4:3: VALORES POR DEFECTO PARA EL MODELO DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA. 87

TABLA 3.5:1: SELECCIÓN DEL INDICADOR DE DEFECTOS DE CONSTRUCCIÓN PARA SUPERFICIES BITUMINOSAS..... 90

TABLA 3.5:2: SELECCIÓN DEL INDICADOR DE DEFECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE LA BASE ..... 91

TABLA 4.1:1: CATEGORÍAS DEFINIDAS PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN HDM-499

TABLA 4.1:2: ÍNDICE DE SENSIBILIDAD DE VARIABLES..... 109

TABLA 4.1:3: ÍNDICE Y CLASE DE SENSIBILIDAD SEGÚN IMPACTO..... 109

TABLA 4.1:4: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO DE DETERIORO AHUELLAMIENTO. .... 110

TABLA 4.1:5: EJEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DE ÍNDICE DE SENSIBILIDAD ..... 112

TABLA 4.2:1: DATOS GENERALES ..... 114

TABLA 4.2:2: DATOS GEOMÉTRICOS..... 115

TABLA 4.2:3: DATOS ESTRUCTURALES..... 116

TABLA 4.2:4: DATOS DE AUSCULTACIÓN. .... 117

TABLA 4.2:5: DATOS HISTÓRICOS..... 118

TABLA 4.2:6: DATOS DE CLIMA Y DRENAJE..... 118

TABLA 4.2:7: DATOS DE TRÁNSITO. .... 119

TABLA 4.2:8: MATRIZ DE DISEÑO MINIO PARA SELECCIÓN DE TRAMOS DE ESTUDIO A CALIBRAR. .... 120

TABLA 4.2:9: CARACTERISTICA DE LAS BANDAS EN ESTUDIO.....	121
TABLA 4.2:10: SISTEMA DE CLASIFICACIÓN FUNCIONAL.....	122
TABLA 4.2:11: CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE LAS CARRETERAS REGIONALES, VOLÚMENES DE TRANSITO, NUMERO DE CARRILES Y TIPO DE SUPERFICIE DE RODAMIENTO.....	123
TABLA 4.3:1: DATOS GENERALES DE BANDA DE ESTUDIO CA01E- SANTIAGO DE MARÍA USULUTÁN.....	127
TABLA 4.3:2: CONTINUACIÓN DE DATOS GENERALES DE BANDA DE ESTUDIO CA01E- SANTIAGO DE MARÍA USULUTÁN.....	128
TABLA 4.3:3 CONTINUACIÓN DE DATOS GENERALES DE BANDA DE ESTUDIO CA01E- SANTIAGO DE MARÍA USULUTÁN.....	129
TABLA 4.3:4: DATOS GEOMÉTRICOS PARA BANDA DE ESTUDIO.....	130
TABLA 4.3:5: CONTINUACIÓN DE DATOS GEOMÉTRICOS PARA BANDA DE ESTUDIO...	131
TABLA 4.4:1: CLASIFICACIÓN POR HUMEDAD.....	133
TABLA 4.4:2: CLASIFICACIÓN POR TEMPERATURA.....	134
TABLA 4.5:1: CARACTERÍSTICAS DE DRENAJE PARA BASE Y/O SUB-BASE GRANULAR. .....	138
TABLA 4.5:2: COEFICIENTES PARA CAPA BASE Y SUB-BASE .....	138
TABLA 4.5:3: CLASIFICACIÓN Y FACTOR DE DRENAJE HDM-4.....	139
TABLA 4.6:1: CONDICIÓN DEL PAVIMENTO CA01E- SANTIAGO DE MARIA, PARA 2015.....	141
TABLA 4.6:2 CONDICIÓN DEL PAVIMENTO CA01E- SANTIAGO DE MARIA, PARA 2015. .....	141
TABLA 4.6:3: CONDICIÓN DEL PAVIMENTO CA01E- SANTIAGO DE MARIA, PARA 2007.....	143
TABLA 4.6:4: CONDICIÓN DEL PAVIMENTO CA01E- SANTIAGO DE MARIA, PARA 2007.....	144
TABLA 4.6:5: CONDICIÓN DEL PAVIMENTO CA01E- SANTIAGO DE MARIA, PARA 2002.....	145



TABLA 4.6:6: CONDICIÓN DEL PAVIMENTO CA01E- SANTIAGO DE MARIA, PARA 2002.....	146
TABLA 4.7:1: CLASIFICACIÓN DE LOS PAVIMENTOS ASFALTICOS EN EL HDM-4.....	147
TABLA 4.10:1: COMPOSICIÓN VEHICULAR, CA01E-SANTIAGO DE MARIA, 2015 .....	154
TABLA 4.10:2 COMPOSICIÓN VEHICULAR, CA01E-SANTIAGO DE MARIA, 2007 .....	154
TABLA 4.10:3 COMPOSICIÓN VEHICULAR, CA01E-SANTIAGO DE MARIA, 2002 .....	155
TABLA 4.10:4: CONFIGURACIÓN VEHICULAR, SIECA 2000 .....	157
TABLA 4.10:5: FACTOR CAMIÓN POR CADA TIPO DE VEHÍCULO EN ESTUDIO.....	158
TABLA 4.10:6: ESAL´S DE DISEÑO, 2015. ....	159
TABLA 4.10:7: FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR DIRECCIÓN.....	159
TABLA 4.10:8: FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL. ....	159
TABLA 4.10:9: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y OPERACIONALES PARA VEHÍCULOS EN ESTUDIO. ....	160
TABLA 4.10:10: GRAFICA PARA CÁLCULO DE COEFICIENTE DE AJUSTE POR TEMPERATURA (PAVIMENTO FLEXIBLE CON BASE GRANULAR) .....	163
TABLA 4.10:11: EVALUACIÓN ESTRUCTURAL PARA CA01E- SANTIAGO DE MARIA, 2015.....	164
TABLA 4.10:12: EVALUACIÓN ESTRUCTURAL PARA CA01E- SANTIAGO DE MARIA, 2015.....	165
TABLA 4.10:13: EVALUACIÓN ESTRUCTURAL PARA CA01E- SANTIAGO DE MARIA, 2007.....	166
TABLA 4.10:14: EVALUACIÓN ESTRUCTURAL PARA CA01E- SANTIAGO DE MARIA, 2007.....	167
TABLA 4.10:15: EVALUACIÓN ESTRUCTURAL PARA CA01E- SANTIAGO DE MARIA, 2002.....	168

TABLA 4.10:16: EVALUACIÓN ESTRUCTURAL PARA CA01E- SANTIAGO DE MARIA, 2002.....	169
TABLA 4.10:17: RESUMEN DE EVOLUCIÓN ESTRUCTURAL. ....	170
TABLA 4.10:18: RESUMEN DE EVOLUCIÓN ESTRUCTURAL. ....	171
TABLA 4.10:19: INFORMACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE CONFORMAN LOS DATOS DE ESTUDIO. ....	172
TABLA 4.10:20: INFORMACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE CONFORMAN LOS DATOS DE ESTUDIO. ....	173
TABLA 5.4:1: AGRUPACIÓN DE TRAMOS EN FAMILIAS SEGÚN CAPACIDAD ESTRUCTURAL, AÑO 2002.....	186
TABLA 5.4:2: CONTINUACIÓN AGRUPACIÓN DE TRAMOS EN FAMILIAS SEGÚN CAPACIDAD ESTRUCTURAL, AÑO 2002. ....	188
TABLA 5.4:3: AGRUPACIÓN DE TRAMOS EN FAMILIAS SEGÚN CAPACIDAD ESTRUCTURAL, AÑO 2007.....	189
TABLA 5.4:4: AGRUPACIÓN DE TRAMOS EN FAMILIAS SEGÚN CAPACIDAD ESTRUCTURAL, AÑO 2007.....	190
TABLA 5.4:5: AGRUPACIÓN DE TRAMOS EN FAMILIAS SEGÚN CAPACIDAD ESTRUCTURAL, AÑO 2015.....	191
TABLA 5.4:6: AGRUPACIÓN DE TRAMOS EN FAMILIAS SEGÚN CAPACIDAD ESTRUCTURAL, AÑO 2015.....	192
TABLA 5.5:1: FACTOR DE CALIBRACIÓN PARA DENSIFICACIÓN INICIAL O INICIO DE AHUELLAMIENTO.....	196
TABLA 5.5:2: FACTOR DE CALIBRACIÓN PARA DEFORMACIÓN ESTRUCTURAL O PROGRESIÓN DE AHUELLAMIENTO. ....	197
TABLA 5.5:3: FACTOR DE CALIBRACIÓN PARA DEFORMACIÓN PLÁSTICA O PROGRESIÓN DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA. ....	199
TABLA 5.5:4: FACTORES DE CALIBRACIÓN DEL MODELO DE DETERIORO AHUELLAMIENTO PARA CA01-E- SANTIAGO DE MARÍA, USULUTÁN, EL SALVADOR.....	205

TABLA 5.6:1: FACTOR DE CORRELACIÓN Y ERROR MEDIO ESTIMADO PARA EL RESPECTIVO MODELO DE DETERIORO. ....	210
--	-----

## INDICE DE GRÁFICAS.

GRÁFICA: 1: FACTOR DE CALIBRACIÓN PARA DENSIFICACIÓN INICIAL FAMILIA 01. ....	200
GRÁFICA: 2: FACTOR DE CALIBRACIÓN PARA DENSIFICACIÓN INICIAL FAMILIA 02. ....	201
GRÁFICA: 3: FACTOR DE CALIBRACIÓN DE DEFORMACIÓN ESTRUCTURAL FAMILIA 01. ....	202
GRÁFICA: 4: FACTOR DE CALIBRACIÓN DE DEFORMACIÓN ESTRUCTURAL FAMILIA 02. ....	203
GRÁFICA: 5: CALIBRACIÓN DEL MODELO DEFORMACIÓN ESTRUCTURAL HDM-4 PARA FAMILIA 01 .....	206
GRÁFICA: 6: CALIBRACIÓN DEL MODELO DEFORMACIÓN ESTRUCTURAL HDM-4 PARA FAMILIA 02 .....	207
GRÁFICA: 7: CALIBRACIÓN DEL MODELO DEFORMACIÓN PLÁSTICA HDM-4 PARA FAMILIA 01 .....	208
GRÁFICA: 8: CALIBRACIÓN DEL MODELO DEFORMACIÓN PLÁSTICA HDM-4 PARA FAMILIA 02 .....	209
GRÁFICA: 9: VERIFICACIÓN DE CALIDAD EN LA PREDICCIÓN DEL MODELO DEFORMACIÓN ESTRUCTURAL FAMILIA 01 .....	211
GRÁFICA: 10: VERIFICACIÓN DE CALIDAD EN LA PREDICCIÓN DEL MODELO DEFORMACIÓN ESTRUCTURAL - FAMILIA 02.....	212
GRÁFICA: 11: VERIFICACIÓN DE CALIDAD EN LA PREDICCIÓN DEL MODELO DEFORMACIÓN PLÁSTICA- FAMILIA 01.....	213
GRÁFICA: 12: VERIFICACIÓN DE CALIDAD EN LA PREDICCIÓN DEL MODELO DEFORMACIÓN PLÁSTICA- FAMILIA 02 .....	213

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la sociedad en términos económicos y sociales ha estado impulsado por las vías de acceso que se han constituido para su conexión. Es decir, los caminos, calles y carreteras.

Debido a la importancia que representa su uso, existen instituciones en nuestro país encargadas de proporcionar condiciones adecuadas para su viabilidad. Algunas de sus actividades consisten en evaluar y proponer alternativas para la construcción y mantenimiento de las carreteras, caminos, ya sea en las zonas rurales y/o urbanas. Estas instituciones realizan la gestión de pavimentos como un instrumento que contribuye a obtener los mejores resultados en términos económicos y técnicos.

El propósito de la gestión de pavimentos en un proyecto consiste en analizar mediante la información propia de las condiciones de la vía que con ayuda de procedimientos y herramientas que faciliten el análisis y decisión sobre la mejor alternativa a desarrollar. Que en definitiva contribuirá a minimizar los costos de mantenimiento- operación, así como de conservación.

Algunas de estas herramientas desarrolladas a nivel computacional por el Banco Mundial es el Programa HDM-4, cuyo marco analítico consiste en el análisis del ciclo de vida de la carretera expuesto a condiciones carga de tráfico, efectos medioambientales, sistemas de drenaje inadecuados, entre otros.

En este sentido, la calibración de modelos de deterioro para el caso en particular ahuellamiento para pavimentos flexibles del programa HDM-4 tiene como finalidad adecuar los modelos a condiciones locales.

En definitiva, HDM-4 nos permitirá desarrollar una visión más amplia de la Gestión de Carreteras considerando aspectos de Planificación, Programación, Preparación y Operaciones de las vías en análisis. Cuyo resultado se verá reflejado en los planes de diseño de mantenimiento más óptimos.



## **CAPITULO I: ANTEPROYECTO.**

---

## ANTECEDENTES

En la actualidad se han desarrollado sistemas computacionales para el apoyo a los profesionales que realizan gestión de pavimentos. Estos sistemas incorporan modelos de comportamiento que debe 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.

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

El modelo computacional HDM desarrollado por el Banco Mundial es una simulación del comportamiento del ciclo de vida de las carreteras considerando todas las relaciones entre sí, el ambiente y el tráfico dentro de la economía nacional o regional que determina la composición y la estructura de costos de las

variables suministradas por el investigador para cuantificar la condición actual de la vía.

El marco analítico del programa HDM-4 se basa en el ciclo de vida de la capa de rodadura (losas de concreto o carpetas asfálticas) que se aplica para predecir deterioros del pavimento, efectos de obras de reparación, efectos para los usuarios de la carretera, efectos socio económicos y ambientales.

Los daños que presenta una estructura de pavimento flexible se pueden categorizar de la siguiente manera:

- **Fisuras**

- Fisuras Longitudinales y transversales.
- Fisuras en Juntas de Construcción
- Fisuras por reflexión de Juntas (Capa de concreto asfáltico sobre placas de concreto rígido)
- Fisuras de Borde
- Fisuras en Bloque
- Piel de Cocodrilo
- Fisuras por deslizamiento de Capas
- Fisuración Incipiente.

- **Deformaciones**

- Ondulaciones
- Abultamiento
- Hundimiento



- Ahuellamiento
- **Perdida de capas estructurales.**
  - Descascaramiento
  - Parches
- **Daños Superficiales**
  - Desgaste superficial
  - Perdida de Agregado
  - Pulimiento del agregado
  - Exudación
  - Surcos
- **Otros daños**

Alguno de los deterioros mencionados con anterioridad obedece a diversos factores y su respectivo grado de severidad. Uno de los deterioros superficiales más importantes es el ahuellamiento que consiste en una depresión longitudinal de la superficie de la trayectoria de las llantas de los vehículos. En ocasiones acompañada de una elevación de las áreas adyacentes a la zona de depresión y fisuración. Lo que significa que este deterioro puede llevar a una falla estructural del pavimento y posibilitar el hidropilado por almacenamiento de agua. Es decir; los ahuellamientos poco severos se notan durante una lluvia donde estas hendiduras son ocupadas por el agua. En estados más avanzados de desarrollo estas fallas afectan la base, sub base y eventualmente la sub rasante, debido a la consolidación o al movimiento lateral de los materiales debido a las cargas de

tránsito. Las causas los ahuellamientos pueden ser: movimiento plástico de la mezcla en tiempo cálido, compactación inadecuada durante la construcción o abrasión por las ruedas. Un ahuellamiento significativo puede provocar mayores fallas estructurales e hidroplaneo que consiste en la situación en la que un vehículo atraviesa en la carretera a cierta velocidad una superficie cubierta de agua, llevándolo a una pérdida de tracción y control del mismo por parte del conductor.

En consecuencia, la tasa de deterioro, afecta directamente los estándares de conservación de la vía. Estos estándares se aplican para reparar defectos en la superficie de rodadura en función de los deterioros y conservar la integridad estructural del pavimento, permitiendo así que la carretera soporte el tráfico para el que ha sido diseñada.

Las condiciones generales del pavimento a largo plazo dependen de los estándares de conservación (cada estándar de conservación está compuesto por diferentes tasas de conservación, como puede ser: Riego de sello, sobre carpetas, estabilización de base entre otros) o mejora aplicados a la carretera, es por ello que la calibración de modelos conlleva a considerar estos aspectos.

En nuestro país actualmente se realizan modelos de calibración mediante el programa HDM-4 para predecir deterioros en la red vial, ya sea de las vías administradas por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) en relación a su inventario interno, o por el Fondo de Conservación Vial (FOVIAL).

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las instituciones encargadas de la gestión de pavimento, utilizan los sistemas de gestión para poder predecir la posible evolución o comportamiento del pavimento en un periodo determinado, estos sistemas incorporan lo que se conoce como modelos de comportamiento de pavimentos, que son expresiones matemáticas, en base a condiciones iniciales (puesta en servicio) del pavimento o también en una situación posterior de las condiciones iniciales, estas expresiones deben reflejar las condiciones locales de la región o país en las que se ha realizado la evaluación. Uno de los sistemas de gestión de pavimento que más se utiliza para obtener el comportamiento de carreteras en El Salvador es el programa HDM-4, creado por el Banco Mundial para hacer evaluaciones de las carreteras.

En nuestro país se utiliza este programa, pero los modelos de comportamiento que incorpora el programa deben de ser calibrados, para obtener resultados que se asemejen a los reales en otras palabras de la zona en donde se hace la evaluación. Los antecedentes encontrados en la actualidad muestran que existen calibraciones de modelos de comportamiento de baches y grietas para pavimento flexible en el país, pero existen otros deterioros que afectan los pavimentos como es el caso del ahuellamiento.

No se tiene en El Salvador un estudio de los modelos de comportamiento que hayan sido calibrados para ahuellamiento, dificultando la evaluación en un pavimento que presente este tipo de daño por no tener un modelo de

comportamiento de ahuellamiento adecuado para pavimentos en nuestro país, obteniendo resultados que no son confiables y con cierto grado de incerteza en las predicciones.

## OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GENERAL:

- Desarrollar una propuesta de Calibración de Modelos de Ahuellamiento en Pavimentos Flexibles mediante el programa HDM-4.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar los factores que intervienen en la calibración de un modelo de comportamiento para el deterioro Ahuellamiento en Pavimentos Flexibles en El Salvador.
- Determinar los elementos físicos del camino mediante un inventario vial que nos proporcione la información necesaria para llevar a cabo la propuesta de Calibración de Modelos de Ahuellamiento para Pavimentos Flexibles.
- Aplicar la metodología de tramos testigo para la propuesta de calibración del Modelo de deterioro Ahuellamiento en Pavimentos Flexibles con base Granular.
- Analizar los resultados obtenidos en la propuesta de calibración del comportamiento del deterioro Ahuellamiento.

## **ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **1.1.3 ALCANCES**

- La investigación va enfocada en desarrollar una propuesta de Calibración del Modelo de deterioro Ahuellamiento para Pavimentos Flexibles con Base Granular que nos permita obtener valores ajustados a las condiciones climáticas, tránsito en nuestro medio, entre otros aspectos. Para mejorar la optimización de recursos disponibles y minimizar los costos totales en la operación, mantenimiento del camino.
- Estos modelos se construirán con información proporcionada por la Dirección de Planificación de la Obra Pública (DPOP) del Ministerio de Obras Públicas (MOP), así como el Fondo de Inversión Vial (FOVIAL).

### **1.1.4 LIMITACIONES**

- Para la presente investigación los datos obtenidos para la elaboración de la propuesta de Calibración para el deterioro Ahuellamiento en Pavimentos Flexibles se verán limitados a base granular para un periodo sin intervención de la vía de al menos 5 años, y una carretera de al menos segundo nivel de servicio.
- ♦ Para desarrollar la propuesta de Calibración para el deterioro Ahuellamiento se realizará por medio de información del inventario vial proporcionados por el inventario vial del Ministerio de Obras Públicas (MOP), así como información proveniente del Fondo de Conservación Vial (FOVIAL).

## JUSTIFICACIONES.

Los pavimentos tienen una estructura que consiste en capas superpuestas sobre el terreno natural para transmitir de manera distribuida las cargas de los vehículos a la sub rasante, la estructura del pavimento debe ser la adecuada porque la transmisión de carga de la llanta no debe sobrepasar la capacidad portante de la sub rasante. Las capas que componen a un pavimento flexible son: la carpeta asfáltica, la capa base, capa sub-base y la sub rasante. La capa base puede ser granular o cementada. La carga de la llanta se distribuye de la zona de contacto a un área más amplia a medida que esta atraviesa las capas. La capa base juega un papel importante en la estructura del pavimento, por ser la capa que sostiene la carpeta de rodadura, la selección del material que constituya la capa estará relacionado con, aspectos económicos, de resistencia, entre otros. A lo largo del tiempo para pavimentos flexibles la capa base suele ser granular.

Las instituciones de gestión de pavimentos tienen sistemas de gestión que son de mucha utilidad para predecir el comportamiento del pavimento en un periodo determinado, tal es el caso del programa HDM-4 (Desarrollado por el Banco Mundial) que es el programa que actualmente se utiliza para hacer este tipo de evaluaciones, se basa en modelos de comportamiento hechos por especialistas en un área determinada con sus respectivos factores regionales. Estos modelos son: Inicio y Progresión de Grietas (Piel de Cocodrilo, Agrietamiento en Bloque y Grietas Transversales y Longitudinales), Inicio y Progresión de Baches (Perdida

de material en el pavimento producto del efecto combinado del clima y el tránsito, formando huecos en la calzada de la vía), Inicio y Progresión de Perdida de Agregados, Progresión de Ahuellamiento, Progresión de Rugosidad Superficial. Cabe mencionar que si estos modelos se utilizan en nuestro país (lugar donde no han sido elaborados los modelos de comportamiento), se deben de tomar en cuenta los aspectos locales, en otras palabras, se deben calibrar los modelos de comportamiento para realizar una evaluación satisfactoria.

En la actualidad se ha calibrado el modelo de comportamiento de grietas y baches para pavimento flexible en El Salvador (capa base granular). Pero no se han tomado en cuenta otro tipo de daño que sufre el pavimento. En nuestro país otro deterioro que es muy frecuente es el ahuellamiento, es por ello que se necesita una calibración del modelo de comportamiento de progresión de ahuellamiento para capa base granular.

Las instituciones de gestión de pavimento tendrán diversos modelos de comportamiento para los daños que comúnmente se presentan en pavimentos de nuestro país y poder evaluar de forma más completa la vía, obteniendo resultados confiables, porque las características que engloban los modelos de comportamiento que se tendrán, serán las mismas con las que cuente el pavimento real en evaluación, para dar predicciones de la vía certeras y precisas.





## **CAPITULO II: GENERALIDADES.**

---

## GENERALIDADES DE LOS PAVIMENTOS

### 2.1.1 ¿QUE ES UN PAVIMENTO?

El pavimento se puede definir como un conjunto de capas superpuestas de un cierto material, colocados sobre el terreno natural, con granulometría definida en función de la forma y tipo de carga a recibir sobre ella. Ya sea en forma directa; cargas de tránsito, o indirecta transmitida por los estratos sobre estas.

Constituida primordialmente para proporcionar comunicación terrestre, es diseñada para la finalidad de proporcionar una superficie óptima para el tránsito de vehículos. Tales como livianos, pesados. Inclusive otro tipo de transporte como bicicletas, motocicletas, etc. De tal manera que permita una movilidad libre, es decir, segura, Calidad de manejo aceptable, adecuada resistencia al deslizamiento, comodidad, apropiados niveles de reflejo de luz y un nivel bajo de ruido, además de poseer costos económicos de Construcción, Operación y mantenimiento factibles.

Las propiedad y características del pavimento como son su número de capas y espesor de estas serán diferentes en la medida de su solicitud y del tipo de pavimento propuesto, como son el pavimento rígido y flexible.

### 2.1.2 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.

Según metodología y especificaciones internacionales utilizada para definir las capas o estructuras que constituyen un pavimento como es el caso de las normativas AASHTOO 93 (American Association of State Highway and Transportation Officials) Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes) y ASSHTO 98.

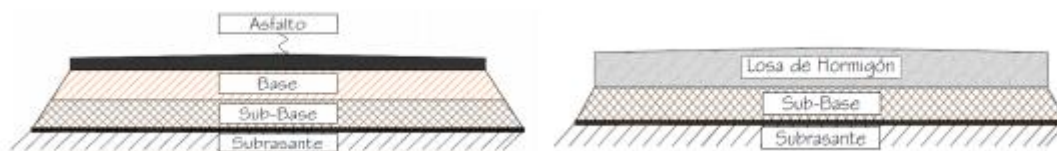


Figura: 0.1: Partes que constituyen una estructura típica de un pavimento flexible y rígido.

Un paquete estructural típico está constituido por los siguientes elementos:

#### 2.1.2.1 Sub-rasante

Es el suelo de cimentación del pavimento, pudiendo ser suelo natural, debidamente perfilado y compactado; o material de préstamo, cuando el suelo natural es deficiente o por requerimiento del diseño geométrico de la vía a proyectar.

Los materiales que pueden ser empleados como sub rasante serán de preferencia materiales de tipo granular.

Es la capa que está apoyada sobre la sub rasante, compuesta por materiales granulares de buena gradación. Deberá ser perfilada y compactada entre el 95% y 100% de su máxima densidad seca mediante el Ensayo Proctor Estándar<sup>1</sup>. El empleo de una subbase implica mejorar la capacidad de soporte de suelo que se traduce en una reducción del espesor de carpeta de rodadura. Sin embargo, el impacto no es significativo.

#### **2.1.2.2 Base**

La base constituye la capa intermedia entre la sub base y la carpeta de rodadura y utiliza materiales granulares de excelente gradación.

Esta capa sirve de base para esta configuración debe resistir la tendencia al agrietamiento por fatiga bajo las cargas de tránsito.

La capa base puede clasificarse en dos tipos:

**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.

---

<sup>1</sup> AASHTO T99-01, ASTM D 698

**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.

### 2.1.2.3 Carpeta de rodadura

Se le denomina así a la capa de agregados pétreos y asfalto que puede ser semi cerrada o cerrada<sup>2</sup> diseñada para resistir a los efectos ambientales y abrasión. Colocada sobre la capa base, cuyo objetivo principal es proteger el paquete estructural del pavimento, proporcionando impermeabilización superficial en este, cuya característica es evitar filtraciones de agua lluvia, ya que el efecto de esta sería saturar las capas inferiores. Además de prevenir y evitar la desintegración de las capas subyacentes a causa del tránsito de vehículos. Asimismo, la superficie de rodadura contribuye a aumentar la capacidad soporte del pavimento.

---

<sup>2</sup> Criterio de diseño en una mezcla asfáltica prevenir las deformaciones plásticas debido a las cargas de tránsito y las variaciones térmicas: Mezclas Semi-Cerradas o Semi-Densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %. Y Mezclas Cerradas o Densas: Con una proporción de vacíos no mayor al 6 %

#### 2.1.2.4 Sello

Utilizada como capa de protección ya que están su función principal es impedir el deterioramiento de la superficie de rodadura. Así como corregir fallas funcionales además de sellar juntas y grietas.

En Pavimentos Flexibles es un tratamiento superficial consistente en la aplicación de una capa delgada de asfalto para impermeabilizar y mejorar la textura de la carpeta asfáltica superficial.

Está constituida por una mezcla de ligante asfáltico cubierto por capa o capas de agregados colocados sobre la superficie de pavimento existente. El tamaño de los agregados a utilizar dependerá de la función u objetivo para el cual sea diseñado. Generalmente estas capas son delgadas.



Figura: 0.2: Capa de Sello en un Pavimento

Algunos tipos de sellos Asfálticos en Base Granular para Pavimentos Flexibles son los siguientes:

- CAPE SEAL
- LECHADA ASFALTICA
- IMPRIMACION REFORZADA
- SLURRY

### 2.1.3 TIPOS DE PAVIMENTO

Existen dos maneras de clasificar los pavimentos en la actualidad:

1. En relación a su disposición de las cargas transmitidas.
2. En relación al tipo de material del que está compuesta su capa de rodadura.

Según la disposición para transmitir las cargas aplicadas:

#### ➤ PAVIMENTOS RIGIDOS



Figura: 0.3: Boulevard Monseñor Romero, Pavimento Rígido.

➤ **PAVIMENTOS FLEXIBLES**

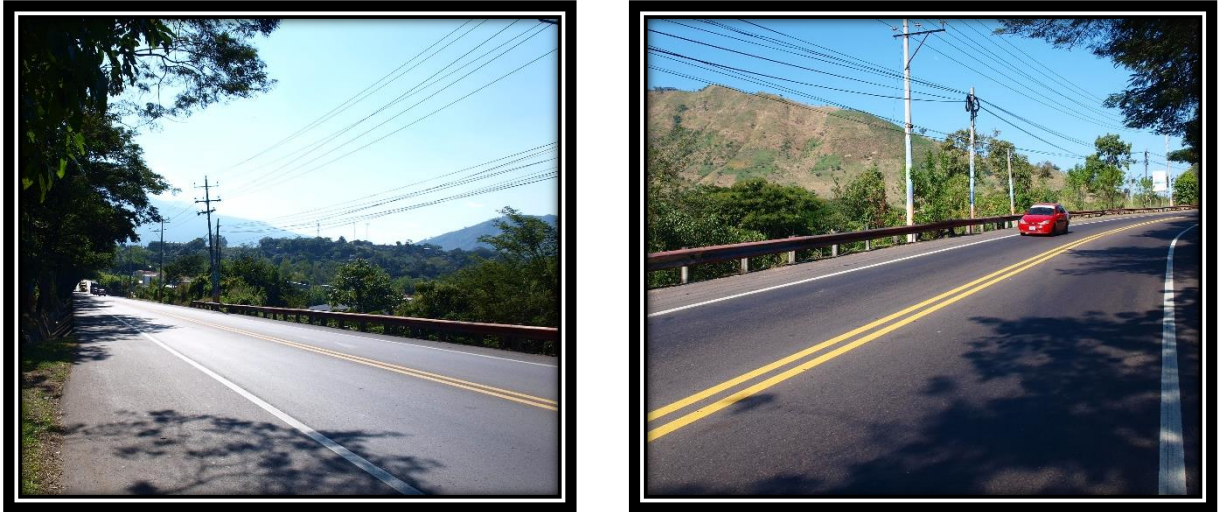


Figura: 0.4: Carretera Troncal del Norte, Pavimentos Flexible

Los pavimentos pueden clasificarse de la siguiente manera de acuerdo al tipo de material que compone su capa de rodadura:

- **PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRAULICO.**
- **PAVIMENTOS DE CONCRETO ASFALTICO**
- **PAVIMENTOS DE ADOQUINES.**
- **PAVIMENTOS DE PIEDRA**
- **PAVIMENTOS DE TIERRA.**

**2.1.3.1 PAVIMENTO RÍGIDO.**

Está constituido por una losa de concreto hidráulico de cemento tipo Portland en que puede tener o no una capa sub base entre la losa y la sub rasante. Su resistencia estructural dependerá principalmente de la losa de concreto. Generalmente está sostenido sobre una capa de material.





Figura: 0.5: Sección Transversal: Pavimento Rígido.

Algunas características en cuanto a su estructura podemos tener una capa de rodadura de Cemento Portland (PCC) normalmente convencional o reforzado con acero, una base o sub base tal como sea su diseño estabilizada con cemento o no estabilizada, una subrasante compactada y natural. Su capa de rodadura está compuesta por un conjunto de losas que trabajan de manera integral en la distribución de cargas transmitidas por los vehículos hacia las capas inferiores. Dando como resultado tensiones muy bajas en la subrasante.

Esta clase de pavimento resulta económicamente bajo en cuanto a su mantenimiento. Además, al ser muy resistente puede ser utilizado durante mucho tiempo. En algunos casos puede poseer acero de refuerzo. En general estos tienen un costo inicial más elevado comparado con los pavimentos flexibles. Sin embargo, su período de vida oscila entre 20 a 40 años.

Tipos de pavimentos rígidos:

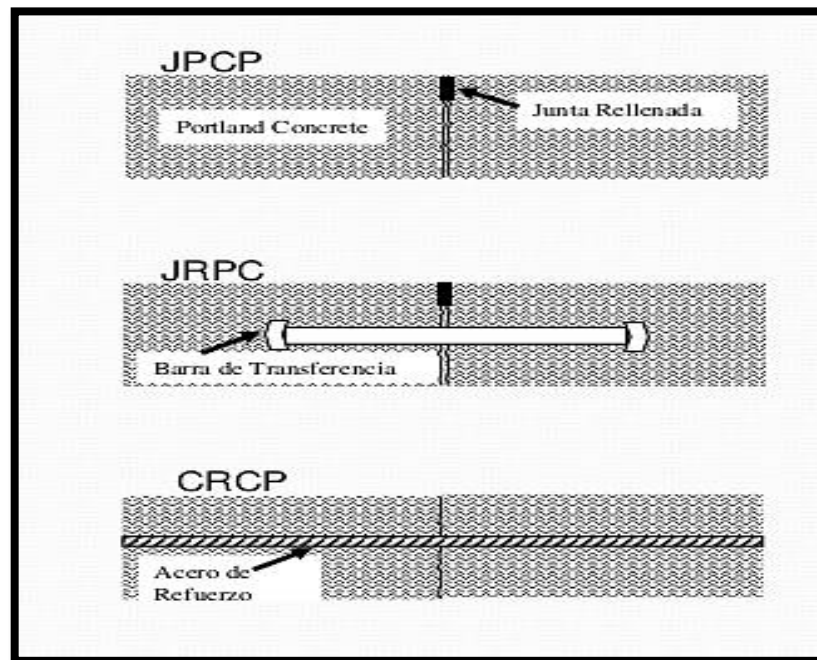


Figura: 0.6: Tipos de Pavimentos Rígidos.

- **Pavimentos de Concreto Simple (JPCP:Joint Concrete Pavement).**  
Este tipo de pavimento requiere la ubicación de juntas de contracción transversal, espaciadas entre 3.0 a 6.0 metros. La transferencia de cargas entre secciones se puede dar debido a la trabazón de los agregados o mediante el empleo de pasadores.
  - **Con juntas de contracción espaciadas de manera continua, sin dovelas o refuerzo para transferencia de cargas.**

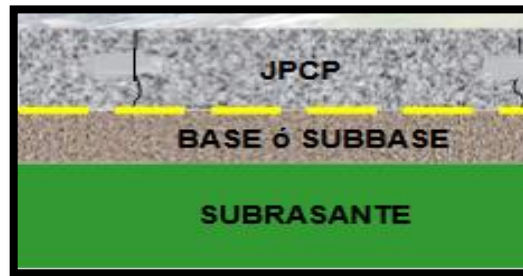


Figura: 0.7: Pavimento de Concreto Simple sin Dovela (JPCP).

- **Con barras de refuerzo para transferencia de cargas o dovelas de una capa a otra, espaciadas de 3 a 6 metros.**

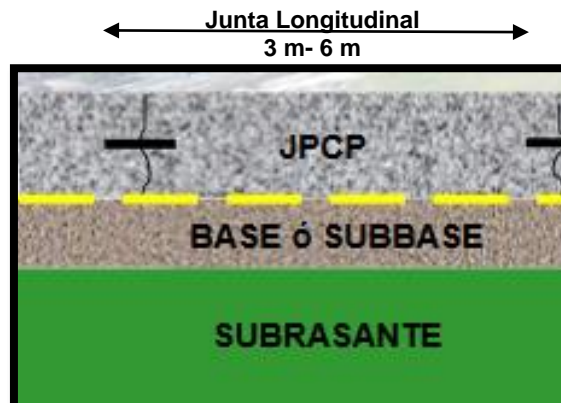


Figura: 0.8: Pavimento de Concreto Simple con Dovela (JPCP)

- **Pavimento de Concreto Simple y Reforzado (JRCP: Jointed Reinforced Concrete Pavement).**

La capa de rodadura es de concreto reforzado con malla de acero. Esta permite aumentar la distancia entre espaciamientos de las juntas transversales de contracción con distancias que oscilan entre 10 a 20 m.

Es así que la transferencia de cargas entre secciones adyacentes se realiza mediante el empleo de pasadores.

- **Con barras de refuerzo para transferencia de cargas o dovelas, sin función estructural, es decir, sin incrementar su capacidad estructural espaciada entre 10 m a 20 m.**

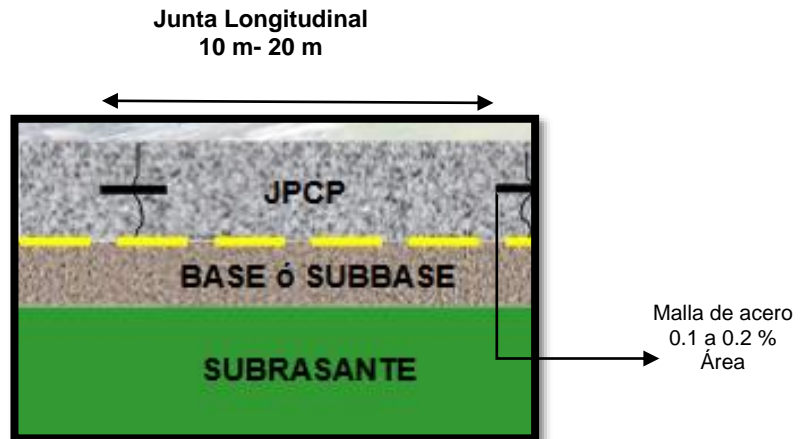


Figura: 0.9: Pavimento de Concreto Con Refuerzo discontinuo (JRCP)

- **Pavimento**

**Continuamente Reforzado (CRCP: Continuously Reinforced Concrete Pavement).**

Las tensiones son controladas por una armadura de acero en mayor proporción que el tipo anterior. Se desea la aparición de fisuras controladas a lo largo de todo el pavimento, con distancias que oscilas entre 0.5 m y 2 m. Sin embargo, el refuerzo continuo no posee una función de incremento de soporte estructural.

- **Mecanismo utilizado para eliminar las juntas de contracción.**

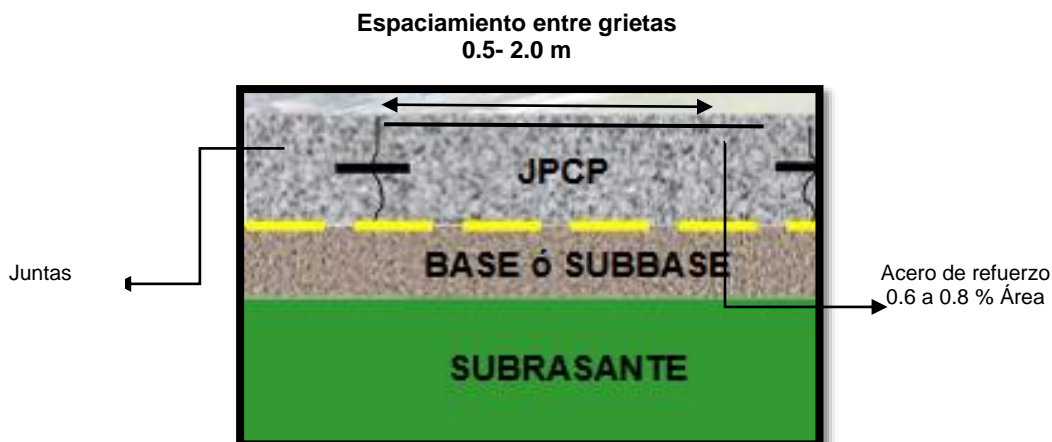


Figura: 0.10: Pavimento de Concreto con Refuerzo Continuo (CRCP).

### 2.1.3.2 PAVIMENTO FLEXIBLE.

Se le llama pavimento flexible aquella estructura de una vía que se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. Están conformados por las siguientes capas: capa superficial, capa de rodadura o capa superior que es la que se encuentran en contacto con el tráfico, cuya función principal es soportar las cargas de tránsito y transmitir los esfuerzos al terreno. Normalmente ha sido elaborada con varias capas asfálticas de alta calidad con espesor relativamente delgado, es decir, material pétreo cementado con asfalto, comparada con las demás capas que conforman la estructura del pavimento. La capa base es la capa subyacente capa de rodadura construida a base de agregados granular y puede estar estabilizada o sin estabilizar. La capa sub – base es la capa o capas que se encuentra inmediatamente debajo de la capa base.



Figura: 0.11: Sección Transversal de un Pavimento Flexible.

Es así que la capa de más abajo en la estructura del pavimento, recibe menos carga. Con el fin de aprovechar al máximo esta propiedad, las capas son generalmente dispuestas en orden descendente de capacidad de carga. En términos económicos la capa con más alto costo tanto en construcción, como en mantenimiento es la capa superior o capa de rodadura, siendo la más económica la que recibe menor capacidad de carga; es decir la capa inferior, sub base.

La durabilidad de un pavimento flexible no debe ser inferior a 8 años y normalmente suele tener una vida útil de 20 años.

Algunas características principales que posee los pavimentos flexibles:

- **Resistencia estructural.**

Capacidad de soportar cargas impuestas por el tránsito.

- **Durabilidad.**

Vinculados factores económicos y sociales. La durabilidad que se le desee dar al camino, depende de la importancia de este.

- **Comodidad**
- **Composición de los pavimentos flexible.**
- **Requerimientos de conservación.**
- **Deformabilidad.**
- **Costo.**

Diseñado para tipos de tráfico tales como: Autopistas, carreteras, aeropuertos, estacionamientos, entre otros. Con intensidades de tráfico liviano, medio y pesado.

Con espesores para la capa de rodadura que puede ser un tratamiento superficial de tráfico liviano de menos de 2.5 cm hasta 15 cm o más para concretos asfálticos para vías de tráfico pesado.

Existen cuatro tipos de capas de rodadura o capa superficial, a continuación, se presentan:

En función de la temperatura de colocación:

**a. Mezcla asfáltica en frío.**

Estas mezclas se usan generalmente como capas de rodadura, base o sub base. Son mezclas elaboradas cuidadosamente y compactadas hasta lograr un alto grado de densificación y una relación de vacíos baja. Constituidas por la combinación de uno o más agregados pétreo, relleno mineral o también llamado

Fíller <sup>3</sup>, en ocasiones mezclado con emulsiones asfálticas. Cuya aplicación y compactación se realiza en frío.

Se caracterizan por su trabajabilidad tras la fabricación incluso durante semanas, la cual se debe a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja debido a que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado: el aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios, haciendo viable el almacenamiento, pero después de la puesta en obra en una capa de espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas debido a la evaporación del fluidificante.

Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica en frío se clasifican en:

- Mezclas cerradas o densas con porcentajes de vacíos oscilando entre 3-6 %
- Mezclas semi cerradas también conocidas como semi densas con una relación de vacíos de 6 a 12%.
- Mezclas Abiertas con una relación de vacíos superior al 12%

#### **b. Mezcla asfáltica en caliente.**

Este tipo de mezcla asfáltica esta constituida por agregados pétreos, Fíller si fuese necesario, ligante asfáltico mezclado en caliente en una planta de mezcla, en ocasiones se utiliza aditivos. Colocados sobre una base debidamente preparada o un pavimento existente. Pueden ser producidas en un amplio rango

---

<sup>3</sup> Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, es el material o agregado pétreo que pasa el tamiz #200



de combinaciones de agregados, cada uno de ellos con características especiales definidas según criterios de diseño.

Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los firmes. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas con diferentes características. Se fabrican con asfaltos, aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6% de asfalto en volumen de agregados pétreos.

### **c. Riegos asfálticos**

Los riegos asfálticos son aplicaciones delgadas y uniforme de algún tipo de ligante asfáltico en estado líquido sobre superficies de pavimentos existentes, bases estabilizadas, entre otras aplicaciones. No requieren el uso de agregados.

Los asfaltos utilizados son de baja viscosidad en ocasiones emulsificados,

Algunos tipos tenemos.

- Imprimación.
- Riego de liga.
- Riego de Niebla.
- Sellos Bituminosos
- Lechadas Asfálticas.

#### **d. Tratamientos superficiales simples y múltiples.**

Es la aplicación de uno o más riegos alternados de asfalto y de agregados generalmente sobre una capa base. Otorga una cubierta impermeable a la superficie existente. Mejorar la textura superficial. Además de proveer una adecuada resistencia a la acción abrasiva al tránsito. Dependiendo del número de riegos los tratamientos superficiales se clasifican en:

- **Simples:** Cuando se trata de una única aplicación de asfalto seguida de un riego de agregado. Su espesor es aproximadamente de 10 a 12.5 mm. Utilizado para restaurar la superficie de un pavimento antiguo deteriorado.
- **Múltiples:** Si son dos ó más los riegos alternados de asfalto y agregado Su espesor es aproximadamente de 20 a 25 mm. Comúnmente utilizado para la construcción de calzadas en caminos con transito medio a liviano. Como alternativa de mejoramiento.

En tratamientos superficiales triples puede alcanzar espesores de 25 mm.

#### **e. Macadam Asfáltico.**

Macadam asfáltico o también llamado de penetraciones una carpa asfáltica constituida por sucesivas capas, constituida por una progresión de agregados de granulometría en forma ascendente, es decir, la mayor granulometría abajo, y arriba la de menor granulometría. Luego se procede a la compactación con rodos y camiones.

## EFFECTO DE LAS CARGAS EN LOS PAVIMENTOS.

Los pavimentos están constituidos por materiales de diferentes tipos, estos se ven sometidos a cargas dinámicas-cíclicas con magnitudes diversas, transmitidas a través del tránsito vehicular.

De acuerdo a algunos actores en el tema, las acciones del tránsito sobre los pavimentos pueden obedecer a cuatro elementos, presentados a continuación:

✓ **Efecto de la configuración de los ejes sobre el pavimento:**

En este elemento se consideran los tipos de ejes vehiculares.

“**Eje Simple:** es el que está compuesto por dos ruedas, una en cada extremo del eje.

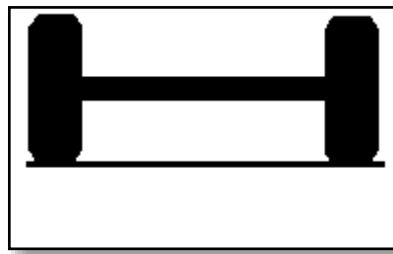


Figura: 0.1: Eje simple.

**Eje simple de rueda doble:** es el que está compuesto de cuatro ruedas de igual medida de fabricación, dos ruedas en cada extremo del eje o una rueda de doble ancho en cada extremo del eje.

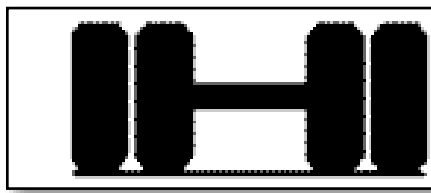


Figura: 0.2: Eje Simple de Doble Rueda

**Eje Doble (tándem):** conjunto de dos ejes simples de ruedas dobles, con una separación de centros comprendida entre 1 y 2.45 metros.

Eje simple de rueda doble: es el que está compuesto de cuatro ruedas de igual medida de fabricación, dos ruedas en cada extremo del eje o una rueda de doble ancho en cada extremo del eje.

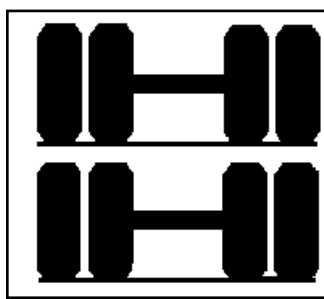


Figura: 0.3: Eje Tándem.

**Eje Triple (Tridem):** es el conjunto de tres ejes simples de rueda doble con una separación de sus centros comprendida entre 1 y 2.45 metros<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Fuente: Ley Especial de transporte de carga por carretera de El Salvador, Asamblea Legislativa, Marzo 2003.

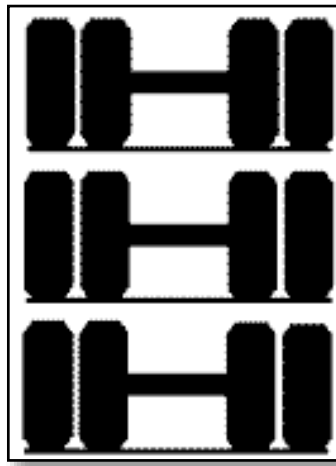


Figura: 0.4: Eje Tridem.

- ✓ **El número de aplicaciones de ejes durante la vida útil definida en la etapa de diseño.**

Para realizar una simulación de daños que cada eje individual futuro causaría sobre un pavimento es necesario proyecciones de tránsito confiables a partir de series históricas y patrones temporales de distribución horaria, diaria, semanal, anual y multianual (TPDA; Transito Promedio Diario Anual), además la simulación del daño de cada eje debe considerar la aleatoriedad del tipo y peso de cada eje y la presión de inflado de sus neumáticos. Así como aplicar factores de conversión para simplificar el tránsito heterogéneo a ejes equivalentes homogéneos de acuerdo con un criterio específico de daño. Como referencia propuesta por la AASHTO es un eje simple de 80 kN.

Los factores de conversión a un eje estándar son función del tipo, estructura y estado del pavimento, así como de la carga y tipo de eje a transformar.

- ✓ **Efecto del área de contacto de las llantas sobre el pavimento.**

Los métodos de análisis simulan una distribución de cargas de tránsito uniforme, aplicada sobre la superficie del pavimento. Considerando el modelo de presión uniforme debido a que se desprecia la rigidez de las llantas. Despreciando además cualquier presión que se pueda originar debido al contacto del neumático inflado y el pavimento.

✓ **Velocidad de los vehículos.**

Se considera importante cuando se toman en cuenta propiedades visco – elásticas en el método que se haya seleccionado para realizar el análisis.

Es decir; la elasticidad es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación, en cambio la viscosidad es la relación existente entre el esfuerzo y la velocidad de deformación.

Por tanto, el tiempo de duración de la carga sobre un punto del pavimento está relacionado con la velocidad del vehículo. Ya que finalmente a mayor velocidad (menor tiempo de carga) los materiales visco - elástico desarrollaran mayor rigidez y presentaran menores deformaciones. Por consecuencia; menor rigidez y máximas deformaciones se presentan con bajas cargas estáticas.

## DISTRIBUCCION DE PRESIONES SOBRE UN PAVIMENTO.

En relación a los análisis elásticos lineales del pavimento, la velocidad del tránsito debe considerarse para seleccionar un módulo de Young<sup>5</sup> que se considere representativo.

La distribución de presiones de carga de rueda sobre la estructura de un pavimento en general es de la siguiente manera:

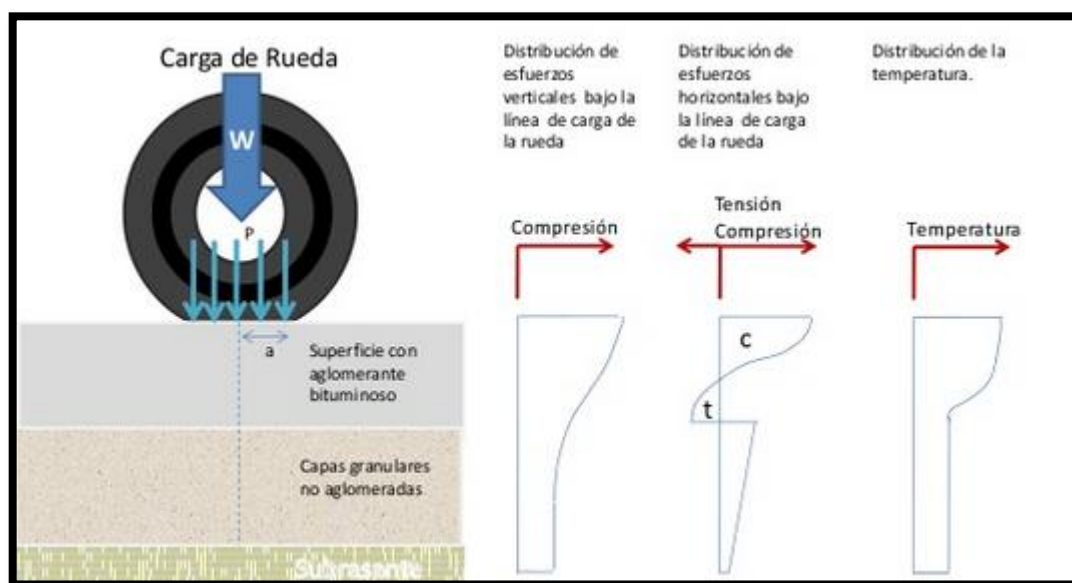


Figura: 0.1: Modelo de Boussinesq para la distribución de cargas a la estructura de un pavimento flexible.

La estructura del pavimento al ser sometida a una determinada sollicitación de cargas en su superficie, generalmente, produce un estado de tensiones y deformaciones. Las deformaciones producen desplazamientos en sentido

<sup>5</sup> Es un parámetro utilizado para indicar la rigidez y capacidad de una losa de pavimento tiene para distribuir las cargas sobre este.

vertical en magnitudes muy pequeñas del orden de las centésimas o milésima de milímetros, denominadas deflexiones.

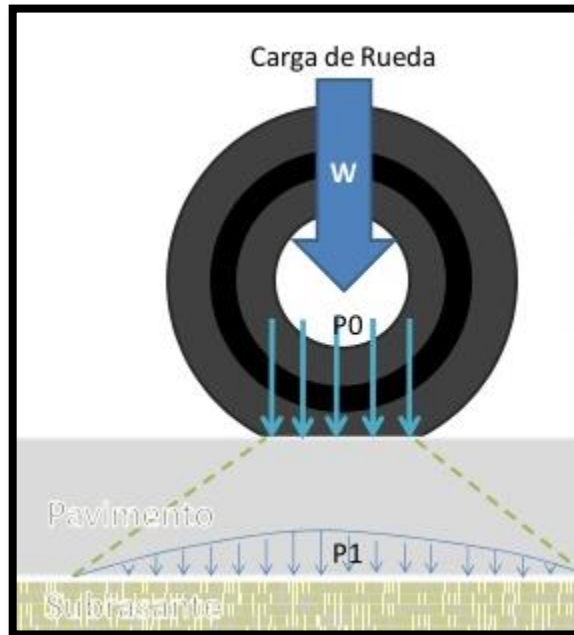


Figura: 0.2: Distribución de presiones en un pavimento.

En un pavimento rígido y flexible la distribución de presiones es de la siguiente manera:

➤ **Para un pavimento rígido:**

En un pavimento rígido, debido a la consistencia de la superficie de rodadura, se produce una buena distribución de las cargas, dando como resultado tensiones muy bajas en la subrasante.

También se conoce como coeficiente de transmisión de carga (J) y es la capacidad que tiene una losa del pavimento de transmitir las fuerzas cortantes con sus losas adyacentes, con el objetivo de minimizar las deformaciones y los



esfuerzos en la estructura del pavimento. Mientras mejor sea la transferencia de cargas, mejor será el comportamiento de las losas del pavimento.

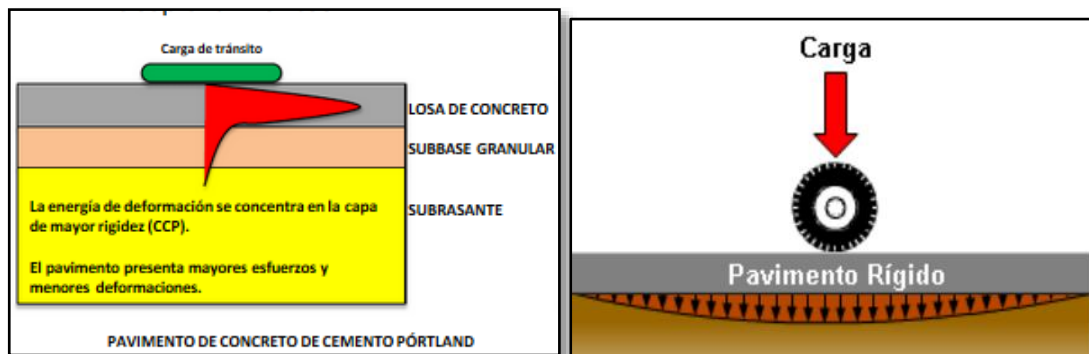


Figura: 0.3: Distribución de Esfuerzos en un Pavimento Rígido.

➤ **Para un Pavimento Flexible:**

En un pavimento flexible, la superficie de rodadura posee menor rigidez, se deforma más, produciendo mayores tensiones en la subrasante. Cabe mencionar que las ventajas que posee el asfalto en bases tratadas con asfalto sobre las bases no tratadas, radican en la resistencia a tensión es mayor, por consiguiente, existe una mejor distribución de esfuerzos.



Figura: 0.4: Distribución de Esfuerzos en un Pavimento Flexible.

## COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS.

Los pavimentos durante su vida útil generalmente presentan ciclo, estos se han considerado como normales debido a la frecuencia con que se presenta.

Los deterioros son indicadores que presentan cada una de las etapas que componen este ciclo.

### 2.1.4 CONCEPTOS FUNDAMENTALES.

#### 2.1.4.1 DETERIORO DE PAVIMENTOS:

Son un conjunto de fallas que ocurren producto de diferentes factores como la excesiva sollicitación de carga, el clima o el propio desarrollo de su vida útil. Que afectan la superficie de la estructura del pavimento, es decir la capa de rodadura.

Los deterioros de un pavimento son indicadores del comportamiento de este, a lo largo de su vida útil. Ya que está expuesto a ciclos de carga y descarga impuesta por el tránsito vehicular. Cada uno de estos ciclos nos indica la tendencia de desarrollo de la estructura durante ese tiempo.

Dependerá del tipo de pavimento el tipo de deterioro a presentar, por tanto, la evolución de la estructura en el tiempo se puede describir a continuación:

#### **2.1.5 ETAPA DE CONSTRUCCION.**

Esta etapa es de suma importancia ya que podría presentarse algunos inconvenientes en la ejecución. Sin embargo, habiéndose dado una buena construcción o en la etapa de diseño haber sufrido deficiencias. En el momento de la puesta en servicio de la estructura puede presentar excelentes condiciones que cumplen las necesidades del usuario.

#### **2.1.6 ETAPA DE DETERIORO LENTO Y POCO VISIBLE.**

El pavimento experimenta un proceso de deterioro o desgaste que lo lleva a su debilitamiento lento, esto ocurre con principal énfasis en la capa de rodadura y en menor medida en el resto de capas de conforman la estructura del pavimento. Los diferentes tipos de vehículos que circulan sobre el pavimento, producen desgaste, el clima; es decir los cambios temperatura y el agua lluvia, entre otros factores. De la calidad del diseño y construcción inicial dependerá el índice de evolución de los deterioros.

Las condiciones del pavimento durante esta etapa presentan una apariencia de buen estado, permitiendo que el usuario transite con comodidad, sin percibir el desgaste. A un se encuentra en condiciones óptimas para su conservación.

#### **2.1.7 ETAPA DE DETERIORO ACELERADO Y DE QUIEBRE.**

Transcurridos varios años de su puesta en 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.

Es así, que la superficie del pavimento podemos observar y asegurar fallas graves a simple vista. La estructura está básicamente 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.

Durante el desarrollo 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.

#### **2.1.8 ETAPA DE DESCOMPOSICION TOTAL.**

Constituye la última etapa de la existencia de un pavimento, y puede durar varios años, lo primero que se observa es la pérdida de la capa de rodadura, ya que cada vez que pasa un vehículo pesado se desprenden trozos de ésta, por lo que

al final la vía termina siendo un camino de grava, y a la larga, de tierra. El paso de vehículos se dificulta, la velocidad promedio de circulación baja bruscamente y la capacidad del camino queda reducida en un gran porcentaje.

Los vehículos comienzan a presentar daños en neumáticos, ejes, amortiguadores y en el chasis; los costos de operación vehicular suben de manera considerable y se incrementa la cantidad de accidentes graves. En esta última etapa llega un momento en que ya no pueden transitar los automóviles normales, sólo algunos camiones y vehículos todo terreno.

Como ya se dijo anteriormente, los detalles del ciclo de vida de los pavimentos varían dependiendo de su tipo, pero en general, el mensaje que debe atenderse es el mismo y consiste en que las acciones de conservación de cualquier pavimento deben planificarse debidamente de modo que nunca se permita el deterioro excesivo o la destrucción de su estructura básica.

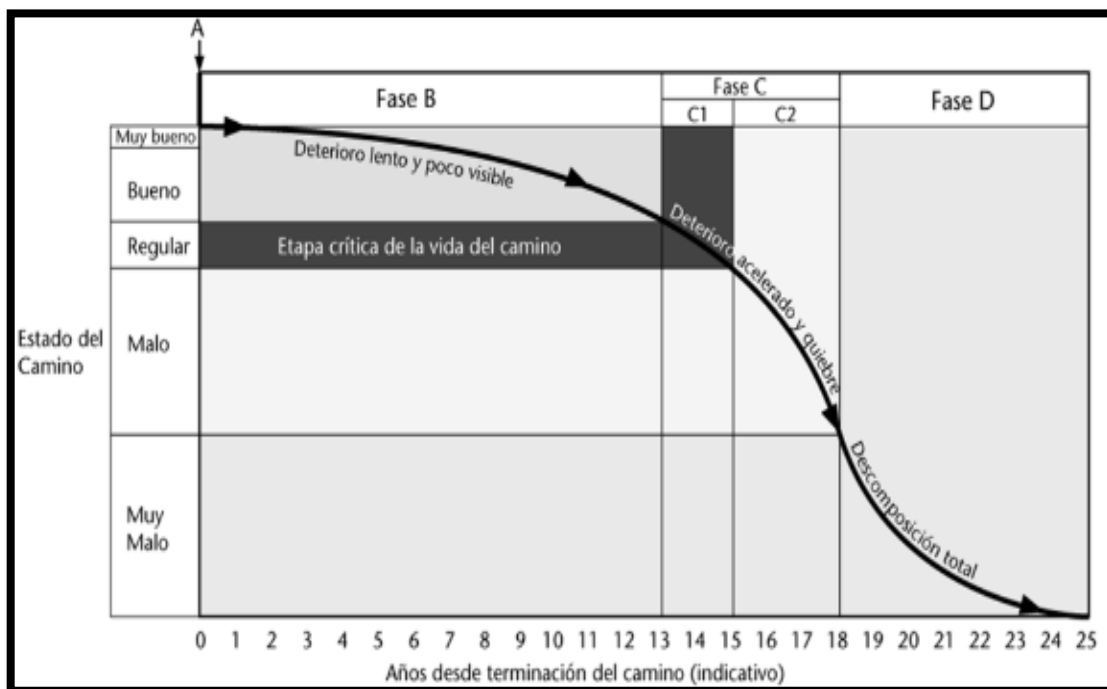


Figura: 0.1: Deterioro del pavimento a través del tiempo.

Fuente: Caminos-CEPAL1992.

## TIPOS DE DAÑOS EN LOS PAVIMENTOS.

Las causas y modos de fallas en los diferentes pavimentos son muy variados, comúnmente dependen de la estructura del pavimento, los materiales utilizados para su construcción, condiciones climáticas entre otros factores.

El ahuellamiento que es un tipo de deterioro superficial en pavimentos flexibles también forma parte de los deterioros presenta el Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Tomo III en su sección b) Catalogo

Centroamericano de Daños a Pavimentos Viales<sup>6</sup> que unifica la clasificación de los daños en los pavimentos, utilizando una terminología común.

Es frecuente que el mismo deterioro sea conocido con nombres diferentes a nivel regional, por lo que es necesario estandarizarlos a fin de ser identificados correctamente, presentando las fallas más comunes en la región.

Sin embargo, a continuación, presentaremos los daños a pavimentos asfálticos, deformaciones superficiales, desintegración entre otros deterioros presentes en los pavimentos flexibles:

#### **2.1.9 DAÑOS: FISURAS Y GRIETAS.**

##### **2.1.9.1 FISURA PIEL DE COCODRILO.**

###### **DESCRIPCIÓN:**

Serie de fisuras interconectadas formando pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos, generalmente con un diámetro promedio menor a 30 cm. El fisuramiento empieza en la parte inferior de las capas asfálticas. Las fisuras se propagan a la superficie, inicialmente, como una serie de fisuras longitudinales paralelas; luego por efecto de la repetición de, evolucionan interconectándose y formando una malla cerrada, que asemeja el cuero de un cocodrilo. Ocurren necesariamente en áreas sometidas al tránsito, como las huellas de canalización del tránsito.

---

<sup>6</sup> Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000.

Si la base y la sub-base son débiles, el fisuramiento será acompañado por **ahuellamientos**. Cuando el drenaje es inadecuado, el fisuramiento se presentará en primera estancia, en las huellas de canalización exteriores. En su etapa final, el agrietamiento se transforma en bache. La misma sección del pavimento presentara fisuras y grietas de cocodrilo, **ahuellamiento** y baches.



Figura: 0.1: Piel de Cocodrilo.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

### 2.1.9.2 FISURA EN BLOQUE

#### DESCRIPCIÓN:

Serie de fisuras interconectadas formando piezas aproximadamente rectangulares, de diámetro promedio mayor de 30 cm, con un área variable de 0.10 a 9.0 m<sup>2</sup>. La fisura en bloque se presenta normalmente en una gran área del pavimento y algunas veces ocurren solamente en las áreas no afectadas por el tráfico.





Figura: 0.2: Fisura en Bloque.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

### **POSIBLES CAUSAS:**

Son causadas principalmente por la contracción de las mezclas asfálticas debido a las variaciones diarias de temperatura. También suelen ocurrir en pavimentos bituminosos colocados sobre bases granulares estabilizadas o mejoradas con cemento portland, que se producen a raíz de la contracción eventual de la capa estabilizada, que se reflejan en la superficie del pavimento. A menudo es difícil constatar si las fisuras y grietas son debido a contracciones producidas en la capa de rodadura o en la base y sub-base. La ausencia de tráfico tiende a acelerar la formación de estas grietas de contracción. También se debe a cambios de volumen del agregado fino de las mezclas asfálticas con un ligante de penetración baja. Por lo general, el origen de estas fisuras no está asociado a las cargas de tráfico; sin embargo, dichas cargas incrementan la severidad de las

fisuras. La presencia de fisuras en bloques generalmente es indicativa de que el asfalto se ha endurecido significativamente.

### **2.1.9.3 FISURA EN ARCO.**

#### **DESCRIPCIÓN:**

Son fisuras en forma de media luna (o más precisamente de cuarto creciente) que apuntan en la dirección de las fuerzas de tracción de las ruedas sobre el pavimento. Las fisuras en arco no necesariamente apuntan en el sentido del tránsito. Por ejemplo, si se frena el vehículo cuesta abajo, la dirección de las fisuras está cuesta arriba.



Figura: 0.3: Fisura en Arco.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

#### **POSIBLES CAUSAS:**

Se producen cuando los efectos de frenado o giro de las ruedas de los vehículos provocan un resbalamiento y deformación de la superficie de pavimento. Esto ocurre generalmente cuando se combinan una mezcla asfáltica de baja

estabilidad y una deficiente adherencia entre la superficie y la siguiente capa de la estructura del pavimento. La falta de riego de liga, un exceso de ligante o la presencia de polvo durante la ejecución de los riegos, son factores que con frecuencia conducen a tales fallas. Asimismo, espesores de carpeta muy reducidos sobre superficies pulidas, especialmente sobre pavimentos de concreto, suelen ser causas primarias en muchos casos. La causa también puede ser un contenido alto de arena en la mezcla, sea arena de río o finos triturados.

#### **2.1.9.4 FISURA TRANSVERSAL.**

##### **DESCRIPCIÓN:**

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



Figura: 0.4: Fisura Transversal.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

### **POSIBLES CAUSAS:**

Las posibles causas incluyen

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

### 2.1.9.5 FISURA LONGITUDINAL.

#### DESCRIPCIÓN:

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



Figura: 0.5: Fisura Longitudinal.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

#### POSIBLES CAUSAS:

Las posibles causas incluyen

- i. Instancias iniciales del fenómeno de fatiga por debilidad estructural, ocurren en las huellas de canalización del tránsito.

- ii. Defectuosa ejecución de las juntas longitudinales de construcción, al distribuir las mezclas asfálticas durante la construcción; ocurren en el eje y coincidencia con los carriles de distribución y ensanches.
- iii. Contracción de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad, particularmente ante gradientes térmicos importantes.
- iv. Reflexión de fisuras causadas por grietas existentes por debajo de la superficie de rodamiento; incluyendo fisuras en pavimentos conformadas por capas estabilizadas químicamente o de concreto, usualmente se presentan combinadas con fisuras transversales.
- v. Deficiente confinamiento lateral, por falta de hombros y cordones o bordillos, que provocan un debilitamiento del pavimento en correspondencia con el borde. Estas, asociadas a las cargas del tránsito, ocurren a una distancia de 0.30 a 0.60 m del borde.

#### **2.1.9.6 FISURA POR DEFLEXION DE JUNTA**

##### **DESCRIPCIÓN:**

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



Figura: 0.6: Fisuras por deflexión de Juntas.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

### **POSIBLES CAUSAS:**

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

### **2.1.10 DEFORMACIONES SUPERFICIALES.**

#### **2.1.10.1 AHUELLAMIENTO**

Este fenómeno puede definirse como la deformación vertical permanente que se va acumulando en el pavimento debido al paso repetitivo de los vehículos, el cual genera la formación de delgadas, depresiones longitudinales a lo largo de la trayectoria de las

llantas. Puede generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento y ocurre en cualquier capa de la estructura; sin embargo, la mayor parte del ahuellamiento se genera en la capa asfáltica.

### **DESCRIPCIÓN:**

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



Figura: 0.7: Ahuellamientos.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

### **POSIBLES CAUSAS:**

Las repeticiones de las cargas de tránsito conducen a deformaciones permanentes en cualquiera de las capas del pavimento o en la subrasante. Cuando el radio de influencia de la zona ahuellada es pequeño, las deformaciones ocurren en las capas superiores del pavimento; cuando el radio de influencia es amplio, las deformaciones ocurren en la subrasante. Las deformaciones resultan de una compactación o movimiento lateral de los



materiales (fluencia plástica o punzonamiento por corte), ambos por efecto de tránsito. El ahuellamiento indica una insuficiencia estructural del pavimento o una deficiente estabilidad del sistema subrasante-pavimento.

En algunos casos se hace más evidente cuando la mezcla asfáltica se desplaza formando un cordón a cada lado del área deprimida.

Las causas posibles incluyen:

- i. Las capas estructurales pobremente compactadas.
- ii. Inestabilidad en bases y sub-bases granulares, creada por la presión del agua o saturación de la misma.
- iii. Mezcla asfáltica inestable
- iv. Falta de apoyo lateral por erosión del hombro.
- v. Capacidad estructural del pavimento con espesores deficientes de las capas que lo integran.
- vi. Técnica de construcción pobre y un bajo control de calidad.
- vii. Utilización de materiales no apropiados o de mala calidad.
- viii. La acción del tránsito (sobrecargas y altos volúmenes de tránsito no previstos en el diseño original).
- ix. El acompañamiento por levantamiento adyacente a los ahuellamientos, que indica que hay fallas en las capas superiores del pavimento.
- x. Estacionamiento prolongado de vehículos pesados.
- xi. Exceso de ligantes de riegos.

La severidad del ahuellamiento se determina en función de la profundidad de la huella, midiendo ésta con una regla de 1.20 m de longitud colocada transversalmente al eje de la carretera; la medición se efectúa donde la profundidad es mayor, promediando los resultados obtenidos a intervalos de 3 m a lo largo de la huella.

### **2.1.10.2 CORRIMIENTO**

#### **DESCRIPCIÓN:**

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



Figura: 0.8: Corrimiento

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

**POSIBLES CAUSAS:**

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

**2.1.10.3 CORRUGACION****DESCRIPCIÓN:**

Serie de ondulaciones, constituidas por crestas y depresiones, perpendiculares a la dirección del tránsito, las cuales suceden muy próximas unas de otras, a intervalos aproximadamente regulares, en general menor de 1 m entre ellas, a lo largo del pavimento.



Figura: 0.9: Corrugamiento.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

**POSIBLES CAUSAS:**

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

**2.1.10.4 HINCHAMIENTO****DESCRIPCIÓN:**

Abultamiento o levantamiento localizado en la superficie del pavimento, generalmente en la forma de una onda que distorsiona el perfil de la carretera.



Figura: 0.10: Hinchamiento.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

**POSIBLES CAUSAS:**

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

### 2.1.10.5 HUNDIMIENTO

#### DESCRIPCIÓN:

Depresión o descenso de la superficie del pavimento en un área localizada del mismo.



Figura: 0.11: Hundimiento.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

#### POSIBLES CAUSAS:

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

## 2.1.11 DESINTEGRACION EN PAVIMENTOS ASFALTICOS.

### 2.1.11.1 BACHE

#### DESCRIPCIÓN:

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



Figura: 0.12: Bache.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

#### POSIBLES CAUSAS:

Los baches se producen por conjunción de varias causas: fundaciones y capas inferiores inestables; espesores insuficientes; defectos constructivos; retención de agua en zonas hundidas y/o fisuradas. La acción abrasiva del tránsito sobre sectores localizados de mayor debilidad del pavimento y/o fundación, o sobre áreas en las que se han desarrollado fisuras tipo cuero de cocodrilo, que han

alcanzado un alto nivel de severidad, provoca la desintegración y posterior remoción de parte de la superficie del pavimento, originando un bache.

#### **2.1.11.2 PELADURA**

##### **DESCRIPCIÓN:**

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



Figura: 0.13: Peladura.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

##### **POSIBLES CAUSAS:**

Esta anomalía es indicativa que el ligante se ha endurecido apreciablemente, perdiendo sus propiedades ligantes o bien que la mezcla asfáltica existente es de deficiente calidad, ya sea por un contenido de ligante insuficiente, empleo de

agregados sucios o muy absorbentes, como también por deficiencias durante la construcción, especialmente en tratamientos superficiales bituminosos; frecuentemente se presenta como un desprendimiento de agregados en forma de estrías longitudinales, paralelas a la dirección del riego. El desprendimiento puede ser originado también en un proceso de descubrimiento por pérdida de adherencia entre el agregado y el asfalto, cuando actúan agentes agresivos tales como solventes y otros derivados del petróleo, e inclusive, la acción del agua (pluvial).

### **2.1.11.3 DESINTEGRACION DE BORDES**

#### **DESCRIPCIÓN:**

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



Figura: 0.14: Desintegración de Bordes con acumulación de agua.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000



**POSIBLES CAUSAS:**

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

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

**2.1.12 OTROS DETERIOROS.****2.1.12.1 EXUDACION DE ASFALTO.****DESCRIPCIÓN:**

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



Figura: 0.15: Exudación de Asfalto.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

**POSIBLES CAUSAS:**

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

**2.1.12.2 PARCHADOS Y REPARACIONES DE SERVICIOS PUBLICOS.****DESCRIPCIÓN:**

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

Los parchados disminuyen el nivel de servicio de la carretera, al tiempo que puede constituir un indicador tanto de la intensidad de mantenimiento demandado por una carretera, como de la necesidad de reforzar la estructura de la misma. En general las áreas parchadas tienen un comportamiento inferior al pavimento original y en muchos casos son el origen de una mayor rugosidad del pavimento o de nuevas fallas en el mismo o en el área adyacente, particularmente cuando su ejecución es defectuosa.



Figura: 0.16: Parchado.

Fuente: Daños a Pavimentos Asfálticos; Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, Guatemala, Diciembre 2000

### **POSIBLES CAUSAS:**

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

## **SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS.**

Los primeros en advertir la necesidad de administrar y darle mantenimiento a las vías fueron los romanos, quienes poseían un sistema de red compuesta por distintos tipos de calzada. La conservación se realizaba por medio de capataces y camineros, con una circulación controlada, dimensiones y formas de vehículos establecida.

En la actualidad la gestión de pavimentos nace con el estudio de la AASHO<sup>7</sup> en 1966, por medio de la investigación "National Cooperation Highway Research Program" (NCHRP), con la finalidad de proveer las bases teóricas para extender los resultados de la AASHO Road Test<sup>8</sup> realizada en Ottawa. Illinois, entre 1958 y 1961. Haas y Hudson en su libro "Pavement Management System" publicado en 1978, introdujeron definitivamente este concepto en la Ingeniería Vial.

#### **2.1.13 DEFINICIONES.**

El concepto de **conservación de pavimentos** significa la acción de cuidar que su aptitud de servicio se prolongue durante el tiempo requerido, lo cual implica un esfuerzo de preocupación de los encargados y un desembolso de recursos importante por parte de la agencia responsable.

Concepto de sistema: En general un **sistema** es un "modelo de ordenamiento que se aplica en una determinada organización que opera en un entorno cambiante" y comprende una colección de elementos interrelacionados, los cuales operan en conjunto para lograr el objetivo. La efectividad de cada uno de dichos elementos depende de cómo actúa cada uno en el conjunto. Al aplicar la teoría de sistemas se logra simplificar una situación para poder analizar y comprender sus implicancias en el entorno.

---

<sup>7</sup> American Association of State Highway Officials, de Estados Unidos, asociación norteamericana de Oficiales de Carreteras Estatales. (fundada en 1914)

<sup>8</sup> Experimento de Carreteras de la AASHO para determinar como el tráfico contribuye al deterioro del pavimento.

El concepto de **gestión de pavimentos** ha evolucionado en forma acelerada en los últimos veinte años combinando todas las actividades para proveer y administrar pavimentos. Su objetivo básico es usar información segura y consistente para desarrollar criterios de decisión, otorgar alternativas realistas y contribuir a la eficiencia en la toma de las decisiones, para así conseguir un programa de acción económicamente óptimo y en el cual se provea una retroalimentación de las consecuencias de las decisiones tomadas, como medio de asegurar su efectividad. Se puede agregar que gente experimentada puede generar programas racionales, pero para una red extensa se hace imprescindible organizar la información. En caso de no existir un programa de gestión, se cuenta sólo con decisiones aproximadas producto de soluciones limitadas para el mantenimiento, lo cual es de dudosa efectividad en las condiciones de restricción de presupuesto en que generalmente se trabaja

Otro concepto de un sistema de gestión de infraestructura es el conjunto de actividades que tienen como objetivo conservar o mantener un elemento constitutivo de la infraestructura, en nuestro caso las vías, puentes, entre otros, por un período de tiempo con un nivel de estado tal que ofrezca seguridad y comodidad al usuario. Todo esto para obtener el óptimo rendimiento de los recursos invertidos.

La planificación de la gestión de pavimentos otorga beneficios, tales como:



Fuente: Implementación del sistema de gestión de pavimentos como Herramienta HDM-4, Perú, 2007.

#### **2.1.14 CARACTERÍSTICAS**

La gestión de pavimentos debe ser capaz de ser usada por el organismo a cargo de los distintos niveles y contribuir a la toma de decisiones respecto de los proyectos individuales y de la red en que se encuentran insertos dichos proyectos. Por otra parte, la utilización de un adecuado sistema de gestión sobre los caminos permitirá obtener el óptimo rendimiento de los recursos invertidos, valorando para tal efecto a los diversos costos involucrados. Para conseguir un adecuado sistema de gestión es útil conocer algunos de sus requerimientos esenciales.

- Capacidad de ser fácilmente utilizado, posibilitando agregar y actualizar datos y modificarlo con nueva información sin mayor complicación.
- Capacidad de considerar estrategias alternativas dentro de la evaluación.
- Capacidad de identificar la estrategia o alternativa óptima.
- Capacidad de basar sus decisiones en procedimientos racionales, con atributos, criterios y restricciones cuantificables.
- Capacidad de usar información de retroalimentación para conocer las consecuencias de las decisiones.

Los pavimentos son estructuras complejas que involucran muchas variables: combinaciones de cargas que soportan, solicitudes de medio ambiente,

materiales y formas de construcción, mantenimiento, etc. Y es importante entender claramente los factores técnicos y económicos que involucran su construcción, explotación y mantenimiento para poder hacer una apropiada gestión de los pavimentos.<sup>9</sup>

## **NIVELES DE GESTION DE PAVIMENTOS.**

### **2.1.14.1 GESTION DE PAVIMENTO A NIVEL DE PROYECTO.**

Este sistema tiene como enfoque la rehabilitación de la vía, es decir la gestión lo que pretende es analizar el pavimento de una vía en particular, de manera que se pueda determinar la alternativa óptima para la construcción de una nueva estructura o el tipo de acciones de mantenimiento necesarias, y los momentos en que éstas han de aplicarse a un pavimento existente.

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

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

---

<sup>9</sup> Modern Pavement Management: Haas, R



El análisis a nivel de proyecto debe generar una serie de alternativas de construcción y/o mantenimiento, las cuales han de evaluarse técnica y económicamente, de forma que al final se pueda seleccionar aquella que minimice los costos totales del ciclo de vida del pavimento, tomando en cuenta los de construcción así como los de operación de los usuarios, fijando una serie de estándares que han de satisfacerse y que tienen que ver con el comportamiento estructural y funcional del pavimento a través del tiempo<sup>10</sup>.

#### **2.1.14.2 GESTIÓN DE PAVIMENTO A NIVEL DE RED.**

Este sistema de gestión de pavimento tiene como enfoque fundamental el mantenimiento preventivo.

Involucra decisiones para la rehabilitación o mantenimiento de la red como un todo, por lo cual los modelos deben ser diseñados con el fin de optimizar el uso de los fondos disponibles. Debe considerarse para este propósito la serviciabilidad de los pavimentos existentes o el porcentaje de pavimentos deficientes, datos que deben ser recolectados en campo usando metodologías adecuadas.

Algunas actividades que comprende la gestión a nivel de red son:

- Generación de diferentes alternativas de tratamiento en aquellas vías que serán

---

<sup>10</sup>METODOLOGIA PARA LA CALIBRACION DE LOS MODELOS DE DETERIORO DE PAVIMENTOS GENERADOS POR EL PROGRAMA HDM4, Argueta Javier, 2009

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

## **SISTEMAS DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS COMO HERRAMIENTA.**

En términos generales, un sistema de gestión cuenta con un conjunto de procedimientos y herramientas que tienen como propósito asistir a las organizaciones encargadas de las vías en la aplicación de sistemas de procesos relacionados con la gestión de pavimentos, particularmente la identificación de alternativas técnicas y económicamente óptimas para la conservación de la red en el corto y mediano plazo, así como la formulación de programas de mantenimiento.

### 2.1.15 HDM-4 EN LA GESTIÓN DE PAVIMENTO.

HDM- 4 <sup>11</sup> es una herramienta proporcionada por el Banco Mundial que se utiliza para modelar los estándares de conservación y diseño de una carretera. Su uso en este ámbito se remonta a más de dos décadas, combinando la evaluación técnica y económica, programas de inversión y análisis de estrategias para un sistema de gestión a nivel ya sea de proyecto u red.

Cuando se consideran las aplicaciones de HDM-4 contempla el proceso de gestión de carreteras en cuanto a las siguientes funciones<sup>12</sup>:

- **Planificación**

La planificación representa el análisis del sistema vial como un todo, lo que normalmente requiere la estimación de los gastos de mediano a largo plazo o de los gastos estratégicos para desarrollar y conservar carreteras bajo distintos escenarios presupuestales y económicos. Es posible hacer predicciones no solo de las condiciones de la red de carreteras para diversos niveles de financiamiento con base en indicadores claves, sino también del gasto necesario bajo partidas presupuestales específicas. Por lo regular, durante la etapa de planificación el sistema físico de carreteras se define por:

- Características de la flota vehicular que circula por la red.

---

<sup>11</sup> Highway Development & Management System / Sistema de Gestión y Desarrollo de Carreteras.

<sup>12</sup> Pautas metodológicas para el uso y aplicación del HDM-4 en la formulación social de proyectos de inversión pública de transporte, Primera edición, Perú, Febrero 2015

- Características de la red. Estas se agrupan en varias categorías que se definen tomando como base algunos parámetros, como:
  - Tipo o jerarquía de carretera.
  - Flujo vehicular/cargas/congestionamiento vehicular.
  - Tipos de pavimentos.
  - Condición del pavimento.
- Longitud de carretera en cada categoría. Los resultados del ejercicio de planificación son de especial interés para los altos funcionarios, tanto de carácter político como profesional, encargados de formular políticas dentro del sector Transportes. Por lo regular, un grupo de planificación se encargará de realizar este trabajo. Ejemplo: Plan Intermodal de Transportes.

- **Programación**

Se trata de un ejercicio de planificación táctica. Es recomendable llevar a cabo un análisis costo-beneficio para determinar la viabilidad económica de cada grupo de estos trabajos.

En la etapa de programación, la red de carreteras se evalúa ruta por ruta, y se divide cada una de estas en tramos homogéneos de pavimento, en función de sus atributos físicos. Por medio de la programación se generan estimaciones de gastos anuales, bajo partidas presupuestales definidas, para distintos tipos de trabajos y para cada tramo carretero. En la mayoría de las ocasiones, los presupuestos están restringidos, y un aspecto fundamental de

la programación es organizar los trabajos por nivel de prioridad, para aprovechar al máximo los recursos limitados. Una de las aplicaciones más frecuentes es para preparar el presupuesto de un programa de trabajo anual o plurianual, para una red o subred vial.

- **Preparación**

Esta es la etapa de planificación a corto plazo en la cual se agrupan los proyectos para su implementación. En esta fase, los diseños se preparan y afinan con mayor precisión; se elaboran los listados de cantidades de obra y las cotizaciones, así como las órdenes de trabajo y contratos necesarios para efectuar los trabajos.

Por lo regular se formulan especificaciones y cotizaciones detalladas, y puede ejecutarse un análisis costo-beneficio pormenorizado para confirmar la viabilidad del esquema final. Es posible agrupar los trabajos programados para tramos carreteros adyacentes mediante la formación de paquetes cuyos alcances permitan que su construcción sea rentable.

Las actividades típicas de preparación incluyen el diseño minucioso de:

- Un proyecto de recapado o refuerzo estructural.
- Trabajos de mejoramiento de la superficie de rodadura.

Por ejemplo, mejoramiento del trazo, ampliación del ancho de la carretera, reconstrucción del pavimento, etc.

Normalmente los presupuestos para actividades como las anteriores ya se han aprobado. Las tareas de preparación, por lo general, están a cargo de

profesionales de niveles medio a subalterno, y de técnicos de los departamentos de diseño o implementación, así como de especialistas en contratos y adquisiciones.

- **Operaciones**

Son tareas que se refieren al trabajo cotidiano de una organización. Por lo regular, las decisiones relacionadas con la gestión de operaciones se toman de manera diaria o semanal, e incluyen la programación del trabajo que se planea realizar, la supervisión de la mano de obra, el equipo y los materiales, el registro del trabajo concluido y el uso de esta información con fines de seguimiento y control.

Las actividades típicamente se concentran en tramos individuales o en subtramos de una carretera, y las mediciones se toman con cierto nivel de detalle. Es común que las operaciones corran a cargo de personal no profesional, es decir, supervisores de obra, técnicos, encargados, entre otros. A medida que el proceso de gestión pasa de la fase de planificación a la de operaciones se observará que las necesidades de información van cambiando. En un inicio se necesita solo un resumen general de la información, pero de manera gradual se incrementa el nivel de detalle de los datos requeridos.

Cada una de estas funciones se realiza como una secuencia de actividades conocidas como el ciclo de gestión<sup>13</sup>. Para llevar a cabo cada una de estas cuatro

---

<sup>13</sup> Robison et al. 1998.

funciones de gestión se recomienda un análisis integrado del sistema. El ciclo proporciona una serie de pasos bien definidos que ayudan a tomar las decisiones del proceso de gestión.



## **CAPITULO III: MODELO DE DETERIORO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES**

---



## **INTRODUCCION A LOS MODELOS DE DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS.**

En la actualidad se han desarrollado nuevas disciplinas para la administración de los pavimentos utilizando modelos de predicción del comportamiento del mismo. Permitiendo la planificación de los trabajos y la optimización de los recursos destinados a la conservación.

Estos modelos de predicción para deterioros en los pavimentos son de utilidad para gestionar o administrar la red de pavimentos, identificando las necesidades futuras de mantenimiento y reparación. Permiten además simular el comportamiento de los pavimentos a lo largo de su vida útil. En el caso de los países con una economía en subdesarrollo es de mucha utilidad incorporar modelos creados por organismo internacionales tales como HDM-4 para su gestión de pavimentos.

Generalmente responde a expresiones matemáticas que permiten predecir posibles evoluciones del estado del pavimento en el tiempo, con ayuda de la información acerca de las condiciones de las etapas como son: la puesta en servicio y momento donde se está realizando su respectivo análisis.

Los desarrollos de estos modelos pueden iniciarse a partir de modelos empíricos o mecanísticos. En relación a los modelos empíricos tienen como origen datos reales del pavimento existente, como por ejemplo criterios de diseño, datos de tránsito, condiciones climáticas y deterioros presentes al largo de su vida útil. Por otro lado, los modelos mecanísticos se basan no solo en la información de los

pavimentos existentes, sino particularmente en características del comportamiento de las diversas capas y materiales que lo conforman, especialmente propiedades mecánicas y físicas.

Es así que de acuerdo a la forma de predicción que presentan los modelos, es posible diferenciar dos tipos de ellos, un modelo agregado o acumulado e incremental.

Los modelos de deterioro acumulados, son aquellos que para predecir un deterioro futuro requieren conocer por completo la historia del comportamiento del pavimento, es decir, se necesita saber de datos tales como la tasa de crecimiento del tránsito a lo largo de la vida del pavimento, tránsito promedio diario al inicio del servicio del pavimento, ejes equivalentes acumulados al momento de la evaluación, nivel de servicio inicial, en muchos casos esto no es posible y por una u otra razón se cuenta sólo con datos parciales.

Por otro lado, los modelos de deterioro de tipo incremental, no requieren conocer la historia previa para predecir los comportamientos futuros, sino que permiten hacerlo con base en un conjunto de ecuaciones y operaciones lógicas, necesitando conocer sólo el estado actual del pavimento, además de las características estructurales, climáticas existentes y el tránsito que circula por dicho pavimento en el año de evaluación.

Los modelos de deterioro de pavimentos se aplican a diversos aspectos relacionados con la administración de pavimentos:

La creación de un sistema de administración de pavimentos, que aplique los modelos para predecir los futuros deterioros del pavimento y para evaluar los resultados de aplicar diversas alternativas de mantenimiento.

- La generación de un conjunto de políticas y estándares de mantenimiento basados en condiciones de deterioro relevantes del pavimento.
- La evaluación del efecto relativo de algunas características del diseño con respecto a otras.

## **TIPOS DE DETERIORO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES MODELADOS EN HDM-4.**

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

### **3.1.1 DETERIOROS SUPERFICIALES.**

En esta categoría se incluyen:

- ♦ **Agrietamiento**
- ♦ **Desprendimientos**
- ♦ **Baches**
- ♦ **Rotura de borde.**

De los deterioros enunciados con anterioridad, los deterioros agrietamiento, desprendimiento y baches se caracterizan por dos fases, denominadas de inicio y de progreso. La fase de inicio se refiere al lapso de tiempo previo al desarrollo de un determinado tipo de deterioro. La fase de progreso comprende el periodo

durante el cual se incrementa el área afectada y la magnitud del deterioro. La rotura de borde se modela considerando únicamente la fase de progreso.

### **3.1.2 DETERIOROS RELACIONADOS CON LA DEFORMACION DEL PAVIMENTO.**

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

- ♦ **Ahuellamiento**
- ♦ **Rugosidad**

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

### **3.1.3 DETERIOROS RELACIONADOS CON LA TEXTURA SUPERFICIAL.**

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

- ♦ **Profundidad de la textura**
- ♦ **Resistencia al deslizamiento**

Los parámetros anteriores también varían en forma continua, por lo que, como el ahuellamiento y la rugosidad, sólo se modelan mediante ecuaciones de progreso.

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

La aplicación de los modelos de deterioro incluye, también, una estimación de la pérdida de capacidad estructural del pavimento en el tiempo y del deterioro del drenaje. En la figura 3.2.1 se observa las interacciones entre los modelos utilizados para predecir los tipos de deterioros considerados.

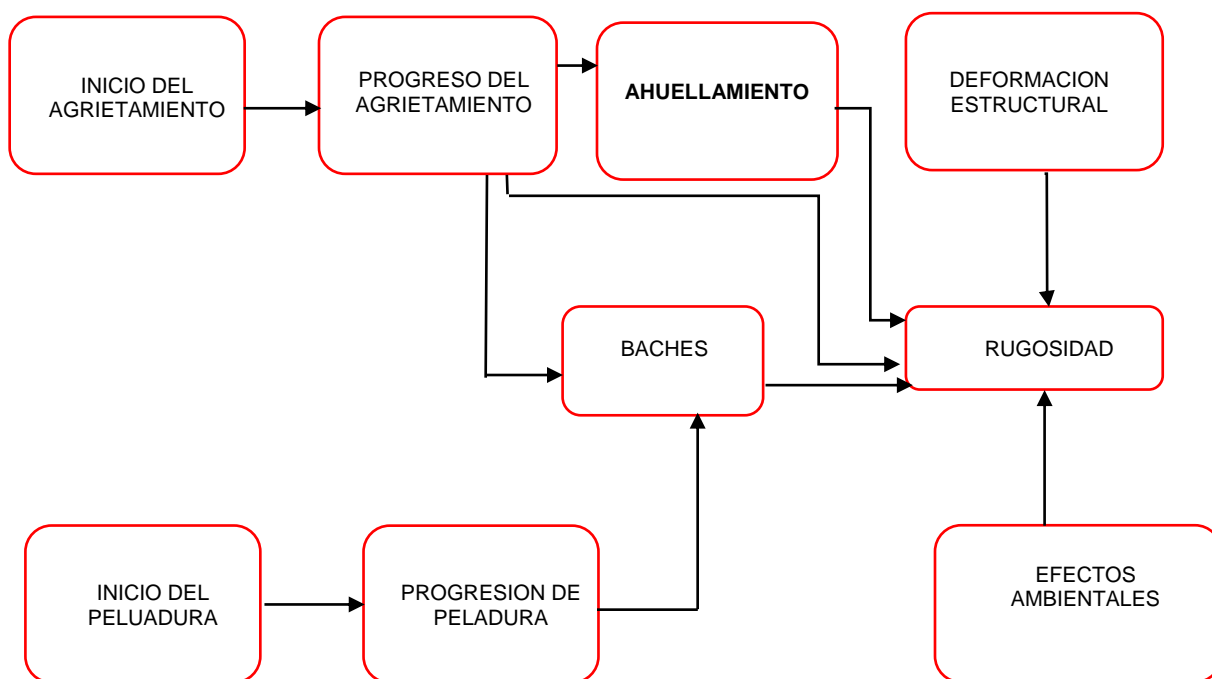


Figura: 0.1: Interacción entre los modelos de deterioro de HDM-4 para pavimentos asfálticos.

Fuente: Análisis de Sensibilidad de los modelos de deterioro del HDM-4 para pavimentos asfálticos, México, 2004

## PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE DETERIOROS MEDIANTE HDM-4.

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

$$\text{Condición}_b = \text{Condición}_a + \Delta\text{Condición} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$\text{Condición}_{prom} = 0.5 (\text{Condición}_a + \text{Condición}_b) \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

- ♦ ***Condición<sub>b</sub>* : condición al final del año de análisis**
- ♦ ***Condición<sub>a</sub>* : condición al inicio del año de análisis**
- ♦ ***ΔCondición* : cambio de la condición en el año de análisis**
- ♦ ***Condición<sub>prom</sub>* : condición promedio en el año de análisis**

El procedimiento de cálculo involucrado en la predicción del deterioro puede dividirse las siguientes fases:

- a) Cálculo de la capacidad estructural del pavimento;
- b) Evaluación del cambio en los deterioros superficiales;
- c) Obtención del área dañada;
- d) Cálculo del cambio en la profundidad de roderas; e) Obtención del IRI al final del año.

A continuación, se muestra el procedimiento para la predicción del deterioro evaluado mediante HDM-4.

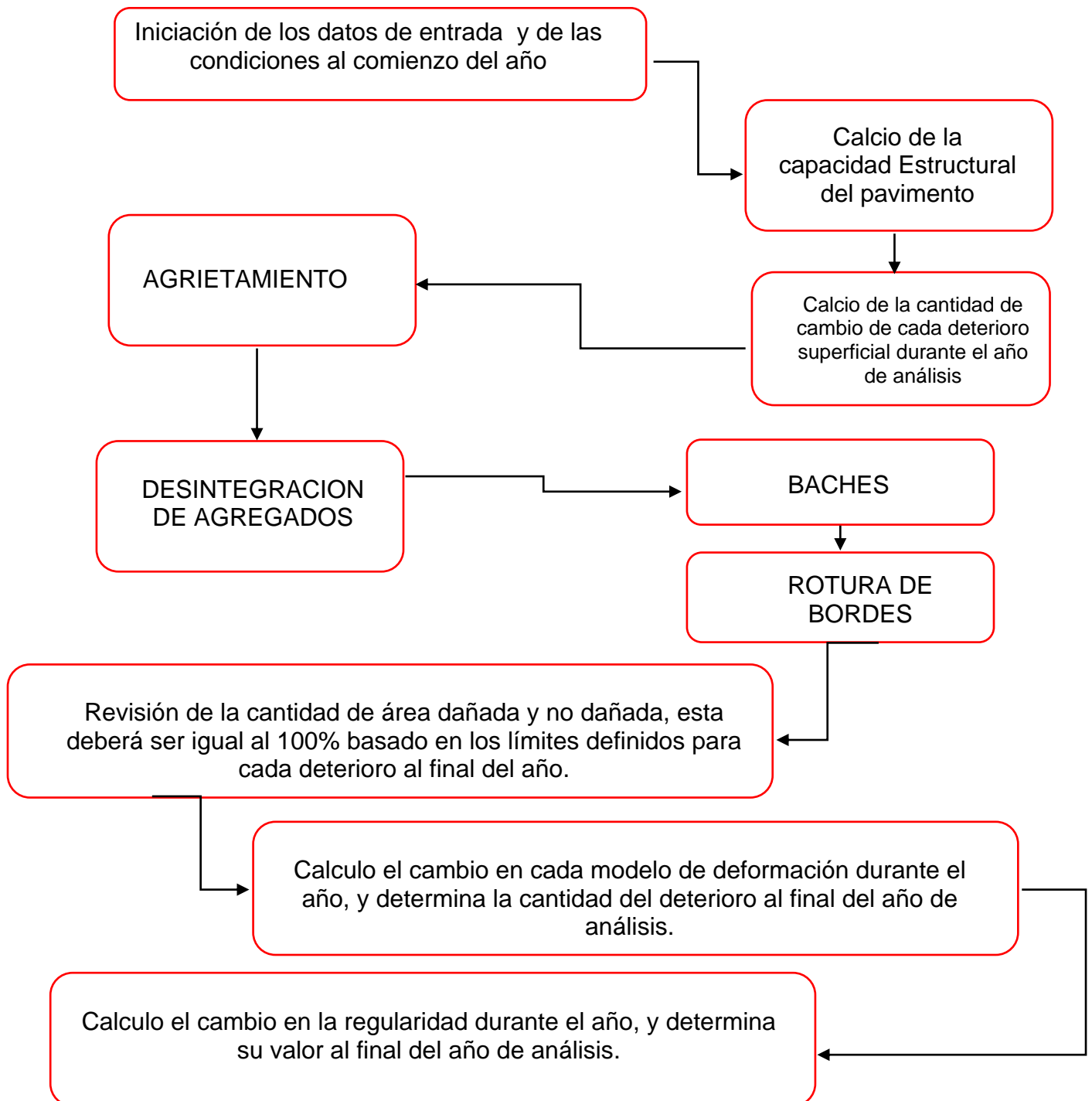


Figura: 0.1: Procedimiento para la predicción del deterioro.

Fuente: Análisis de Sensibilidad de los modelos de deterioro del HDM-4 para pavimentos asfálticos, México, 2004

La investigación que se presenta tiene como objetivo modelar el deterioro ahuellamiento, por lo que se detallara los diferentes factores que intervienen en la calibración del modelo de ahuellamiento.

### **MODELO DE DETERIORO: AHUELLAMIENTO.**

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

El HDM-4 estima la profundidad del ahuellamiento después de calcular los cuatro tipos de deterioros superficiales y de redistribuir las áreas dañadas.

La profundidad total del ahuellamiento se basa en la suma de las siguientes componentes:

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

#### **3.1.4 DENSIFICACIÓN INICIAL:**

Este fenómeno se relaciona con el grado de compactación relativa de la base, sub base y capas de relleno (COMP). Dicho parámetro se introduce como parte del segmento carretero; cabe destacar que la densificación inicial sólo se modela



para el año que sigue a la construcción de la base de un pavimento; no se toma en cuenta para superficies con más de un año de antigüedad.

Esta componente de la profundidad de roderas se calcula como:

$$RDO = K_{rid}[(YE410^6)^{(a_1+a_2DEF)}SNP^{a_3}COMP^{a_4}] \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

*RDO*: Profundidad de las roderas (ahuellamiento) debidas a la densificación inicial.

*YE4*: número anual de ejes equivalentes (millones/carril)

*DEF*: Deflexión promedio medida con viga Benkelman.

*SNP*: número estructural ajustado del pavimento

*COMP*: compactación relativa (%)

*K<sub>rid</sub>*: factor de calibración para la densidad inicial.

Tabla 0:1: Valores por defecto para modelo de densidad inicial.

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

Fuente: Guía de Calibración y Adaptación, Christopher R. Bennett & William D. O. Paterson

La densificación inicial solamente aplica a construcciones nuevas o reconstrucciones que involucre la construcción de una capa nueva de base (esto

es, cuando AGE4=0), para un periodo de tiempo de un año. AGE4 es definido como sigue:

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

### 3.1.5 DEFORMACIÓN ESTRUCTURAL:

Esta componente del ahuellamiento, se modela en el HDM-4 bajo dos condiciones:

Deformación estructural sin agrietamiento:

$$\Delta RSDT_{uc} = K_{rst}(a_o SNP^{a_1} YE4^{a_2} COMP^{a_3}) \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Deformación estructural después del agrietamiento:

$$\Delta RSDT_{crk} = K_{rst}(a_o SNP^{a_1} YE4^{a_2} MMP^{a_3} ACX^{a_4}) \quad (\text{Ec. 3.5})$$

**Donde:**

$\Delta RSDT_{uc}$ : Incremento de la profundidad del ahuellamiento o roderas debido a la deformación estructural sin agrietamiento, en el año de análisis

$\Delta RSDT_{crk}$ : incremento de la profundidad del ahuellamiento o roderas debido

a la deformación estructural cuando ya existe agrietamiento,

en el año de análisis

**MMP**: precipitación media mensual.

$ACX_a$  : área del agrietamiento indexado (se refiere a un parámetro que se calcula mediante una ponderación del agrietamiento total y el agrietamiento ancho) al inicio del año de análisis.

$SNP$ : Número estructural ajustado.

$YE4$ : número anual de ejes equivalentes

$K_{rst}$ : factor de calibración para la deformación estructural.

El incremento anual de deformación estructural se calcula así:

Si,  $ACRA = 0$

Tenemos  $ARDST = ARDST_{UC}$

Si,  $ACRA > 0$

Tenemos  $ARDST_{UC} + ARDST_{crk}$

Donde:

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

Tabla 0:2: Valores por defecto para el modelo de deformación estructural.

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

Fuente: Guía de Calibración y Adaptación, Christopher R. Bennett & William D. O. Paterson

### 3.1.6 DEFORMACIÓN PLÁSTICA:

Incluye al parámetro CDS, el cual indica si la carpeta es susceptible a este tipo de deterioro. Asimismo, se requiere conocer la velocidad media del tránsito pesado en el tramo en estudio ( $Sh$ ), la cual constituye un parámetro esencial para

la estimación de la deformación plástica que, a su vez, es uno de los factores más importantes en la generación de las roderas.

El incremento anual en a la profundidad del ahuellamiento debido a la deformación plástica se obtiene como:

$$\Delta RDPD = K_{rpd}(CDS^3 a_0 YE4Sh^{a_1} HS^{a_2}) \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

**$\Delta RDPD$** : incremento en la deformación plástica durante el año de análisis

**$CDS$** : indicador de defectos en la construcción de superficies asfálticas

**$YE4$** : número anual de ejes equivalentes

**$Sh$** : velocidad de los vehículos pesados

**$HS$** : espesor total de las superficies asfálticas

**$K_{rpd}$** : factor de calibración de la deformación plástica

Tabla 0:3: Valores por defecto para el modelo de deformación plástica.

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

Fuente: Guía de Calibración y Adaptación, Christopher R. Bennett & William D. O. Paterson.

### 3.1.7 USO DE LLANTAS CON ADITAMENTOS:

La componente debida al uso de llantas con aditamentos no se utiliza, ya que solamente aplica para vehículos con clavos en las llantas para facilitar su

desplazamiento en superficies cubiertas de nieve, condición no común en las carreteras salvadoreñas.

### 3.1.8 PROFUNDIDAD TOTAL DEL AHUELLAMIENTO:

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

$$\Delta RDM = RDO + \Delta RDPD + \Delta RDW \text{ (Ec. 3.7)}$$

De otra manera:

$$\Delta RDM = \Delta RDST + \Delta RDPD + \Delta RDW \text{ (Ec. 3.8)}$$

**Donde:**

$\Delta RDM$ : Incremento en la profundidad media de las roderas en ambas huellas, en el año de análisis.

$RDO$ : profundidad de roderas debida a la densificación inicial en el año de análisis

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

$\Delta RDPD$ : incremento en la profundidad de roderas debida a la deformación plástica en el año de análisis

$\Delta RDW$ : incremento en la profundidad de roderas debida a la deformación por el uso de llantas con aditamentos.

La profundidad total media del ahuellamiento para cualquier año es:

$$RDM_b = \text{MIN} [(RDM_a + \Delta RDM_b), 100] \text{ (Ec. 3.9)}$$

**Donde:**

$RDM_b$ : profundidad media de roderas en ambas huellas al final del año de análisis

**$RDM_a$** : profundidad media de roderas en ambas huellas al inicio del año de análisis

### **CALIDAD DE CONSTRUCCION (CDS Y CDB)**

Una calidad pobre de construcción resulta de una mayor variabilidad en las propiedades del material y el rendimiento. HDM-4 no brinda un método de modelación de las proporciones de la carretera que se clasifican como buenos, regulares y malas, así que sólo un nivel promedio de defectos de construcción suele ser incluidos. Los indicadores de defectos de la construcción (CDS y el CDB) son utilizados en los modelos de deterioro.

El CDS es un factor que indica el nivel general de contenido de ligante y la rigidez en relación con el diseño de materiales óptimos para la mezcla bituminosa especificada. Se utiliza como un indicador para ilustrar si un revestimiento bituminoso es propenso a agrietarse y desprenderse (bajo valor de CDS), o propenso a la formación de ahuellamiento a través de la deformación plástica (alto valor del CDS).

El CDS es una variable continua, por lo general varía entre 0.5 y 1.5, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 0:1: Selección del Indicador de defectos de Construcción para superficies bituminosas.

CONDICION DE SUPERFICIE		CDS
Seco (Fragil)	Nominalmente el 10% por debajo del diseño óptimo de contenido de ligante.	0.5
Normal	Óptimo contenido de ligante	1.0
Excelente (Suave)	Nominalmente el 10% por encima del diseño óptimo de contenido de ligante	1.5

Fuente: Guía de Calibración y Adaptación, Christopher R. Bennett & William D. O. Paterson

Si esto no se especifica en la condición, se supone que tiene buena calidad de la construcción, se establece con el valor CDS de 1.0. Para los baches, se utiliza el indicador de defectos de construcción de la base (CDB). El CDB es una variable continua que oscila entre 0 (ausencia de defectos de construcción) y 1.5 (varios defectos). El tipo de defectos que deben ser considerados en la selección del valor de CDB se presentan a continuación:

Tabla 0:2: Selección del Indicador de defectos de construcción de la base

DEFECTO DE CONSTRUCCION	CDB
Material de Graduación Pobre	0.5
Forma Pobre del Agregado	0.5
Compactación Pobre	0.5

Fuente: Guía de Calibración y Adaptación, Christopher R. Bennett & William D. O. Paterson

### **COMPACTACION RELATIVA (COMP)**

La compactación relativa está estimada de acuerdo al porcentaje alcanzado en obra respecto a la densidad máxima con ensayo Proctor modificado. Normalmente, el valor de compactación relativa oscila entre un 95 y 97% como valores referenciales, exceptuando cuando se tenga información específica que demuestre una compactación deficiente, que representaría un porcentaje inferior al que se menciona con anterioridad.



## **CAPITULO IV: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.**

---

## INTRODUCCIÓN

Para desarrollar la investigación es importante contar con información completa y precisa de las condiciones del pavimento en estudio, durante un tiempo considerable, con la finalidad de recrear el comportamiento del pavimento en un determinado periodo.

Durante la investigación se empleó datos del inventario vial, que abarcan los años 2002, 2007 y la última consultoría realizada el pasado 2015, proporcionada por la Dirección de Planificación de la Obra Pública (DPOP), específicamente de la Subdirección de Administración de obras de paso y de inventarios viales, pertenecientes al Ministerio de Obras Públicas (MOP). El periodo de análisis es abarca 13 años.

Considerando que los datos utilizados en la investigación provienen de procedimientos utilizados que podrían o no garantizar cierta confiabilidad, fue importante realizar una selección exhaustiva de los mismos, con la finalidad de proporcionar una la menor dispersión y variabilidad en la información. Esto será posible mediante el análisis de sensibilidad para modelo de ahuellamiento con el objetivo que conocer que variables poseen mayor influencia en el comportamiento de dicho modelo.

Es por ello que a continuación se describe en que consiste la sensibilidad en un modelo de comportamiento para un deterioro en HDM-4, su importancia, además

de conocer en que consiste la sensibilidad de los deterioros del camino y las predicciones de mantenimiento (RUE).

#### **4.1.1. SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE DETERIORO HDM-4**

A fin de mejorar los procesos internos relacionados con la conservación y mejoramiento de las redes a su cargo, las organizaciones operadoras de carreteras han venido mostrando en los últimos años un creciente interés por la implantación de sistemas de gestión de pavimentos. Sin embargo, la carencia de herramientas de análisis confiables en el ámbito nacional ha provocado que las entidades responsables de la operación vial pospongan sus proyectos relacionados con el desarrollo de sistemas de gestión.

El HDM-4 representa una opción para implementar la parte de los sistemas de gestión de pavimentos relativa a las herramientas de análisis, por tratarse de un método basado en estudios de campo exhaustivos.

Una de las desventajas de HDM-4 es el número de parámetros de entrada; una parte importante de los cuales se obtienen mediante estudios de campo costosos, por lo que resulta imperativo realizar análisis de sensibilidad para identificar los parámetros con mayor influencia en los resultados, y optimizar el uso de los recursos disponibles en la recopilación de información en campo y en gabinete.

Los modelos de deterioro deben cumplir con ciertos requerimientos para poder ser calificados como confiables y bien cuantificados, como los siguientes:

- Los modelos matemáticos deben predecir la condición del camino en el tiempo, además de permitir conocer los efectos a corto y largo plazo de las actividades de mantenimiento y estimar el momento más adecuado para realizarlas.
- La calidad del nivel de servicio del pavimento y la tendencia de su condición, debe ser cuantificada de tal forma que tenga relación directa con los factores que provocan su cambio.
- Para su implementación, dentro de un sistema de administración de pavimentos, los modelos deben utilizar sólo parámetros que puedan ser medidos físicamente y obtenidos con facilidad.
- Deben tenerse en cuenta los conceptos estadísticos de probabilidad y confiabilidad asociados a las predicciones que realizan los modelos.<sup>14</sup>

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

---

<sup>14</sup> Metodología para el desarrollo modelos de deterioro para caminos vecinales de lastre y suelo. Fabricio Leiva Villacorta, LANANME, Costa Rica, Diciembre 2004.

pavimento en el tiempo. Para aquellos parámetros con mayor incidencia sobre indicadores técnicos y económicos del pavimento será necesario realizar evaluaciones periódicas para controlar su evolución en el tiempo.

Los modelos considerados en el programa HDM-4 son especialmente sensibles a ciertos parámetros de estado y a algunas características generales de tramos, como por ejemplo variaciones del nivel de tránsito o de la estructura dentro un mismo tramo.

#### **4.1.1 IMPORTANCIA DE LA SENSIBILIDAD DEL HDM-4**

El HDM-4 incorpora un número importante de relaciones que modelan en forma muy detallada distintos aspectos relacionados con el deterioro de los pavimentos; los costos de operación vehicular; la evaluación económica de proyectos; y la jerarquización y optimación de programas de obra.

El nivel de detalle empleado por el HDM-4 permite modelar la mayoría de los factores que intervienen en la evaluación de los proyectos viales; por ejemplo, en lo que se refiere al deterioro de pavimentos, el sistema analiza prácticamente todos los indicadores que se emplean para caracterizar este fenómeno: irregularidad, deterioros superficiales, resistencia al deslizamiento, capacidad estructural, etc.

Sin embargo, para lograr este nivel de detalle, el HDM-4 utiliza un número muy importante de variables de entrada. A fin de ilustrar este hecho, considérese que la evaluación de un proyecto de conservación con tres posibilidades para un

tramo carretero de concreto asfáltico, con una flota vehicular compuesta por cinco tipos de unidades requiere unos 800 datos de entrada. Si bien, para un alto porcentaje de estos datos pueden utilizarse como primera aproximación valores por omisión definidos dentro del HDM-4; es claro que aun la revisión de estos valores para verificar que se ajusten razonablemente a los datos reales, puede significar una tarea sumamente ardua. Por otro lado, algunas de las variables para las que no es recomendable utilizar los valores por omisión, como los espesores de las capas del pavimento, resultan muy difíciles de conseguir en forma directa. De lo ya señalado se desprende la necesidad de estudiar la sensibilidad de los modelos internos del HDM-4, a fin de jerarquizar cada uno de los parámetros que en ellos de acuerdo con su impacto en los resultados del sistema, y generar un listado de las variables cuyos valores resulta indispensable obtener en campo o en gabinete, para garantizar que esos resultados correspondan a la realidad. El conocimiento de la sensibilidad del HDM-4 resulta de gran utilidad no sólo para optimizar los recursos disponibles para la recopilación de información, destinándolos a conseguir variables con mayor influencia en los resultados, sino también para encausar los esfuerzos que se emprendan para la calibración de los modelos bajo condiciones nacionales, actividad que resulta imprescindible si se desea que el sistema modele en forma fidedigna las condiciones de la red.

En lo que se refiere al HDM-4, el análisis de sensibilidad que aborda tanto los Modelos de Efectos para los Usuarios (RUE) como los de deterioros y efectos de las obras (RDWE).

Su cuantificación está definida por el concepto de *elasticidad del impacto*, el cual se define como la relación entre los porcentajes de cambio de un resultado específico y un dato de entrada. El análisis se basó en el enfoque *ceteris paribus*, que consiste en modificar cada parámetro por separado y obtener la sensibilidad correspondiente, manteniendo los demás parámetros constantes.

En el enfoque *ceteris paribus*, el impacto de los parámetros depende en términos generales, de los siguientes factores:

- a) el parámetro considerado, su valor inicial, y su porcentaje de variación;
- b) el resultado de referencia;
- c) los valores asignados al resto de los parámetros.

Para ilustrar este concepto, considérese que si un incremento de 10% en las cargas del tránsito produce un aumento de 2.9% en el pronóstico de crecimiento del IRI para un periodo de análisis de 10 años, la elasticidad del impacto de este resultado con respecto al cambio introducido en las cargas vehiculares, será de 0.29. En los casos en los que se obtiene una disminución del resultado analizado, el valor de la elasticidad del impacto se considera negativo, aunque para efectos de clasificación, se toma el valor absoluto.

Para caracterizar el nivel de influencia de cada variable, se definieron cuatro categorías de sensibilidad en función de la elasticidad del impacto:

Tabla 0:1: Categorías definidas para el análisis de sensibilidad en HDM-4

<b>Nivel de Impacto</b>	<b>Categoría de Sensibilidad</b>	<b>Elasticidad del Impacto</b>
<b>Alto</b>	S-I	>0.50
<b>Moderado</b>	S-II	0.20-0.50
<b>Bajo</b>	S-III	0.05-0.20
<b>Muy bajo</b>	S-IV	< 0.05

Fuente: Guía de Calibración y Adaptación, Versión I; Volumen 5, Manual HDM-4.

Estos datos o coeficientes del modelo con impactos que van desde moderado a alto (S-I y S-II) deberían ser tenidos muy en cuenta. El impacto bajo y el intangible (S-III y S-IV) se deberán tener en cuenta, solamente, si se permiten tiempos o recursos. Usualmente, se asumen los valores predefinidos de HDM para S-III y S-IV ya que, generalmente, ofrecen resultados adecuados.

#### **4.1.2 SENSIBILIDAD EN LOS MODELOS DE DETERIOROS Y EFECTOS DE LAS OBRAS (RDWE).**

El submodelo RDWE pronostica el deterioro del pavimento a lo largo del tiempo y en ciertas condiciones del tráfico. Cuando se efectúa el mantenimiento, el estado del pavimento se mejora y los volúmenes de material aplicado se multiplican por sus costos unitarios para establecer el costo del tratamiento.



En común con el sub-modelo RUE, hay una serie de interdependencias en el modelado de RDWE. Cabe señalar que esfuerzo superficial ha separado de iniciación y progresión de los modelos. Esto se ilustra en la Figura: 4.1.1.

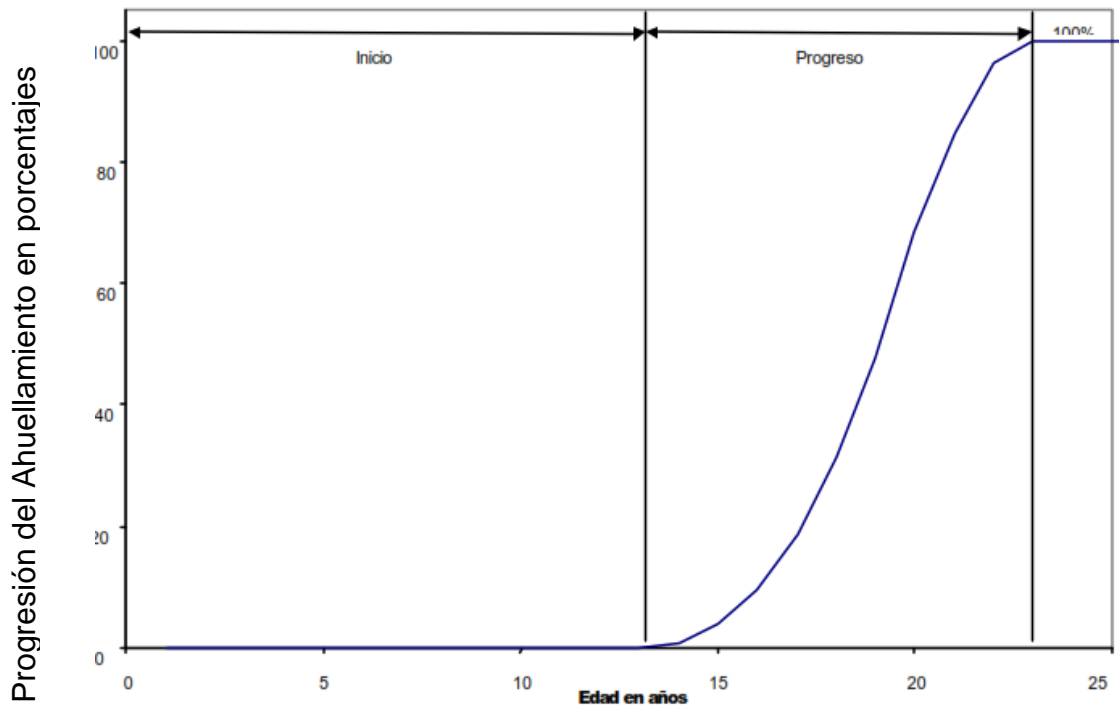


Figura: 0.1: Inicio y progresión del deterioro ahuellamiento..

Fuente: Guía de Calibración y Adaptación, Versión I, Volumen 5, Manual HDM-4.

La sensibilidad de los deterioros del camino y las predicciones de mantenimiento para variaciones de parámetros de entrada individuales son presentadas en la columna extrema derecha de la tabla 4.2. La clasificación generalizada que se haga en los mismos cuatro rangos de entrada como de la elasticidad del impacto se utilizan para los efectos RUE. Para el RDWE, sin embargo, se basan en los impactos sobre las condiciones físicas y en los costos y beneficios económicos, ya que influyen en el comportamiento del pavimento, el calendario de

mantenimiento, los rendimientos económicos y las prioridades más probables de los distintos tratamientos.

➤ **IMPACTO ALTO, CLASE S-I (> 0,5)**

Los datos de entrada con mayor sensibilidad incluyen las variables estructurales del pavimento, el tráfico y la rugosidad, que son todos los datos medidos. Las variaciones en las variables estructurales, Numero Estructural modificado o deflexiones, y la carga de tráfico anual (en millones de ESAL's), afectan a los resultados más importantes incluyendo el mantenimiento periódico, las alternativas de rehabilitación y la rentabilidad económica. Estos son sensibles en alto grado solo cuando la adecuación estructural del pavimento es baja o moderada comparada con las cargas (en otras condiciones, cuando el PSA es de alto a moderado los impactos son moderados, es decir, la clase S-II), variación del volumen de tráfico, lo que determina el número de usuarios que obtengan beneficios, tiene fuerte influencia en la rentabilidad económica, pero baja influencia (S-II o S-III) sobre los impactos físicos.

La variación de la rugosidad del pavimento, que afecta a los ahorros obtenidos por unidad de cada usuario, tiene impacto alto en todos los resultados económicos y en las necesidades de rehabilitación, pero poco sobre el esfuerzo superficial (S-III).

➤ **IMPACTO MODERADO, CLASE S-II (0,2 - 0,5)**

Las variaciones del pavimento y las edades de la superficie, tienen un impacto moderado sobre las necesidades y el calendario de mantenimiento periódico, y bajo impacto en el rendimiento económico.

➤ **IMPACTO ALTO, CLASE S-I (> 0,5)**

Los datos de entrada con mayor sensibilidad incluyen las variables estructurales del pavimento, el tráfico y la rugosidad, que son todos los datos medidos. Las variaciones en las variables estructurales, Numero Estructural modificado o deflexiones, y la carga de tráfico anual (en millones de ESAL's), afectan a los resultados más importantes incluyendo el mantenimiento periódico, las alternativas de rehabilitación y la rentabilidad económica. Estos son sensibles en alto grado solo cuando la adecuación estructural del pavimento es baja o moderada comparada con las cargas (en otras condiciones, cuando el PSA es de alto a moderado los impactos son moderados, es decir, la clase S-II), variación del volumen de tráfico, lo que determina el número de usuarios que obtengan beneficios, tiene fuerte influencia en la rentabilidad económica, pero baja influencia (S-II o S-III) sobre los impactos físicos.

La variación de la rugosidad del pavimento, que afecta a los ahorros obtenidos por unidad de cada usuario, tiene impacto alto en todos los resultados económicos y en las necesidades de rehabilitación, pero poco sobre el esfuerzo superficial (S-III).

➤ **IMPACTO MODERADO, CLASE S-II (0,2 - 0,5)**

Las variaciones del pavimento y las edades de la superficie, tienen un impacto moderado sobre las necesidades y el calendario de mantenimiento periódico, y bajo impacto en el rendimiento económico.

➤ **IMPACTO BAJO, CLASE S-III (0,05-0,2)**

Las variaciones en la cantidad de baches y el volumen de vehículos pesados (a diferencia de las cargas) tienen un impacto directo sobre la cantidad de baches y la economía de bacheo, pero generalmente los impactos son bajos en el mantenimiento y las necesidades de rehabilitación. Nótese, sin embargo, que la presencia o no de baches tiene un impacto moderado en la ausencia de una alternativa de bacheo. Variaciones en el valor de Ahuellamiento y desviación estándar, y el factor ajustado de la progresión del Ahuellamiento tienen bajo o insignificante impacto en la intervención del mantenimiento de grietas, intervención en la rugosidad, y la rentabilidad económica. Resellar con un espesor delgado tiene bajo impacto en el rendimiento económico de mantenimiento.

➤ **IMPACTO MUY BAJO, CLASE S-IV (<0,05)**

Las variaciones en la compactación de la sub-rasante y los parámetros de precipitaciones tienen un bajo impacto sobre la progresión del Ahuellamiento e

impactos muy bajos sobre las intervenciones y rentabilidad económica. Otros efectos de la lluvia están implícitos en la resistencia del pavimento (Número estructural o deflexión) y no están ligados a los parámetros de precipitación. Variaciones en el área de peladura y el factor de progresión de peladura afecta la cantidad de baches, pero sobre todo tiene impactos muy bajos sobre el agrietamiento o la rugosidad y la rentabilidad económica. Variaciones en la deflexión del pavimento tiene impactos muy bajos cuando se tiene el número estructural modificado.

Categoría de sensibilidad	Elasticidad del impacto	Parámetro	Grupos de resultados con mayor impacto		
			Comportamiento del pavimento	Reposición de la capa de rodamiento, y deterioros superficiales	Beneficios económicos debidos al mantenimiento
S-I	> 0.50	Número estructural	•	•	•
		Número estructural modificado	•	•	•
		Volumen de tránsito			•
		Deflexión (con SN <sup>2</sup> )	•	•	•
		Irregularidad	•		•
S-II	0.20 – 0.50	Cargas por año	•	•	•
		Edad		•	•
		Área de agrietamiento total		•	•
		Área de agrietamiento ancho		•	•
		Factor ambiental de la irregularidad	•		•
		Factor de inicio del agrietamiento	•	•	•
		Factor de evolución del agrietamiento		•	
S-III	0.05 - 0.20	VRS de la subrasante (con SN)	•		
		Espesor de la capa de rodamiento (con SN)		•	•
		Número de ejes de vehículos pesados		•	•
		Área de baches	•	•	
		Media de la profundidad de roderas	•		
		Desviación estándar de la profundidad de roderas	•		
		Factor de evolución de la profundidad de roderas	•		
		Factor general de la irregularidad	•		•
S-IV	< 0.05	Deflexión (con SNC <sup>3</sup> )		•	
		Compactación de la subrasante	•		•
		Precipitación (con K <sub>ps</sub> )	•		
		Área con desprendimientos		•	
		Factor de desprendimientos		•	

Figura: 0.2: Resultados del análisis de sensibilidad del HDM-4, para los modelos RDWE.

FUENTE: Guía de calibración y adaptación, volumen 5, HDM-4

**Procedimiento general para evaluar sensibilidad:**

1. Definir las condiciones del análisis, asignando valores iniciales a todas las variables requeridas por el sistema.
2. Elegir un parámetro.
3. Utilizando el valor inicial del parámetro, calcular el pronóstico del resultado de referencia para periodos comprendidos entre 1 y 20 años.
4. Variar el parámetro elegido en un porcentaje determinado.
5. Repetir el cálculo del punto 3 con el nuevo valor del parámetro.
6. Calcular el valor de elasticidad del impacto correspondiente a cada periodo.
7. Repetir los pasos 4 a 6 para distintos porcentajes de variación, en un rango tal que permita identificar el comportamiento de la sensibilidad del resultado de referencia con respecto al parámetro elegido, y al mismo tiempo sea compatible con el rango de valores admitidos para el parámetro dentro del HDM-4.
8. Repetir los pasos 2 a 7 hasta concluir el análisis de todos los parámetros que intervienen en los modelos de deterioro para pavimentos asfálticos.

$$\text{Es así; } EI = \frac{\Delta R}{\Delta D} \text{ (Ec. 4.1)}$$

Donde:

*EI: Elasticidad de Impacto.*

*$\Delta R$  Porcentaje de cambio en el resultado de referencia.*

*$\Delta D$ : Porcentaje de cambio en el parámetro de entrada*

En la evaluación de este parámetro se encuentran dos aspectos importantes a considerar:

**Efecto:** Indica el tipo de influencia que una variable determinada tiene en un indicador de deterioro, si su influencia es positiva (+) indica que al aumentar el valor de la variable aumentara el valor del indicador de deterioro, y tiene una influencia negativa (-) si el aumento del valor de la variable disminuye el valor del indicador de deterioro.

**Índices de sensibilidad:** Se calculan de forma empírica siguiendo el siguiente procedimiento:

- Utilizando bases de datos para los distintos tramos de pavimentos, se obtienen valores para las diferentes variables incluidas en los modelos.
- Calcular el promedio de cada variable y su desviación estándar.
- Sumar y restar la desviación estándar a cada promedio calculado para cada variable.
- Se obtendrán dos valores que serán indicadores de la distribución de cada variable con respecto a su media.
- Si el valor que resulta de la resta de la desviación estándar al valor promedio es inferior al valor mínimo que puede tomar la variable, por ejemplo, un valor negativo de tránsito o CBR, se toma este valor (cero en todos los casos), para variables auxiliares estos valores son 0 y 1.



- Utilizando las ecuaciones de cada modelo se calcula un valor promedio de deterioro, sustituyendo cada variable por su valor promedio, calculado anteriormente, y usando cero para variables auxiliares.
- Ahora se calcula el deterioro, sustituyendo para una variable sus valores que resultan de la suma y resta de la desviación estándar al promedio, manteniendo el resto de variables con su valor medio.
- Repetir para todas las demás variables del modelo analizado.
- Esto permite obtener bandas o amplitudes de deterioro para cada una de las variables.

Para cuantificar las amplitudes:

- Calcular la diferencia porcentual de los deterioros predichos respecto al medio.
- Se suman los valores absolutos de las diferencias porcentuales de cada variable, obteniendo un ancho de banda.

A continuación se presenta la tabla que indica el índice de sensibilidad:

Tabla 0:2: Índice de Sensibilidad de Variables.

ANCHO DE BANDAS	INDICE DE SENSIBILIDAD
<b>Menor a 5%</b>	1
<b>Entre 5 -20 %</b>	2
<b>Entre 20-50%</b>	3
<b>Entre 50-100%</b>	4
<b>Mayor a 100%</b>	5

Fuente: Guía de Calibración y Adaptación, Versión I; Volumen 5, Manual HDM-4.

La clase de sensibilidad que corresponde cada índice de sensibilidad mostrado en la tabla 4.3 corresponde en HDM-4 a lo siguiente:

Tabla 0:3: Índice y Clase de Sensibilidad según impacto

IMPACTO	INDICE DE SENSIBILIDAD	CLASE DE SENSIBILIDAD HDM-4
<b>ALTO</b>	5 (Mayor a 100%)	S-I
<b>MODERADO</b>	3-4 (20% a 100%)	S-II
<b>BAJO</b>	2 (5 a 20%)	S-III
<b>MUY BAJO</b>	1 (Menor a 5%)	S-IV

Fuente: Guía de Calibración y Adaptación, Versión I; Volumen 5, Manual HDM-4.

Tabla 0:4: Análisis de Sensibilidad del modelo de deterioro Ahuellamiento.

CLASE DE SENSIBILIDAD	INDICE DE SENSIBILIDAD	PARAMETRO	CONFIABILIDAD
<b>S-II</b>	3-4	Cargas por año	80 a 85%
		Edad del pavimento	
		Área de agrietamiento total y ancho	
		Factor ambiental	
		Inicio y progresión de agrietamiento.	
<b>S-III</b>	2	VRS de la subrasante (con SN)	60 a 65%
		Espesor de la capa de rodamiento (con SN)	
		Número de ejes de vehículos pesados	
		Media de la profundidad de roderas	
		Desviación estándar de la profundidad de roderas	
		Factor de evolución de la profundidad de roderas	

Fuente: Análisis de Sensibilidad de los Modelos de deterioro del HMD-4 para pavimentos asfálticos, México, 2004.



Tabla 0:5: Ejemplo numérico de cálculo de Índice de Sensibilidad

SENSIBILIDAD RELATIVA												
MODELO: DENSIFICACION INICIAL.												
CONDICION: BASE NO ESTABILIZADA (BASE GRANULAR GB)												
FORMULA	$RDO = K_{rtd} [(YE410^6)^{(\alpha_1 + \alpha_2 DEF)} SNP^{\alpha_3} COMP^{\alpha_4}]$											
VARIABLE	UNIDAD	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X} + \sigma$	$\bar{X} - \sigma$	RDO (Valor medio)	RDD1	RDD2	DIF% MIN	DIF% MAX	ABSOLUTO	INDICE DE SENSIBILIDAD
$K_{rtd}$	Adimensional	1.00	0.00	1.00	1.00		0.62	0.62	27.0%	27.0%	54.0%	4
YE4	Millones/Carri	3.72	0.00	3.72	3.72		0.62	0.62	27.0%	27.0%	54.0%	4
SNP	Adimensional	4.69	1.23	5.92	3.46		0.55	0.72	36.0%	16.0%	52.0%	4
COMP		0.95	0.01	0.96	0.94		0.60	0.63	29.0%	26.0%	55.0%	4
DEF	mm	1.08	0.82	1.90	0.26	0.61	0.64	0.59	5.2%	3.1%	8.3%	2
a1	Adimensional	0.09	0.00	0.09	0.09		0.62	0.62	0.9%	0.9%	1.8%	2
a2	Adimensional	0.04	0.00	0.04	0.04		0.62	0.62	0.9%	0.9%	1.8%	2
a3	Adimensional	-0.50	0.00	-0.50	-0.50		0.62	0.62	0.9%	0.9%	1.8%	2
a4	Adimensional	-2.30	0.00	-2.30	-2.30		0.62	0.62	0.9%	0.9%	1.8%	2

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar las variables que presentan un índice de Sensibilidad de 4 son YE4, SNP y COMP indicando que tienen una influencia moderada en la obtención de Densificación Inicial o inicio de ahuellamiento. Y la variables DEF tiene un índice de Sensibilidad de 2 indicando un impacto bajo dentro del análisis mencionado con anterioridad. La confiabilidad en los datos en el caso de un Índice de Sensibilidad 5 y 2 se encuentra en la tabla 4.1.5.

### **DEFINICION DE LA INFORMACION A UTILIZAR.**

Las clases de datos utilizados para realizar la calibración del modelo de deterioro Ahuellamiento para HDM-4, son básicamente las siguientes:

- Datos Generales
- Datos Estructurales
- Datos Geométricos
- Datos de Auscultación
- Datos Históricos (de otros pavimentos, de la construcción, de mantenimiento).
- Datos de Medio Ambiente
- Datos de Tránsito

Esta información será útil para analizar y modelar el comportamiento del pavimento y de esta forma poder determinar los factores de calibración para ajustarlos lo más posible a las condiciones locales, por lo que es necesario que los datos sean rápidamente accesibles.

A continuación, se presentan, en las Tablas de la 4.1.2.1 a 4.1.2.7, la información que cada clase de dato requiere y su utilidad en el análisis de calibración de modelos de deterioro HDM-4.

Tabla 0:1: Datos Generales

<b>CLASES DE DATOS</b>	<b>TIPOS DE DATOS</b>	<b>FUNCIONALIDAD</b>
<b>DATOS GENERALES</b>	Tipo de flujo Velocidad	❖ Configuración inicial HDM - 4
	Patrón de flujo Trafico	❖ Configuración inicial HDM - 4
	Zona climática	❖ Configuración inicial HDM - 4
	Categoría de la carretera	❖ Configuración inicial HDM - 4
	Tipo de superficie	❖ Configuración inicial HDM - 4
	Tipo de pavimento	❖ Configuración inicial HDM - 4
	Longitud de tramo	❖ Configuración inicial HDM - 4
	Ancho de calzada	❖ Configuración inicial HDM - 4
	Ancho de hombros	❖ Configuración inicial HDM - 4
	Número de carriles	❖ Configuración inicial HDM - 4

Fuente: Pautas metodológicas para el uso y aplicación del HDM-4 en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de transporte, Perú, Febrero 2015.

Tabla 0:2: Datos Geométricos.

<b>CLASES DE DATOS</b>	<b>TIPOS DE DATOS</b>	<b>FUNCIONALIDAD</b>
<b>DATOS GEOMETRICOS</b>	Subidas y Bajadas	❖ Configuración geométrica de la carretera
	Curvatura Horizontal	❖ Configuración geométrica de la carretera
	Límite de velocidad	❖ Configuración geométrica de la carretera
	Altitud	❖ Configuración geométrica de la carretera
	Tipo de drenaje	❖ Configuración geométrica de la carretera

Fuente: Pautas metodológicas para el uso y aplicación del HDM-4 en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de transporte, Perú, Febrero 2015.



Tabla 0:3: Datos Estructurales.

CLASES DE DATOS	TIPOS DE DATOS	FUNCIONALIDAD
<b>DATOS ESTRUCTURALES</b>	Tipo de material	❖ Establecer el comportamiento del pavimento
	Espesor reciente	❖ Establecer el comportamiento del pavimento
	Espesor previo	❖ Establecer el comportamiento del pavimento
	Numero estructural	❖ Establecer el comportamiento del pavimento
	CBR de la Sub-Rasante	❖ Aporte de resistencia por parte de la Sub-Rasante
	Temporada	❖ Efecto sobre el valor de SN

Fuente: Pautas metodológicas para el uso y aplicación del HDM-4 en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de transporte, Perú, Febrero 2015.

Tabla 0:4: Datos de Auscultación.

CLASES DE DATOS	TIPOS DE DATOS	FUNCIONALIDAD
<b>DATOS DE AUSCULTACIÓN</b>	Ahuellamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Descripción del estado actual</li> <li>❖ Predicción del estado a futuro</li> <li>❖ Tendencia del comportamiento del modelo de ahuellamiento</li> </ul>
	Deflexión	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Descripción del estado actual</li> <li>❖ Predicción del estado futuro</li> <li>❖ Identificar insuficiencias estructurales</li> <li>❖ Determinar restricciones de carga</li> </ul>
	Propiedades del material de las capas	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Estimar la variabilidad entre secciones</li> <li>❖ Desarrollar bases para mejorar los estándares</li> </ul>
	Altitud	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Configuración geométrica de la carretera</li> </ul>
	Geotecnia	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Definir características generales de los terrenos de fundación.</li> </ul>

Fuente: Pautas metodológicas para el uso y aplicación del HDM-4 en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de transporte, Perú, Febrero 2015.

Tabla 0:5: Datos Históricos.

<b>CLASES DE DATOS</b>	<b>TIPOS DE DATOS</b>	<b>FUNCIONALIDAD</b>
<b>DATOS HISTÓRICOS</b>	Historia de Mantenión	❖ Identificar variaciones en el comportamiento del pavimento debido al efecto del mantenimiento.
	Historia de Construcción	❖ Evaluar efectividad de la construcción. ❖ Determinar valores para los parámetros relacionados con la construcción.
	Historia del Transito	❖ Definir características del tránsito local ❖ Estimar tendencias del comportamiento

Fuente: Pautas metodológicas para el uso y aplicación del HDM-4 en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de transporte, Perú, Febrero 2015.

Tabla 0:6: Datos de Clima y Drenaje.

<b>CLASES DE DATOS</b>	<b>TIPOS DE DATOS</b>	<b>FUNCIONALIDAD</b>
<b>DATOS DE CLIMA Y DRENAJE</b>	Drenaje	❖ Evaluar el comportamiento de la red
	Clima	❖ Evaluar el comportamiento de la red

Fuente: Pautas metodológicas para el uso y aplicación del HDM-4 en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de transporte, Perú, Febrero 2015.

Tabla 0:7: Datos de Tránsito.

CLASES DE DATOS	TIPOS DE DATOS	FUNCIONALIDAD
DATOS DE TRANSITO	Tipos de Vehículos	❖ Conocer las características físicas y técnicas de los vehículos que circulan.
	Flota Vehicular	❖ Conocer las características físicas y técnicas de los vehículos que circulan.
	Volumen	❖ Determinar las solicitudes de tránsito y la demanda vehicular que transitan sobre la carretera.
	Ejes Equivalentes	❖ Estimar el efecto de las cargas en el deterioro de los pavimentos.

Fuente: Pautas metodológicas para el uso y aplicación del HDM-4 en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de transporte, Perú, Febrero 2015.

#### 4.1.3 DESCRIPCION DE DATOS QUE INCIDEN EN LA DETERMINACION DEL DETERIORO AHUELLAMIENTO EN HDM-4

##### DATOS GENERALES:

##### 4.1.3.1 DEFINICIÓN DE TRAMO EN ESTUDIO

También conocido como Banda de estudio o banda de prueba.

Surge a partir la selección de tramos de al menos 300 metros, siendo importantes que estos sean homogéneos, deben estar en una recta y la

pendiente deberá ser menor de 3%, el número de tramos mínimos para el modelo de deterioro en investigación:

Tabla 0:8: Matriz de diseño minio para selección de tramos de estudio a calibrar.

<b>Parámetro</b>	<b>Número Mínimo de las clases</b>	<b>Descripción de las clases</b>	<b>Notas</b>
<b>Estado de Ahuellamiento</b>	2	Ahuellamientos >6 mm y <6 mm	Tomar en cuenta que para las secciones con ahuellamiento, la profundidad del sello debe ser menor a 50 mm.

Fuente: Pautas metodológicas para el uso y aplicación del HDM-4 en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de transporte, Perú, Febrero 2015.

Para tramos cuya calzada es de 2 carriles, según el código internacional numérico que representa la asignación del número de carril según el tipo de vía: 1 Calzada y 2 Carriles, es decir un carril en sentido ascendente al kilometraje y uno en sentido descendente al kilometraje.

En esta investigación tomando en cuenta las recomendaciones anteriores se seleccionó tramos cuyas longitudes están divididas en tramos o segmentos de 250 m, es decir 0.25 km en cada tramo, se obtuvieron 42 tramos de estudio para la carretera por nombre CA01E - Santiago de María.

Tabla 0:9: CARACTERISTICA DE LAS BANDAS EN ESTUDIO.

<b>CODIGO</b>	<b>TRAMO</b>	<b>KM INICIO</b>	<b>KM FINAL</b>	<b>LONGITUD (KM)</b>	<b>CATEGORIA FUNCIONAL</b>
<b>CA01E</b>	CA01E - Santiago de María	104.77	115.27	10.50	Primaria

Fuente: DPOP, 2015

#### 4.1.4 LA CLASIFICACION O CATEGORIA EN LAS VIAS EN ESTUDIO.

Según el documento Manual Centroamericana de Normas de diseño Geométrico para las carreteras regionales segunda edición 2004, así como el Manual Centroamericano de Normas para diseño Geométrico en carreteras con enfoque de Gestión de Riesgo y Seguridad Vial tercera edición 2011 en sus capítulos relacionados a clasificación de la red de carreteras contempla lo siguiente:

**Áreas Urbanas:** son aquellos lugares dentro de los límites establecidos por los funcionarios estatales y locales responsables, con una población de 5,000 o más habitantes. Las áreas urbanas se subdividen en áreas urbanizadas (población de más de 50,000 habitantes) y pequeñas áreas urbanas (población entre 5,000 y 50,000 habitantes). Para los propósitos del diseño, debería usarse la población pronosticada para el año de diseño.

**Áreas Rurales:** son las áreas ubicadas fuera de los límites de las áreas urbanas (de menos de 5,000 habitantes).

#### 4.1.4.1 CATEGORÍAS FUNCIONALES

Las carreteras que forman los sistemas funcionales difieren para áreas urbanas y rurales. La jerarquía de los sistemas funcionales comprende las arterias principales (para movimientos mayores), arterias menores (distribuidoras), colectoras y caminos y calles locales. No obstante, en las zonas urbanas hay relativamente más arterias con más subdivisiones funcionales de la categoría arterial. En las zonas rurales hay relativamente más colectoras, con más subdivisiones funcionales de esa categoría.

Tabla 0:10: Sistema de Clasificación Funcional

<b>CLASIFICACIÓN FUNCIONAL</b>	<b>SERVICIOS QUE PROVEE</b>
<b>Arterial</b>	Provee el mayor nivel de servicio con las mayores velocidades permitidas en distancias de viaje ininterrumpido, con algún grado de control en los accesos.
<b>Colector</b>	Provee un menor nivel de servicio que la arterial. Se permiten velocidades menores en distancias cortas por servir de colector de tráfico de caminos locales y los conecta con las arteriales.

<b>Local</b>	Consiste en todas las carreteras no definidas como arteriales o colectoras; su servicio principal es proveer acceso a la mayoría de lugares y sirve a los viajes sobre distancias relativamente cortas
--------------	--

Fuente: el Manual Centroamericano de Normas para diseño Geométrico en carreteras con enfoque de Gestión de Riesgo y Seguridad Vial tercera edición 2011.

Tabla 0:11: Clasificación Funcional de las carreteras Regionales, Volúmenes de Transito, Numero de Carriles y Tipo de Superficie de Rodamiento.

TPDA	> 20,000		20,000 – 10,000		10,000-3,000		3,000 - 500	
	C	S	C	S	C	S	C	S
AR – Autopistas Regionales	6 – 8	Pav.	4 – 6	Pav.				
TS – Troncales Suburbanas	4	Pav.	2 - 4	Pav.	2	Pav.		
TR – Troncales Rurales	4	Pav.	2 – 4	Pav.	2	Pav.		
CS – Colectoras Suburbanas			2 - 4	Pav.	2	Pav.	2	Pav.
CR – Colectoras Rurales					2	Pav.	2	Pav.

TPDA = Tránsito promedio diario anual; C= Número de carriles; S= Superficie de rodadura;  
Pav. = pavimentadas

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para diseño Geométrico, Segunda edición 2004.

### AUTOPISTAS REGIONALES:

Se consideran las autopistas que deben diseñarse para volúmenes de transito mayores a 20,000 vehículos promedio diario. La demanda de este tipo de instalaciones de primera categoría en exigencia de la calidad y elevación del costo por kilómetro, se encuentran usualmente situada en un entorno suburbano, a la salida de las ciudades principales, o como soluciones para circunvalar con anillos perimetrales.



La superficie de rodamiento debe consistir en concreto hidráulico o asfáltico, con espesores y el control de calidad que el caso requiere.

#### **TRONCALES SUBURBANAS:**

Las carreteras dentro de esta clasificación están concebidas fundamentalmente para atender demandas de tránsito que, al término del periodo de diseño alcanzarán volúmenes comprendidos entre 10,000 y 20,000 vehículos promedio diario. Dan acceso directo a los generadores principales de tránsito y se interconectan con el sistema de autopistas y vías de circulación rápida.

#### **TRONCALES RURALES:**

Constituyen los ejes principales y de mayor significación en la estructura de la red regional centroamericana. Los volúmenes de tránsito que sirven y que, al año de diseño, podrían llegar hasta los 20,000 vehículos por día promedio.

#### **COLECTORAS SUBURBANAS:**

Este tipo de carreteras tiene una demanda de tránsito similar a las troncales rurales, ya que por el límite superior pueden alcanzar hasta 10,000 vehículos por día. Al mismo tiempo, estas carreteras están ligadas a los movimientos generados por las áreas urbanas.

#### **COLECTORAS RURALES:**

Este tipo de carreteras generalmente sirve al tránsito con recorridos de menores distancias relativas, que se mueve entre ciudades, pueblos, sirve asimismo como alimentador de arterias troncales y de las colectoras suburbanas. Sus volúmenes de tránsito para diseño se ubican entre los 10,000 y 500 vehículos por día.

De lo anterior dicho y como referencia del inventario vial proporcionada por la unidad de planificación de la obra pública (DPOP) la sección de estudio es la siguiente: CA01-E- SANTIAGO DE MARIA- PRIMARIA.

A continuación, se presentan los datos de inventario proporcionadas por la DPOP para las bandas de estudio.

### **DISEÑO GEOMETRICO.**

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

La geometría transversal de la vía define la magnitud de fuerza de rozamiento que le imprimen las llantas al rodado contrarrestando la fuerza centrífuga generada por la velocidad de operación del vehículo. De igual forma, el perfil longitudinal define las distancias de visibilidad y frenado, variables donde también se involucra el valor de la fuerza de rozamiento. Cuantas más rampas y pendientes, así como mayor densidad de grados de curvatura por kilómetro, la superficie de rodado se verá sometida a una mayor cantidad de fuerza de rozamiento que deteriora el pavimento a través del tiempo.

En vías urbanas estas variables no inciden de manera directa en el deterioro, dadas las condiciones de operación de las mismas, no obstante, en vías rurales, es necesario tener en cuenta la geometría horizontal y vertical del corredor como

factores que pueden influir en el proceso de deterioro del pavimento. Durante la presente Fase no fue posible incluir segmentos viales de la red vial rural de Bogotá dado que los recursos disponibles no fueron suficientes para tener en cuenta dentro de los estudios objeto del presente contrato este tipo de vías. Por lo anterior, se hace necesario que, en Fases posteriores, el Consultor encargado estudie y conceptúe sobre la incidencia de la geometría en la disminución de la condición de servicio del pavimento y escoja el porcentaje definido de segmentos de red vial rural (3%) necesario para realizar las mediciones de campo tendientes a definir los modelos de deterioro aplicables en los mismos.

Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	Tipo de Velocidad	Patron de Flujo	Zona Climatica	Categoria de Carretera	Tipo de Superficie	Tipo de Pavimento	Longitud de tramo (Km)	Ancho de Calzada (m)	Ancho de Hombros (m)	Numero de Carriles
CA01E - Santiago de Maria	104+770	105+020	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	105+020	105+270	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	105+270	105+520	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	105+520	105+770	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	105+770	106+020	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	106+020	106+270	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	106+270	106+520	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	106+520	106+770	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	106+770	107+020	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	107+020	107+270	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	107+270	107+520	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2

Tabla 0:1: Datos Generales de Banda de Estudio CA01E- Santiago de María Usulután

**Fuente:** Dirección de Planificación de la Obra Pública (DPOP)

Tabla 0:2: Continuación de datos Generales de Banda de Estudio CA01E- Santiago de María Usulután

Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	Tipo de Velocidad	Patron de Flujo	Zona Climatica	Categoria de Carretera	Tipo de Superficie	Tipo de Pavimento	Longitud de tramo (Km)	Ancho de Calzada (m)	Ancho de Hombros (m)	Numero de Carriles
CA01E - Santiago de Maria	107+520	107+770	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	107+770	108+020	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	108+020	108+270	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	108+270	108+520	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	108+520	108+770	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	108+770	109+020	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	109+020	109+270	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	109+270	109+520	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	109+520	109+770	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	109+770	110+020	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	110+020	110+270	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	110+270	110+520	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	110+520	110+770	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2

Fuente: Dirección de Planificación de la Obra Pública (DPOP)

Tabla 0:3 Continuación de datos Generales de Banda de Estudio CA01E- Santiago de María Usulután

Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	Subidad y Bajadas (Rise and Fall) m/km	Curva Horizontal Promedio (AHC) (°/km)	Altitud (°)	Longitud (°)
CA01E - Santiago de Maria	104+770	105+020	14.51	126.63	13.55784035	-88.43081665
CA01E - Santiago de Maria	105+020	105+270	14.51	126.63	13.55554008	-88.43123627
CA01E - Santiago de Maria	105+270	105+520	14.51	126.63	13.55337048	-88.43139648
CA01E - Santiago de Maria	105+520	105+770	14.51	126.63	13.55109978	-88.43126678
CA01E - Santiago de Maria	105+770	106+020	14.51	126.63	13.54895973	-88.43193054
CA01E - Santiago de Maria	106+020	106+270	14.51	126.63	13.54714966	-88.43340302
CA01E - Santiago de Maria	106+270	106+520	14.51	126.63	13.54535007	-88.43483734
CA01E - Santiago de Maria	106+520	106+770	14.51	126.63	13.54356956	-88.43630219
CA01E - Santiago de Maria	106+770	107+020	14.51	126.63	13.54162025	-88.43760681
CA01E - Santiago de Maria	107+020	107+270	14.51	126.63	13.53942013	-88.43804169
CA01E - Santiago de Maria	107+270	107+520	14.51	126.63	13.53717041	-88.43852997
CA01E - Santiago de Maria	107+520	107+770	14.51	126.63	13.53511047	-88.43952942
CA01E - Santiago de Maria	107+770	108+020	14.51	126.63	13.5334301	-88.44113159
CA01E - Santiago de Maria	108+020	108+270	14.51	126.63	13.53172016	-88.44271851
CA01E - Santiago de Maria	108+270	108+520	14.51	126.63	13.52985001	-88.44399261
CA01E - Santiago de Maria	108+520	108+770	14.51	126.63	13.52781963	-88.44496155
CA01E - Santiago de Maria	108+770	109+020	14.51	126.63	13.52647018	-88.44689178
CA01E - Santiago de Maria	109+020	109+270	14.51	126.63	13.52458954	-88.44811249
CA01E - Santiago de Maria	109+270	109+520	14.51	126.63	13.52233982	-88.44841003
CA01E - Santiago de Maria	109+520	109+770	14.51	126.63	13.52003956	-88.44817352

Fuente: Dirección de Planificación de la Obra Pública (DPOP)

Tabla 0:4: Datos Geométricos para banda de estudio.

Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	Subida y Bajadas (Rise and Fall) m/km	Curva Horizontal Promedio (AHC) (°/km)	Altitud (°)	Longitud (°)
CA01E - Santiago de Maria	109+770	110+020	14.51	126.63	13.51786041	-88.44859314
CA01E - Santiago de Maria	110+020	110+270	14.51	126.63	13.51578999	-88.44967651
CA01E - Santiago de Maria	110+270	110+520	14.51	126.63	13.51406956	-88.45098877
CA01E - Santiago de Maria	110+520	110+770	14.51	126.63	13.51301956	-88.45295715
CA01E - Santiago de Maria	110+770	111+020	14.51	126.63	13.51167965	-88.45478821
CA01E - Santiago de Maria	111+020	111+270	14.51	126.63	13.5096302	-88.45581818
CA01E - Santiago de Maria	111+270	111+520	14.51	126.63	13.50759983	-88.45585632
CA01E - Santiago de Maria	111+520	111+770	14.51	126.63	13.50874043	-88.45424652
CA01E - Santiago de Maria	111+770	112+020	14.51	126.63	13.50702	-88.45446777
CA01E - Santiago de Maria	112+020	112+270	14.51	126.63	13.50506973	-88.45570374
CA01E - Santiago de Maria	112+270	112+520	14.51	126.63	13.50286007	-88.45561981
CA01E - Santiago de Maria	112+520	112+770	14.51	126.63	13.50067997	-88.45520782
CA01E - Santiago de Maria	112+770	113+020	14.51	126.63	13.49895954	-88.45667267
CA01E - Santiago de Maria	113+020	113+270	14.51	126.63	13.49701977	-88.45786285
CA01E - Santiago de Maria	113+270	113+520	14.51	126.63	13.49536991	-88.45953369
CA01E - Santiago de Maria	113+520	113+770	14.51	126.63	13.4938097	-88.46116638
CA01E - Santiago de Maria	113+770	114+020	14.51	126.63	13.49178982	-88.46169281
CA01E - Santiago de Maria	114+020	114+270	14.51	126.63	13.48974991	-88.46231842
CA01E - Santiago de Maria	114+270	114+520	14.51	126.63	13.48775005	-88.46347809
CA01E - Santiago de Maria	114+520	114+770	14.51	126.63	13.48585033	-88.4646225
CA01E - Santiago de Maria	114+770	115+020	14.51	126.63	13.48392963	-88.46591187
CA01E - Santiago de Maria	115+020	115+270	14.51	126.63	13.48176003	-88.46666718

Fuente: Dirección de Planificación de la Obra Pública (DPOP)

Tabla 0:5: Continuación de datos Geométricos para banda de estudio.

Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	Tipo de Velocidad	Patron de Flujo	Zona Climatica	Categoria de Carretera	Tipo de Superficie	Tipo de Pavimento	Longitud de tramo (Km)	Ancho de Calzada (m)	Ancho de Hombros (m)	Numero de Carriles
CA01E - Santiago de Maria	110+770	111+020	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	111+020	111+270	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	111+270	111+520	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	111+520	111+770	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	111+770	112+020	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	112+020	112+270	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	112+270	112+520	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	112+520	112+770	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	112+770	113+020	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	113+020	113+270	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	113+270	113+520	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	113+520	113+770	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	113+770	114+020	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	114+020	114+270	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	114+270	114+520	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	114+520	114+770	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	114+770	115+020	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2
CA01E - Santiago de Maria	115+020	115+270	Carril Estandar	Flujo libre	El Salvador	Primaria	Flexible	AM-GB	0.25	3.20	1.50	2



## **FACTORES CLIMATOLÓGICOS.**

Los factores climáticos y de medio ambiente que mayor incidencia tienen en el deterioro de los pavimentos son la temperatura, la precipitación y las condiciones de invierno.

El HDM-4 incorpora al análisis los aspectos climatológicos mediante parámetros relacionados con la humedad y la temperatura, los cuales se establecen a partir de las Tablas 4.4.1 y 4.4.2

Para caracterizar las condiciones de humedad se utilizan variables que describen la precipitación y la humedad libre en la zona de estudio, mientras que las condiciones de temperatura se especifican con base en promedios anuales, rangos de variación mensual y número de días con temperaturas por arriba de un cierto límite.

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

➤ **Índice de humedad.**

Este parámetro está basado en el índice de Thornthwaite e indica que tan seco o húmedo es una zona climática determinada.

➤ **Duración de la estación seca.**

Este indicador divide al año en dos estaciones y se indica como fracción del mismo.

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

➤ **Rango promedio de temperaturas.**

Es el rango que comprende todas las temperaturas medias mensuales del año, o la diferencia entre la máxima y la mínima temperatura media mensual, de cada uno de los meses del año.

➤ **Días con temperaturas mayores a 32° C.**

Número de días en el año, en los cuales la temperatura ambiente excede los 32°C.

Tabla 0:1: Clasificación por humedad.

<b>CATEGORIA</b>	<b>PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (mm)</b>
<b>Árida</b>	<300
<b>Semiárida</b>	300 a 800
<b>Subhúmedo</b>	800 a 1600
<b>Húmedo</b>	1600 a 3000
<b>Muy húmedo</b>	>3000

Fuente: Análisis de sensibilidad de los modelos de deterioro del hdm-4 para pavimentos asfálticos, México, 2004.

Tabla 0:2: Clasificación por temperatura.

CATEGORIA	PROMEDIO ANUAL DE RANGOS DE TEMPERATURA (°C)
Tropical	20 a 35
Subtropical cálido	-5 a 45
Subtropical frío	-10 a 30
Templado frío	-20 a 25
Templado con congelamiento.	-40 a 20

Fuente: Análisis de sensibilidad de los modelos de deterioro del hdm-4 para pavimentos asfálticos, México, 2004

#### 4.1.5 INFORMACIÓN DE MEDIO AMBIENTE.

Uno de los principales factores que intervienen en la condición de un pavimento flexible es el factor medio ambiental, representadas por la temperatura, precipitaciones o lluvias, es así que en nuestro país existen las siguientes zonas climáticas, según MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador) estas dependen de la altura sobre el nivel del mar:

**Sabana tropical caliente o tierra caliente con elevaciones desde 0 a 800 metros;**

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

**Sabana tropical calurosa o tierra templada desde 800 a 1,200 metros**

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

**Tierras frias desde 1,200 a 2,700 metros**

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

**4.1.6 CONDICIONES DE TEMPERATURA.**

Producirá envejecimiento superficial de la capa de rodado.

Efecto de altas temperaturas:

- **Ablandamiento del asfalto (reduciendo el espesor).**
- **Reducción de la viscosidad del asfalto.**

**4.1.7 CONDICIONES DE LLUVIA.**

En general, tendremos las siguientes consecuencias:

- **Disgregación de la mezcla.**
- **Transporte de contaminantes en grietas.**
- **Reducción de la resistencia y estabilidad de la base, sub-base y sub-rasante.**
- **También afecta la resistencia al deslizamiento.**

A continuación, se presenta información de patrón climatológico para los tramos de estudio:

CARACTERISTICAS CLIMATOLOGICAS DE SANTIAGO DE MARIA USULUTAN	
CLIMA TROPICAL	
<b>Clasificación de humedad</b>	Húmedo
<b>Índice de Humedad</b>	85%
<b>Duración de la época Seca</b>	50%
<b>Precipitación media anual</b>	1922mm
<b>precipitación mínima (Enero-Febrero)</b>	1 mm/m
<b>precipitación Máxima (Septiembre)</b>	150 mm/m
<b>Temperatura promedio</b>	23°C
<b>Altitud (W)</b>	13.485
<b>Longitud (N)</b>	-88.47166667
<b>Elevación m.s.n.m</b>	920
<b>Zona Climática</b>	Sabana tropical Calurosa

Fuente: Boletín Informativo 2015, SNET.

## DRENAJE

El drenaje superficial debe ser muy efectivo para evacuar rápidamente las aguas de la superficie del pavimento y evitar que éstas se infiltren dentro de la estructura

del mismo, ocasionándole daños que pueden ser considerables y de efectos inmediatos o a corto plazo. También previenen que el lodo o suciedades de las áreas no pavimentadas de la carretera penetren los lados del carril exterior de circulación, causando problemas de visibilidad de la línea de demarcación del borde separador entre el pavimento y sus hombros. Los canales de drenaje se construyen a los lados de las carreteras para conducir el agua hacia el drenaje transversal de la carretera (alcantarillas, bóvedas, cajas y puentes); así como alejarlas de la carretera en concordancia con la topografía. El sistema de drenaje superficial está constituido por cunetas, contracunetas, cunetas centrales y alcantarilla en el caso de medianas, bordillos- cuneta y disipadores. También forman parte del sistema la evacuación de aguas subterráneas mediante sub-drenajes. Las cunetas y contracunetas son obras de drenaje que por su naturaleza quedan incluidas en la Sección Típica. En carreteras con mediana central, generalmente se usa un drenaje al centro, en un área deprimida de poca profundidad y con pendientes sumamente suaves, que evacúan las aguas hacia tragantes conectados a tubos instalados debajo de las calzadas, para alejar el agua fuera de la obra vial. Las pendientes así construidas, son muy útiles en caso de accidentes, evitando que éstos sean de mayores consecuencias. Los disipadores conducen el agua hacia niveles inferiores cuando la cuneta está localizada en sitios de pendientes fuertes. Son canales abiertos o cerrados que se pueden revestir con concreto, mampostería, o tubería metálica, tomando en cuenta la magnitud de la escorrentía superficial.

En HDM-4., este factor juega un papel importante ya que contribuye al cálculo del número estructural y a la predicción misma de los deterioros.

#### 4.1.8 TIPOS, CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DEL DRENAJE.

Según la metodología AASHTO 93, para el diseño de pavimentos flexibles proporciona un sistema para ajustar los coeficientes estructurales en forma tal que tomen en consideración de los niveles de drenaje sobre el comportamiento del futuro pavimento.

Tabla 0:1: Características de Drenaje para base y/o sub-base granular.

Características de drenaje del material de base y/o sub-base granular	
Nivel de Drenaje	Agua eliminada dentro de
Excelente	Dos (2) horas
Buena	Un (1) día
Regular	Una (1) semana
Pobre	Un (1) mes
Muy pobre	El agua no drena

Tabla 0:2: Coeficientes para capa base y sub-base

Fuente: AASHTO 93

Valores recomendados del Coeficiente de Ajuste (m) para los coeficientes estructurales de las capas de base y/o sub-bases no-tratadas				
Calidad de Drenaje de la Base o sub-base	<i>Porcentaje del tiempo durante el cual la estructura del pavimento está sometido a condiciones de humedad cercanas a saturación</i>			
	Menos del 1 %	Entre el 1 y 5 %	Entre el 5 y 25 %	Más del 25 %
Excelente	1,40 - 1,35	1,35 - 1,30	1,30 - 1,20	1,20
Buena	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,15 - 1,00	1,00
Regular	1,25 - 1,15	1,15 - 1,05	1,05 - 0,80	0,80
Pobre	1,15 - 1,05	1,05 - 0,80	0,80 - 0,60	0,60
Muy pobre	1,05 - 0,95	0,95 - 0,75	0,75 - 0,40	0,40

Fuente: AASHTO 93

El factor de drenaje (DF) representa la condición del drenaje; dentro del HDM-4, este factor se introduce mediante valores cualitativos (excelente, bueno, regular, etc.), en función de los cuales se selecciona un valor apropiado para DF. Este factor también depende del tipo de dren más común en el tramo analizado.

Tabla 0:3: Clasificación y Factor de Drenaje HDM-4.



TIPO DE DRENAJE	CONDICION DE DRENAJE				
	Excelente FD máx.	Bueno	Regular	Pobre	Muy pobre FD min
Alineado y Vinculado	1	0.75	0.5	0.25	3
Superficie Revestida	1	0.75	0.5	0.25	3
Forma de V - Fuerte	1	0.75	0.5	0.25	4
Forma de V - Suave	1.5	1.125	0.75	0.375	5
Poco Profundo - Fuerte	2	1.5	1	0.5	5
Poco Profundo - Suave	2	1.5	1	0.5	5
Sin Drenaje - Pero Requerido	3	2.25	1.5	0.75	5
sin Drenaje - No Requerido	1	0.75	0.5	0.25	1

Fuente: Guía de Calibración y Adaptación, Versión I; Volumen 5, Manual HDM-4.

#### 4.1.9 CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES DEL PAVIMENTO.

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

La menor o mayor capacidad de un pavimento para disipar los esfuerzos y deformaciones inducidos por las cargas de los vehículos influye directamente en el comportamiento del deterioro de la estructura, independientemente de las actividades de mantenimiento rutinario y periódico que puedan realizarse sobre la misma.

### DETERIOROS SUPERFICIALES EN PAVIMENTOS FLEXIBLES EN ESTUDIO.

De la información proporcionada por la Dirección de Planificación de la obra Pública (DPOP), del Ministerio de Obras Públicas (MOP) se obtiene el resultado del inventario de deterioros para el año 2015

Tabla 0:1: Condición del pavimento CA01E- SANTIAGO DE MARIA, para 2015.

INVENTARIO DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO 2015											
Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	IRI (mm/km)	% de area con huecos	% De area con baches	% de area de grietas	% de Area con Desprendimiento de agregados	% de area con piel de cocodrillo de severidad media	% de area con piel de cocodrillo de severidad alta	% de area con piel de cocodrillo de severidad muy alta	Ahuellamiento promedio (mm)
CA01E - Santiago de Maria	104+770	105+020	3600	10	0	60	0	0	0	0	2.30
CA01E - Santiago de Maria	105+020	105+270	5200	0	0	50	0	30	0	0	1.70
CA01E - Santiago de Maria	105+270	105+520	2000	0	0	30	0	40	0	0	2.90
CA01E - Santiago de Maria	105+520	105+770	2100	0	0	40	0	20	0	0	3.60
CA01E - Santiago de Maria	105+770	106+020	2000	0	0	60	0	30	0	0	3.50
CA01E - Santiago de Maria	106+020	106+270	2100	0	0	70	0	20	0	0	2.70
CA01E - Santiago de Maria	106+270	106+520	1900	0	0	30	0	30	0	0	3.20
CA01E - Santiago de Maria	106+520	106+770	2000	0	0	20	0	30	0	0	2.70
CA01E - Santiago de Maria	106+770	107+020	2300	0	0	50	0	20	0	0	3.30
CA01E - Santiago de Maria	107+020	107+270	2500	0	0	60	0	0	10	0	3.90
CA01E - Santiago de Maria	107+270	107+520	2300	0	0	60	0	10	0	0	3.30
CA01E - Santiago de Maria	107+520	107+770	1700	0	0	70	0	20	0	0	2.60
CA01E - Santiago de Maria	107+770	108+020	2100	0	40	15	0	15	0	0	3.00
CA01E - Santiago de Maria	108+020	108+270	2300	0	0	50	0	15	0	0	3.20
CA01E - Santiago de Maria	108+270	108+520	1800	0	20	40	0	20	0	0	2.00
CA01E - Santiago de Maria	108+520	108+770	2800	0	0	60	0	25	0	0	2.80
CA01E - Santiago de Maria	108+770	109+020	1900	0	0	70	0	30	0	0	1.70
CA01E - Santiago de Maria	109+020	109+270	1900	0	0	60	10	10	0	0	1.70
CA01E - Santiago de Maria	109+270	109+520	2300	0	0	30	20	0	0	0	2.40
CA01E - Santiago de Maria	109+520	109+770	2200	0	40	20	30	10	0	0	2.60

Tabla 0:2 Condición del pavimento CA01E- SANTIAGO DE MARIA, para 2015.

Fuente: Dirección de Planificación de la Obra Pública, MOP

INVENTARIO DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO 2015											
Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	IRI (mm/km)	% de area con huecos	% De area con baches	% de area de grietas	% de Area con Desprendimiento de agregados	% de area con piel de cocodrillo de severidad media	% de area con piel de cocodrillo de severidad alta	% de area con piel de cocodrillo de severidad muy alta	Ahuellamiento promedio (mm)
CA01E - Santiago de Maria	110+020	110+270	1700	0	10	40	40	0	0	0	1.70
CA01E - Santiago de Maria	110+270	110+520	2100	0	10	40	30	10	0	0	4.10
CA01E - Santiago de Maria	110+520	110+770	2700	0	10	30	30	10	0	0	3.80
CA01E - Santiago de Maria	110+770	111+020	2300	0	20	40	30	10	0	0	3.30
CA01E - Santiago de Maria	111+020	111+270	2400	0	20	20	20	15	0	0	3.10
CA01E - Santiago de Maria	111+270	111+520	2000	0	20	40	30	10	0	0	3.00
CA01E - Santiago de Maria	111+520	111+770	1800	0	40	10	10	0	0	0	2.30
CA01E - Santiago de Maria	111+770	112+020	2600	0	0	10	10	0	0	40	4.80
CA01E - Santiago de Maria	112+020	112+270	2700	0	10	10	10	15	0	0	5.40
CA01E - Santiago de Maria	112+270	112+520	2200	0	10	10	10	60	0	0	5.20
CA01E - Santiago de Maria	112+520	112+770	2600	0	10	10	50	10	0	0	4.10
CA01E - Santiago de Maria	112+770	113+020	3700	0	10	15	40	20	0	0	4.20
CA01E - Santiago de Maria	113+020	113+270	3200	0	20	25	10	0	0	0	5.10
CA01E - Santiago de Maria	113+270	113+520	3300	10	0	20	20	25	0	0	2.40
CA01E - Santiago de Maria	113+520	113+770	3500	0	0	10	10	0	0	0	3.20
CA01E - Santiago de Maria	113+770	114+020	2800	0	0	20	40	10	0	0	3.60
CA01E - Santiago de Maria	114+020	114+270	2300	0	0	10	40	10	0	0	2.80
CA01E - Santiago de Maria	114+270	114+520	2300	0	0	10	40	10	0	0	2.30
CA01E - Santiago de Maria	114+520	114+770	4000	0	0	10	40	20	0	0	4.80
CA01E - Santiago de Maria	114+770	115+020	4300	0	10	40	20	10	0	0	7.30
CA01E - Santiago de Maria	115+020	115+270	3800	0	0	20	20	20	0	0	6.60

Fuente: Dirección de Planificación de la Obra Pública, MOP

Tabla 0:3: Condición del pavimento CA01E- SANTIAGO DE MARIA, para 2007.

INVENTARIO DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO 2007											
Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	IRI (mm/km)	% de area con huecos	% De area con baches	% de area de grietas	% de Area con Desprendimiento de agregados	% de area con piel de cocodrillo de severidad media	% de area con piel de cocodrillo de severidad alta	% de area con piel de cocodrillo de severidad muy alta	Ahuellamiento promedio (mm)
CA01E - Santiago de Maria	104+770	105+020	2040	0	0	0	0	0	0	0	0.60
CA01E - Santiago de Maria	105+020	105+270	1590	0	0	0	0	0	0	0	0.10
CA01E - Santiago de Maria	105+270	105+520	1710	0	0	0	0	0	0	0	0.15
CA01E - Santiago de Maria	105+520	105+770	1685	0	0	0	0	0	0	0	0.45
CA01E - Santiago de Maria	105+770	106+020	1640	0	2	0	0	0	0	0	0.35
CA01E - Santiago de Maria	106+020	106+270	1365	0	0	0	0	0	0	0	0.15
CA01E - Santiago de Maria	106+270	106+520	1445	0	0	0	0	0	0	0	0.10
CA01E - Santiago de Maria	106+520	106+770	1680	0	0	0	0	0	0	0	0.65
CA01E - Santiago de Maria	106+770	107+020	1955	0	0	0	0	0	0	0	0.15
CA01E - Santiago de Maria	107+020	107+270	1365	0	0	0	0	0	0	0	0.10
CA01E - Santiago de Maria	107+270	107+520	1425	0	0	0	0	0	0	0	0.10
CA01E - Santiago de Maria	107+520	107+770	1795	0	0	0	0	0	0	0	0.10
CA01E - Santiago de Maria	107+770	108+020	1860	0	2	0	0	0	0	0	1.70
CA01E - Santiago de Maria	108+020	108+270	2135	0	0	0	0	0	0	0	1.60
CA01E - Santiago de Maria	108+270	108+520	1655	0	0	0	0	0	0	0	0.10
CA01E - Santiago de Maria	108+520	108+770	2140	0	0	0	0	0	0	0	0.50
CA01E - Santiago de Maria	108+770	109+020	2055	0	0	0	0	0	0	0	2.25
CA01E - Santiago de Maria	109+020	109+270	2215	0	0	0	0	0	0	0	2.20
CA01E - Santiago de Maria	109+270	109+520	1785	0	0	0	0	0	0	0	1.10
CA01E - Santiago de Maria	109+520	109+770	1705	0	0	0	0	0	0	0	1.35
CA01E - Santiago de Maria	109+770	110+020	1810	0	0	0	0	0	0	0	1.50

Fuente: Dirección de Planificación de la Obra Pública, MOP

Tabla 0:4: Condición del pavimento CA01E- SANTIAGO DE MARIA, para 2007.

INVENTARIO DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO 2007											
Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	IRI (mm/km)	% de area con huecos	% De area con baches	% de area de grietas	% de Area con Desprendimiento de agregados	% de area con piel de cocodrillo de severidad media	% de area con piel de cocodrillo de severidad alta	% de area con piel de cocodrillo de severidad muy alta	Ahuellamiento promedio (mm)
CA01E - Santiago de Maria	110+020	110+270	2045	0	0	0	0	0	0	0	2.75
CA01E - Santiago de Maria	110+270	110+520	2015	0	0	0	0	0	0	0	3.00
CA01E - Santiago de Maria	110+520	110+770	1950	0	0	0	0	0	0	0	1.80
CA01E - Santiago de Maria	110+770	111+020	1530	0	0	0	0	0	0	0	0.90
CA01E - Santiago de Maria	111+020	111+270	1765	0	0	0	0	0	0	0	1.15
CA01E - Santiago de Maria	111+270	111+520	1895	0	0	0	0	0	0	0	0.65
CA01E - Santiago de Maria	111+520	111+770	1940	0	0	0	0	0	0	0	1.75
CA01E - Santiago de Maria	111+770	112+020	1950	0	0	0	0	0	0	0	1.60
CA01E - Santiago de Maria	112+020	112+270	1900	0	0	0	0	0	0	0	0.95
CA01E - Santiago de Maria	112+270	112+520	1860	0	0	0	0	0	0	0	0.15
CA01E - Santiago de Maria	112+520	112+770	1885	0	0	0	0	0	0	0	1.40
CA01E - Santiago de Maria	112+770	113+020	1780	0	2	0	0	0	0	0	1.55
CA01E - Santiago de Maria	113+020	113+270	2275	0	0	0	0	0	0	0	1.80
CA01E - Santiago de Maria	113+270	113+520	2200	0	0	0	0	0	0	0	1.20
CA01E - Santiago de Maria	113+520	113+770	2605	0	0	0	0	0	0	0	2.05
CA01E - Santiago de Maria	113+770	114+020	3065	0	0	0	0	0	0	0	1.25
CA01E - Santiago de Maria	114+020	114+270	2705	0	0	0	0	0	0	0	2.15
CA01E - Santiago de Maria	114+270	114+520	3435	0	0	0	0	0	0	0	1.20
CA01E - Santiago de Maria	114+520	114+770	4335	0	0	0	0	0	0	0	2.05
CA01E - Santiago de Maria	114+770	115+020	4100	0	0	0	0	0	0	0	0.20
CA01E - Santiago de Maria	115+020	115+270	3505	0	0	0	0	0	0	0	0.60

Fuente: Dirección de Planificación de la Obra Pública, MOP

Tabla 0:5: Condición del pavimento CA01E- SANTIAGO DE MARIA, para 2002.

INVENTARIO DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO 2002											
Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	IRI (mm/km)	% de area con huecos	% De area con baches	% de area de grietas	% de Area con Desprendimiento de agregados	% de area con piel de cocodrillo de severidad media	% de area con piel de cocodrillo de severidad alta	% de area con piel de cocodrillo de severidad muy alta	Ahuellamiento promedio (mm)
CA01E - Santiago de Maria	104+770	105+020	8020	0	10	20	0	40	5	0	7.05
CA01E - Santiago de Maria	105+020	105+270	7340	0	20	10	0	40	10	0	4.90
CA01E - Santiago de Maria	105+270	105+520	7660	0	20	10	0	40	10	5	3.80
CA01E - Santiago de Maria	105+520	105+770	7450	0	30	10	0	40	5	0	6.25
CA01E - Santiago de Maria	105+770	106+020	7625	0	30	10	0	40	5	0	4.80
CA01E - Santiago de Maria	106+020	106+270	8205	5	20	8	30	30	4	3	3.85
CA01E - Santiago de Maria	106+270	106+520	9230	0	20	10	0	40	10	5	4.60
CA01E - Santiago de Maria	106+520	106+770	8145	0	30	10	0	40	5	5	6.60
CA01E - Santiago de Maria	106+770	107+020	8530	0	20	30	0	30	5	5	7.50
CA01E - Santiago de Maria	107+020	107+270	8405	0	10	40	0	40	5	0	5.85
CA01E - Santiago de Maria	107+270	107+520	7550	0	20	20	0	40	10	5	7.90
CA01E - Santiago de Maria	107+520	107+770	7645	0	10	35	5	30	10	5	4.70
CA01E - Santiago de Maria	107+770	108+020	6960	0	20	30	0	40	5	0	3.50
CA01E - Santiago de Maria	108+020	108+270	6680	0	20	30	0	40	5	0	5.80
CA01E - Santiago de Maria	108+270	108+520	7175	0	0	35	0	50	0	0	4.30
CA01E - Santiago de Maria	108+520	108+770	6615	0	5	40	0	30	0	0	3.60
CA01E - Santiago de Maria	108+770	109+020	7325	0	30	10	0	45	5	0	5.35
CA01E - Santiago de Maria	109+020	109+270	6175	0	20	10	0	50	10	5	5.85
CA01E - Santiago de Maria	109+270	109+520	6375	0	20	20	0	50	5	0	5.95
CA01E - Santiago de Maria	109+520	109+770	5650	0	0	40	0	50	5	0	4.95
CA01E - Santiago de Maria	109+770	110+020	7230	0	10	20	0	40	10	5	2.70

Tabla 0:6: Condición del pavimento CA01E- SANTIAGO DE MARIA, para 2002.

Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	IRI (mm/km)	% de area con huecos	% De area con baches	% de area de grietas	% de Area con Desprendimiento de agregados	% de area con piel de cocodrillo de severidad media	% de area con piel de cocodrillo de severidad alta	% de area con piel de cocodrillo de severidad muy alta	Ahuellamiento promedio (mm)
CA01E - Santiago de Maria	110+020	110+270	6625	0	0	30	0	40	0	0	5.30
CA01E - Santiago de Maria	110+270	110+520	6450	0	0	30	0	40	10	5	6.65
CA01E - Santiago de Maria	110+520	110+770	6670	1	0	30	0	40	10	10	9.40
CA01E - Santiago de Maria	110+770	111+020	5880	0	5	20	0	60	5	5	3.05
CA01E - Santiago de Maria	111+020	111+270	7225	0	0	10	0	80	5	0	4.30
CA01E - Santiago de Maria	111+270	111+520	5560	0	0	30	0	50	10	5	4.60
CA01E - Santiago de Maria	111+520	111+770	5125	0	5	20	0	60	10	0	4.20
CA01E - Santiago de Maria	111+770	112+020	6040	0	0	20	0	60	10	0	7.45
CA01E - Santiago de Maria	112+020	112+270	7015	0	0	30	0	60	5	0	4.75
CA01E - Santiago de Maria	112+270	112+520	9615	0	0	20	0	60	10	5	6.05
CA01E - Santiago de Maria	112+520	112+770	7170	0	20	20	0	50	10	0	4.85
CA01E - Santiago de Maria	112+770	113+020	4775	0	30	20	0	45	5	0	5.60
CA01E - Santiago de Maria	113+020	113+270	5630	0	5	20	0	50	10	5	2.90
CA01E - Santiago de Maria	113+270	113+520	5980	0	0	30	0	40	5	0	3.35
CA01E - Santiago de Maria	113+520	113+770	5550	0	0	10	0	30	5	5	5.45
CA01E - Santiago de Maria	113+770	114+020	8475	0	5	20	5	30	5	0	5.25
CA01E - Santiago de Maria	114+020	114+270	7254	0	0	20	0	60	5	0	5.75
CA01E - Santiago de Maria	114+270	114+520	6985	0	0	10	0	50	5	0	4.85
CA01E - Santiago de Maria	114+520	114+770	6542	5	20	10	5	40	5	0	4.15
CA01E - Santiago de Maria	114+770	115+020	6321	0	20	10	0	40	5	5	3.55
CA01E - Santiago de Maria	115+020	115+270	5875	0	20	20	0	40	5	0	4.75

Fuente: Dirección de Planificación de la Obra Pública, MOP

## TIPOS DE PAVIMENTOS CONSIDERADOS EN MODELO HDM-4

Los modelos de deterioro del HDM-4 permiten analizar el comportamiento de una amplia gama de pavimentos asfálticos. Para ello, se utilizan variantes de los modelos específicos en la estimación de cada tipo de daño, o se modifican los coeficientes de los mismos. El HDM-4 clasifica los pavimentos asfálticos en función del tipo de superficie y del tipo de base.

Tabla 0:1: Clasificación de los pavimentos asfálticos en el HDM-4.

Tipo de pavimento	Tipo de superficie	Tipo de Base	Descripción
AMGB	AM	GB	Mezcla asfáltica sobre base granular
AMAB		AB	Mezcla asfáltica sobre base asfáltica
AMSB		SB	Mezcla asfáltica sobre base estabilizada
AMAP		AP	Mezcla asfáltica sobre pavimento asfáltico
STGB	ST	GB	Tratamiento superficial sobre base granular
STAB		AB	Tratamiento superficial sobre base asfáltica
STSB		SB	Tratamiento superficial sobre base estabilizada
STAP		AP	Tratamiento superficial sobre pavimento asfáltico

Fuente: Guía de Calibración y Adaptación, Versión I; Volumen 5, Manual HDM-4



## HISTORIAL DE REPARACIONES DEL PAVIMENTO.

Dependiendo de su edad, el pavimento puede tener una mayor o menor capacidad de absorber las cargas y de disipar esfuerzos y deformaciones. Por lo tanto, la edad de la estructura se convierte en una característica intrínseca del deterioro, pero no en un variable que pueda diferenciar un deterioro de otro. Es decir, la utilidad de la edad del pavimento radica en el hecho de que a partir de su conocimiento se puede estimar el momento histórico en el cual se está realizando la gestión de pavimentos y definir su deterioro en ese momento a partir del modelo asignado a cada familia.

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

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

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

**AGE3:** Tiempo transcurrido en años desde la última sobrecarpeta, reconstrucción o construcción nueva.

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

## SOLICITACIONES DEL TRANSITO.

El factor asociado al tráfico que influye en el deterioro de un pavimento corresponde a la acumulación de ejes de diseño que transitan por el mismo, ya que, de acuerdo a algunos autores, aunque una estructura cuente con un mantenimiento rutinario adecuado, la curva de deterioro debe decrecer en función del tráfico acumulado de diseño que transite por la misma. Es importante anotar que en la medida que ejes acumulados reales en un instante del tiempo sean superiores a los ejes acumulados de diseño, la tasa de deterioro a la cual la curva decrece debe ser mayor y en caso contrario, si los ejes acumulados de diseño son mayores a los reales, el deterioro esperado en cualquier instante debe ser menor. Ante las consideraciones anteriores, es claro que el tráfico expresado en ejes acumulados si influye de manera directa en el deterioro de la estructura de pavimento.

HDM-4 utiliza los siguientes parámetros para representar el transito:

➤ **Transito Diario Promedio Anual (TPDA)**

En el caso de caminos con un carril por sentido, se calcula como el total del tránsito aforado en los dos sentidos del tramo en estudio, dividido entre los 365 días del año. En carreteras con más de un carril por sentido, suele calcularse el TDPA que corresponde a cada sentido.

➤ **Composición vehicular.**

Se expresa en términos de los porcentajes de participación de los diferentes tipos de vehículos que utilizan el camino, con respecto al TDPA.

➤ **Tasa de crecimiento.**

Normalmente, corresponde a un porcentaje de incremento anual del TDPA.

➤ **Número total de ejes.**

Es el número total de ejes que cruzan determinada sección del tramo en estudio durante un año. Se calcula con la expresión:

$$YAX = \sum_{k=1}^k \frac{Tk \text{ NUM\_AXLES}k}{ELANES * 10^6} \quad (Ec. 4.2)$$

**YAX:** Número total anual de ejes.

**K:** Numero de tipos de vehículos considerados.

**Tk:** Volumen anual de transito del vehículo tipo k.

**NUM\_AXLESk:** Numero de ejes por vehículos tipo k.

**ELANES:** Numero efectivo de carriles en la sección de la carretera.

➤ **Ejes equivalentes:**

En el HDM-4 se definen como el número total de aplicaciones de un eje sencillo dual estándar de 80 kN, que provocarían el mismo daño al camino, durante un año, que los ejes del vehículo considerado. Para su cálculo se utilizan factores

de carga de eje equivalente estándar (ESALF, por las siglas Equivalent Standard Axle Load Factor), los cuales se calculan con la expresión:

$$ESALF_k = \sum_{i=1}^{I_k} \frac{Pki}{100} \sum_{j=1}^{Jk} \left( \frac{AXL_{kij}}{SAXL_j} \right)^{LE} \quad (Ec. 4.3)$$

**ESALF<sub>k</sub>**: Factor de eje de carga equivalente estándar para el vehículo tipo k, en ejes equivalentes.

**I<sub>k</sub>**: Número de subgrupos i (definidos por rango de carga) para el vehículo tipo k. Nótese que i puede representar a cada vehículo individual.

**Pki** : Porcentaje de unidades en el subgrupo i del vehículo tipo k. Si i representa cada vehículo individual, entonces Pki = 100%

**LE**: exponente de equivalencia de carga. El valor por omisión utilizado es de 4.0

**Jk**: número de ejes sencillos para el vehículo tipo k.

**AXL<sub>kij</sub>**: Carga promedio en el eje j del rango de carga i en el vehículo tipo k

**SAXL<sub>j</sub>**: carga estándar del eje tipo j, por ejemplo, 6.6 t para eje sencillo con rueda sencilla, 8.16 t para eje sencillo con rueda doble, etc.

El total anual de ejes equivalentes, se calcula como:

**YE4**: Numero anual de ejes equivalentes (millones por carril).

$$YE4 = \sum_{k=1}^K \frac{T_k ESALF_k}{ELANES * 10^6} \quad (Ec. 4.4)$$

## **INFORMACIÓN DE TRANSITO PARA LOS TRAMOS DE ESTUDIO.**

Desde el inicio del diseño geométrico de una carretera el estudio del tránsito es un factor determinante, es decir tener conocimiento del tráfico al que va a estar sometido una carretera es de vital importancia para proyectarla, hay que tener conocimiento del número total de vehículos, su tipo, distribución en el tiempo y su factor de crecimiento anual; no solo para determinar la sección transversal más adecuada; sino también las pendientes longitudinales máxima admisible, su longitud, la calidad que debe poseer la estructura del pavimento; entre otros.

Para poder determinar el tráfico se realizan estudios especializados de origen y destino, conteos manuales y electrónicos de los vehículos que nos dan a conocer el tráfico total del año, el tráfico medio diario y el tráfico horario.

El tráfico total del año, es el número total de vehículos, de todos los tipos, que pasan por un punto determinado de la vía durante un año.

### **4.1.10 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSITO.**

Como objetivo principal para determinar la sollicitación de transito real en las vías de estudio, se importante conocer el volumen de tránsito y composición vehicular.

Para obtener dicha información es necesario realizar un censo de tránsito, es decir, medir los volúmenes y cargas que transitan por la zona de interés.

Dicha actividad posee las siguientes características:

- **Se realiza como mínimo cada dos años.**
- **En días laborales.**

De este censo se obtiene el Transito Promedio Anual conocido como T.P.D.A, que corresponde a la cantidad de vehículos que circulan en promedio cada día por la vía durante un año, es decir, 365 días. Finalmente se realiza un promedio aritmético por cada TPDA del año en estudio correspondiente.

A demás se consideran dos factores importantes como son la zona y el tipo de camino, basado en factores climáticos y actividad productiva prevaleciente y finalmente la clasificación vehicular.

#### **4.1.11 COMPOSICION VEHICULAR**

La composición vehicular para nuestro estudio, según información proporcionada por la Dirección de Planificación de la Obra Pública (DPOP) para las vías en estudio son las siguientes:

Tabla 0:1: Composición Vehicular, CA01E-SANTIAGO DE MARIA, 2015

COMPOSICION VEHICULAR													
DEPARTAMENTO DE USULUTAN	AÑO EN ESTUDIO	L I V I A N O S		P E S A D O S									TPDA
LISTADO DE LA RED VIAL PAVIMENTADA	2015	PASAJ.	CARGA	PASAJEROS		C A R G A							
CODIGO	TRAMO	AUTO	PICK-UP	M. BUS	BUS	C2	C3	T2-S1	T2-S2	T2-S3	T3-S2	T3-S3	
CA01E	CA01E - Santiago de María	960	1230	247	137	212	10	0	0	0	0	1	2797
		34.3%	44.0%	8.8%	4.9%	7.6%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%

Tabla 0:2 Composición Vehicular, CA01E-SANTIAGO DE MARIA, 2007

COMPOSICION VEHICULAR													
DEPARTAMENTO DE USULUTAN	AÑO EN ESTUDIO	L I V I A N O S		P E S A D O S									TPDA
LISTADO DE LA RED VIAL PAVIMENTADA	2007	PASAJ.	CARGA	PASAJEROS		C A R G A							
CODIGO	TRAMO	AUTO	PICK-UP	M. BUS	BUS	C2	C3	T2-S1	T2-S2	T2-S3	T3-S2	T3-S3	
CA01E	CA01E - Santiago de María	380	1102	298	97	345	10	0	0	0	0	0	2234
		17.0%	49.4%	13.4%	4.4%	15.5%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%

Fuente: Dirección de Planificación de la Obra Pública, MOP

Tabla 0:3 Composición Vehicular, CA01E-SANTIAGO DE MARIA, 2002

COMPOSICION VEHICULAR													
DEPARTAMENTO DE USULUTAN	AÑO EN ESTUDIO	L I V I A N O S		P E S A D O S									TPDA
LISTADO DE LA RED VIAL PAVIMENTADA	2002	PASAJ.	CARGA	PASAJEROS		C A R G A							
CODIGO	TRAMO	AUTO	PICK-UP	M. BUS	BUS	C2	C3	T2-S1	T2-S2	T2-S3	T3-S2	T3-S3	
CA01E	CA01E - Santiago de Maria	277	765	161	161	267	7	0	0	0	2	0	1638
		9.9%	27.3%	5.7%	5.7%	9.5%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	58.6%

Fuente: Dirección de Planificación de la Obra Pública, MOP



#### 4.1.12 TASA DE CRECIMIENTO VEHICULAR

La tasa de crecimiento vehicular es de suma importante para determinar cuál será el comportamiento del tránsito a futuro y a qué cantidad de cargas estará sometido el pavimento a lo largo del periodo de análisis.

La Dirección de Planificación de la obra Pública, nos ha proporcionado un valor de tasa de crecimiento vehicular que ellos utilizan en sus estudios y diseños. Debido a que no se cuenta con información suficiente para establecer una tasa de crecimiento real entre algunos años de estudio. Se utilizará el valor proporcionado por DPOP, cuyo valor es **3.5 %** a nivel de toda la red.

#### 4.1.13 FACTOR CAMION (LEF'S)

Con ayuda del MANUAL CENTROAMERICANO DE DISEÑO DE PAVIMENTOS, en el Capítulo 3, se estableció la Composición de la Flota de Vehículos que circula sobre la red vial analizada, se calculó el efecto destructivo de cada tipo de vehículo, conocido como "Factor de Camión" (LEF's), sobre el pavimento.

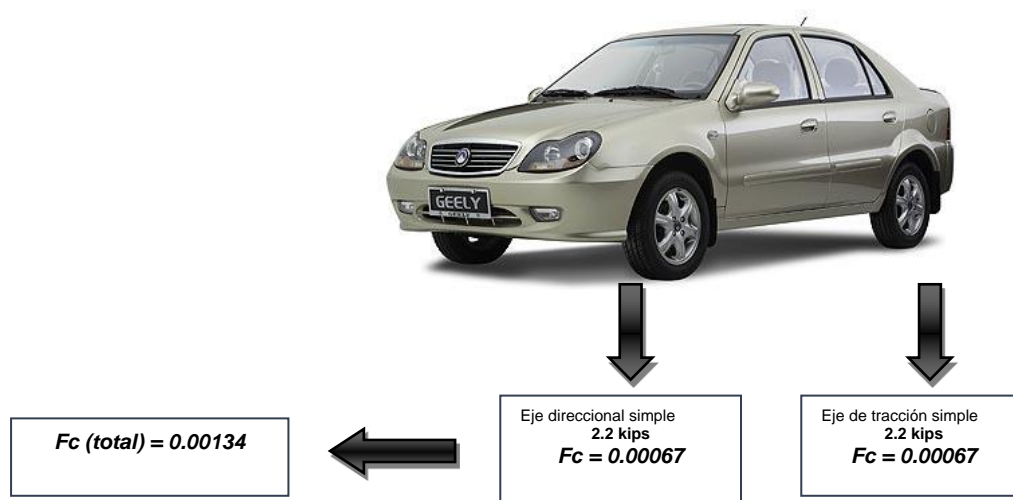
Considerando valores de serviciabilidad final  $P_t \geq 2.0$  y serviciabilidad inicial de  $u$   $P_t = 2.5$ , Número Estructural del Pavimento de 3.00. Y la siguiente configuración vehicular:

Tabla 0:4: Configuración vehicular, SIECA 2000

CONFIGURACIÓN VEHICULAR						
Acuerdo Centroamericano sobre Circulación por Carreteras, SIECA, 2000. COMITRAN XXIII.						
Tipo de Vehículo	Tipo de Eje del Tractor			Tipo de Eje del Semiremolque		Total (Tn/Kip)
	Direccional (Tn/Kip)	Tracción		Remolque		
		Simple (Tn/Kip)	Doble (Tn/Kip)	Doble (Tn/Kip)	Triple (Tn/Kip)	
Autos*	1.0/2.2	1.0/2.2				2.0/4.4
Pick-Ups*	1.0/2.2	2.5/5.5				
Microbuses*	2.5/5.5	5.0/11.0				
Buses*	5.0/11.0	9.0/19.8				
C2	5.0/11.0	10.0/22.0				15.0/33.0
C3	5.0/11.0		16.5/36.3			21.6/47.3
T2-S2	5.0/11.0	9.0/19.8		16.0/35.2		30.0/66.0
T3-S2	5.0/11.0		16.0/35.2	16.0/35.2		37.0/81.4
T3-S3	5.0/11.0		16.0/35.2		20.0/44.0	41.0/90.2

Fuente: Pesos obtenidos del Estudio de Factibilidad Técnica - Económica y Diseño Geométrico Final del Anillo Periférico del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) (DELCAN).

### EJEMPLO DE CALCULO DE FACTOR CAMION EN SEDAN



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:5: Factor camión por cada tipo de vehículo en estudio

FACTOR CAMION POR VEHICULO						
VEHICULO	ESQUEMA	EJE	TIPO DE EJE	PESO POR EJE (Ton,kips)	LEFS	FACTOR CAMION
AUTO		Direccion	Simple	1.00 /2.20	0.00067	0.00134
		Traccion	Simple	1.00 /2.20	0.00067	
PICK-UP		Direccion	Simple	1.00 /2.20	0.00067	0.01442
		Traccion	Simple	2.5 /5.5	0.01375	
M. BUS PEQUEÑO		Direccion	Simple	2.5 /5.5	0.01375	0.18725
		Traccion	Simple	5.5 /11.0	0.17350	
BUS		Direccion	Simple	5.00/11.0	0.17350	1.61450
		Traccion	Simple	9.0/19.8	1.44100	
C2		Direccion	Simple	5.00/11.00	0.17350	2.34350
		Traccion	Simple	10.00/22.00	2.17000	
C3		Direccion	Simple	5.00/11.00	0.17350	1.60000
		Traccion	Tandem	16.50/36.30	1.42650	
T2S2		Direccion	Simple	5.00/11.00	0.17350	2.88650
		Traccion	Simple	9.0/19.8	1.44100	
		Remolque	Doble	16.00/35.2	1.27200	
T3S2		Direccion	Simple	5.00/11.00	0.17350	2.71750
		Traccion	Doble	16.00/35.2	1.27200	
		Remolque	Doble	16.00/35.2	1.27200	
T3S3		Direccion	Simple	5.00/11.00	0.17350	2.22650
		Traccion	doble	16.00/35.2	1.27200	
		Remolque	Tridem	22.00/44.0	0.78100	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:6: ESAL'S DE DISEÑO, 2015.

TIPO DE VEHICULO	TPD 2015	FACTO DE CRECIMIENTO	TRANSITO DE DISEÑO	ESAL'S FACTOR CAMION	ESAL'S DE DISEÑO
AUTO	960	28.41	9,954,864	0.00134	13,340
PICK-UP	1230	28.41	12,754,670	0.01442	183,922
MICROBUSES	247	28.41	2,561,304	0.18725	479,604
BUS	137	28.41	1,420,642	1.6145	2,293,627
C2	212	28.41	2,198,366	2.3435	5,151,870
C3	10	28.41	103,697	1.6	165,914
T2-S1	0	28.41	0		0
T2-S2	0	28.41	0	2.8865	0
T2-S3	0	28.41	0		0
T3-S2	0	28.41	0	2.7175	0
T3-S3	1	28.41	10,370	2.7175	28,180
TOTALES	2797				<b>8,316,457</b>
ESAL'S POR CARRIL DE TRANSITO 2015				<b>3,742,406</b>	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:7: Factor de Distribución por dirección

Número de carriles en ambas direcciones	LD <sup>10</sup>
2	50
4	45
6 o más	40

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO 1993

Tabla 0:8: Factor de Distribución por carril.

Número de carriles en una sola dirección	LC <sup>11</sup>
1	1.00
2	0.80 – 1.00
3	0.60 – 0.80
4	0.50 – 0.75

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO 1993

#### 4.1.14 ESPECIFICACIONES TECNICAS Y OPERACIONALES PARA VEHICULOS EN ESTUDIO.

Tabla 0:9: Especificaciones técnicas y operacionales para vehículos en estudio.

Características / Tipo de Vehículo	Vehiculos Livianos				Vehiculos Pesados		
	AUTO	PICK-UP	M. BUS PEQUEÑO	M. BUS MEDIANO	AUTO BUS	C-2	C-3
Espacio Equivalente en vehículo de	1	1	1.2	1.3	1.5	1.4	1.4
Número de Ruedas	4	4	4	6	6	6	10
Número de Ejes	2	2	2	2	2	2	2
Tipo de Neumático	Radial	Convencional	Convencional	Convencional	Convencional	Convencional	Convencional
Número de Reencauches	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Costo de Reencauche	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
Kilómetros Anuales	23,000	30,000	30,000	70,000	70,000	40,000	40,000
Horas Trabajo	550	1300	750	1750	1750	1200	1200
Vida Media (años)	10	8	8	7	7	7	7
Uso Privado	60%	30%	5%	0%	0%	0%	0%
Pasajeros	2	0	12	20	50	0	0
Viajes de Trabajo	40%	70%	90%	95%	95%	95%	95%
ESAL's	0.0013	0.0280	0.0301	1.0148	3.1789	2.3463	1.5563
Peso en Marcha	2 Ton	3 Ton	3 Ton	6 Ton	10 Ton	15 Ton	22 Ton.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.15 RETROCALCULO PARA DETERMINACION DE NUMERO ESTRUCTURAL (SN)

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

La capacidad estructural del pavimento también puede definirse en el programa a través de valores de deflexión medidos con Viga Benkelman o con deflectómetro de impacto. El HDM-4 utiliza la siguiente expresión para calcular el valor del número estructural a través de la medición de la deflexión.

- **NUMERO ESTRUCTURAL**

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

$$SNP_S = 3.2 (DEF_S)^{-0.63} + dSNPK \quad (\text{Ec. 4.5}) \quad \text{para bases no estabilizadas}$$

$$SNP_S = 2.2 (DEF_S)^{-0.63} + dSNPK \quad (\text{Ec. 4.6}) \quad \text{para bases estabilizadas}$$

$SNP_S$ : número estructural ajustado en la estación seca.

$DEF_S$ : deflexión de la viga Benkelman bajo una carga de **80 kN**, con una presión

de llanta de 520 kPa, y una temperatura promedio del asfalto de 30°C

para la estación seca

$dSNPK$ : Ajuste de reducción del número estructural debido al agrietamiento.

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

- **CORRECCIÓN POR DETERIORO SUPERFICIAL**

$$dSNPK = 0.0000758 ((MIN 63; ACX_a)HSNEW + MAX((MIN(ACX_a - PACX; 40), 0)HSOLD)) \text{ (Ec. 4.7)}$$

**Donde:**

*HSNEW: Espesor de la carpeta mas reciente (mm)*

*HSOLD: Espesor de la carpeta mas reciente (mm)*

*ACX<sub>a</sub>: Area de grietas al inicio del año de analisis  
(% de la supercie total de la calzada)*

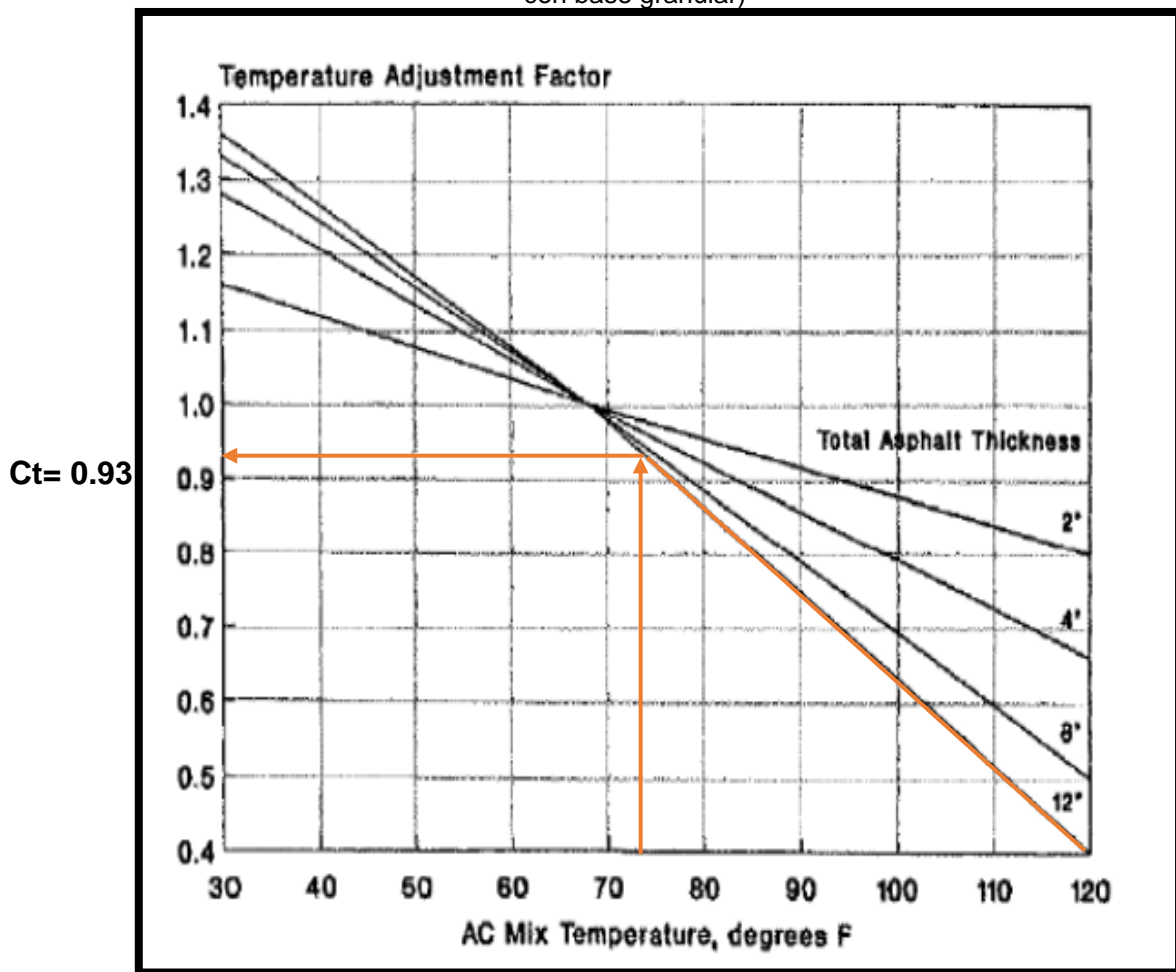
*PACX: Area de grietas antiguas del año de analisis  
(% de la supercie total de la calzada)*

- **CORRECCIÓN POR TEMPERATURA.**

La corrección por temperatura se realiza con el fin de ajustar los valores de deflexión obtenidas en la medición en campo a la temperatura teórica de ensayo. Utilizando el grafico de ajuste por deflexión de temperatura que proporciona la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimento de AASHTO, para las condiciones de temperatura de Pavimento como referencia la temperatura promedio de la zona Santiago de María, Usulután 23°C (73.4 °F).

Fue así que se obtuvo el valor de corrección por temperatura **Ct=0.93**, el cual ha sido aplicado a los diferentes valores de temperatura como lo muestra las tablas 4.10.10 a 4.10.20.

Tabla 0:10: Grafica para cálculo de coeficiente de ajuste por temperatura (Pavimento flexible con base granular)



Fuente: Guía de diseño de estructuras de pavimento AASHTO, 1993



Tabla 0:11: Evaluación Estructural para CA01E- SANTIAGO DE MARIA, 2015

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL 2015											
Tramo	Tramo Inicio km	Tramo Fin km	Carga(kg)	Defl0 (mm)	Defl0 (mm) corregida por temperatura	Defl 30 (mm) 12	Defl 60 (mm) 24	Defl 90 (mm) 36	Defl 150 (mm) 60	Defl 180 (mm) 72	SN cal
CA01E - Santiago de Maria	104+770	105+020	37.90	0.808	0.751	0.592	0.441	0.300	0.206	0.119	3.83
CA01E - Santiago de Maria	105+020	105+270	37.50	0.772	0.718	0.522	0.383	0.236	0.152	0.073	3.94
CA01E - Santiago de Maria	105+270	105+520	37.60	0.882	0.820	0.644	0.464	0.276	0.174	0.068	3.63
CA01E - Santiago de Maria	105+520	105+770	37.70	0.731	0.680	0.563	0.447	0.303	0.200	0.092	4.08
CA01E - Santiago de Maria	105+770	106+020	37.30	0.575	0.535	0.438	0.347	0.240	0.166	0.071	4.75
CA01E - Santiago de Maria	106+020	106+270	36.70	1.192	1.109	0.978	0.823	0.629	0.478	0.274	3.00
CA01E - Santiago de Maria	106+270	106+520	37.40	0.853	0.793	0.742	0.640	0.491	0.263	0.164	3.70
CA01E - Santiago de Maria	106+520	106+770	38.10	0.592	0.551	0.455	0.366	0.264	0.195	0.115	4.66
CA01E - Santiago de Maria	106+770	107+020	37.70	0.916	0.852	0.706	0.588	0.444	0.338	0.205	3.54
CA01E - Santiago de Maria	107+020	107+270	37.60	0.600	0.558	0.431	0.342	0.243	0.180	0.105	4.62
CA01E - Santiago de Maria	107+270	107+520	37.70	0.783	0.728	0.619	0.504	0.362	0.263	0.149	3.91
CA01E - Santiago de Maria	107+520	107+770	37.80	0.596	0.554	0.485	0.420	0.332	0.261	0.163	4.64
CA01E - Santiago de Maria	107+770	108+020	36.80	1.340	1.246	1.039	0.762	0.472	0.303	0.128	2.79
CA01E - Santiago de Maria	108+020	108+270	36.90	0.766	0.712	0.596	0.491	0.361	0.267	0.148	3.96
CA01E - Santiago de Maria	108+270	108+520	37.30	0.690	0.642	0.535	0.433	0.301	0.208	0.106	4.23
CA01E - Santiago de Maria	108+520	108+770	37.20	0.832	0.774	0.650	0.525	0.372	0.268	0.137	3.76
CA01E - Santiago de Maria	108+770	109+020	37.60	0.775	0.721	0.611	0.499	0.359	0.255	0.133	3.93
CA01E - Santiago de Maria	109+020	109+270	36.70	0.923	0.858	0.765	0.665	0.533	0.422	0.256	3.52
CA01E - Santiago de Maria	109+270	109+520	37.20	0.652	0.606	0.543	0.471	0.375	0.290	0.163	4.39
CA01E - Santiago de Maria	109+520	109+770	37.20	0.931	0.866	0.784	0.575	0.422	0.312	0.189	3.50
CA01E - Santiago de Maria	109+770	110+020	37.30	0.400	0.372	0.293	0.240	0.178	0.138	0.088	5.97

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:12: Evaluación Estructural para CA01E- SANTIAGO DE MARIA, 2015

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL 2015											
Tramo	Tramo Inicio km	Tramo Fin km	Carga(kg)	Defl0 (mm)	Defl0 (mm) corregida por temperatura	Defl 30 (mm) 12	Defl 60 (mm) 24	Defl 90 (mm) 36	Defl 150 (mm) 60	Defl 180 (mm) 72	SN cal
CA01E - Santiago de Maria	110+020	110+270	37.00	0.517	0.481	0.389	0.313	0.226	0.173	0.117	5.08
CA01E - Santiago de Maria	110+270	110+520	37.20	0.759	0.706	0.548	0.428	0.300	0.224	0.144	3.99
CA01E - Santiago de Maria	110+520	110+770	37.30	0.750	0.698	0.552	0.411	0.244	0.163	0.074	4.02
CA01E - Santiago de Maria	110+770	111+020	37.60	0.469	0.436	0.321	0.240	0.154	0.106	0.064	5.40
CA01E - Santiago de Maria	111+020	111+270	37.40	0.759	0.706	0.679	0.603	0.504	0.411	0.272	3.99
CA01E - Santiago de Maria	111+270	111+520	37.50	1.008	0.937	0.779	0.618	0.422	0.288	0.140	3.33
CA01E - Santiago de Maria	111+520	111+770	37.60	0.684	0.636	0.533	0.434	0.313	0.230	0.132	4.26
CA01E - Santiago de Maria	111+770	112+020	37.80	0.676	0.629	0.573	0.506	0.413	0.324	0.200	4.29
CA01E - Santiago de Maria	112+020	112+270	37.10	1.216	1.131	0.894	0.697	0.470	0.325	0.168	2.96
CA01E - Santiago de Maria	112+270	112+520	37.40	0.824	0.766	0.678	0.582	0.465	0.367	0.222	3.78
CA01E - Santiago de Maria	112+520	112+770	37.70	0.700	0.651	0.582	0.479	0.354	0.248	0.119	4.19
CA01E - Santiago de Maria	112+770	113+020	37.70	0.532	0.495	0.378	0.291	0.197	0.147	0.091	4.99
CA01E - Santiago de Maria	113+020	113+270	36.90	1.256	1.168	0.989	0.772	0.542	0.376	0.174	2.90
CA01E - Santiago de Maria	113+270	113+520	37.30	0.544	0.506	0.401	0.308	0.200	0.125	0.048	4.92
CA01E - Santiago de Maria	113+520	113+770	37.50	0.557	0.518	0.422	0.344	0.264	0.209	0.136	4.84
CA01E - Santiago de Maria	113+770	114+020	37.60	0.465	0.432	0.395	0.347	0.279	0.231	0.160	5.43
CA01E - Santiago de Maria	114+020	114+270	37.20	0.611	0.568	0.514	0.450	0.366	0.294	0.195	4.57
CA01E - Santiago de Maria	114+270	114+520	37.10	0.799	0.743	0.547	0.395	0.213	0.101	0.011	3.86
CA01E - Santiago de Maria	114+520	114+770	36.70	0.900	0.837	0.715	0.576	0.439	0.356	0.245	3.58
CA01E - Santiago de Maria	114+770	115+020	37.00	0.954	0.887	0.807	0.708	0.580	0.465	0.291	3.45
CA01E - Santiago de Maria	115+020	115+270	37.00	0.942	0.876	0.772	0.644	0.473	0.348	0.203	3.48

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:13: Evaluación Estructural para CA01E- SANTIAGO DE MARIA, 2007

INVENTARIO DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO 2007											
Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	Carga(kg)	Defl0 (mm)	Defl0 (mm) corregida por temperatura	Defl 30 (mm) 12	Defl 60 (mm) 24	Defl 90 (mm) 36	Defl 150 (mm) 60	Defl 180 (mm) 72	SN cal
CA01E - Santiago de Maria	104+770	105+020	40.65	0.663	0.617	0.276	0.095	0.056	0.039	0.030	4.34
CA01E - Santiago de Maria	105+020	105+270	40.51	0.482	0.448	0.282	0.125	0.075	0.043	0.030	5.31
CA01E - Santiago de Maria	105+270	105+520	40.65	0.401	0.373	0.237	0.117	0.083	0.056	0.039	5.96
CA01E - Santiago de Maria	105+520	105+770	39.41	0.485	0.451	0.219	0.076	0.041	0.022	0.015	5.28
CA01E - Santiago de Maria	105+770	106+020	40.87	0.409	0.380	0.212	0.111	0.078	0.052	0.037	5.88
CA01E - Santiago de Maria	106+020	106+270	41.76	0.174	0.162	0.094	0.054	0.043	0.028	0.020	10.08
CA01E - Santiago de Maria	106+270	106+520	40.8	0.408	0.379	0.196	0.091	0.063	0.040	0.028	5.89
CA01E - Santiago de Maria	106+520	106+770	41.07	0.436	0.405	0.230	0.098	0.060	0.038	0.025	5.65
CA01E - Santiago de Maria	106+770	107+020	40.65	0.519	0.483	0.250	0.093	0.049	0.029	0.020	5.06
CA01E - Santiago de Maria	107+020	107+270	40.51	0.718	0.668	0.382	0.169	0.106	0.060	0.038	4.13
CA01E - Santiago de Maria	107+270	107+520	41	0.573	0.533	0.308	0.133	0.086	0.050	0.034	4.76
CA01E - Santiago de Maria	107+520	107+770	40.51	0.666	0.619	0.367	0.153	0.089	0.054	0.037	4.33
CA01E - Santiago de Maria	107+770	108+020	41.34	0.415	0.386	0.160	0.044	0.024	0.011	0.006	5.83
CA01E - Santiago de Maria	108+020	108+270	40.31	0.331	0.308	0.164	0.070	0.033	0.016	0.010	6.72
CA01E - Santiago de Maria	108+270	108+520	41.14	0.517	0.481	0.206	0.069	0.050	0.043	0.030	5.08
CA01E - Santiago de Maria	108+520	108+770	40.24	0.508	0.472	0.245	0.095	0.056	0.029	0.018	5.13
CA01E - Santiago de Maria	108+770	109+020	40.24	0.770	0.716	0.410	0.152	0.084	0.044	0.026	3.95
CA01E - Santiago de Maria	109+020	109+270	39.97	0.572	0.532	0.316	0.142	0.095	0.058	0.039	4.76
CA01E - Santiago de Maria	109+270	109+520	41.34	0.602	0.560	0.356	0.158	0.096	0.051	0.034	4.61
CA01E - Santiago de Maria	109+520	109+770	41.62	0.504	0.469	0.262	0.107	0.057	0.028	0.019	5.16
CA01E - Santiago de Maria	109+770	110+020	37.77	0.871	0.810	0.502	0.243	0.164	0.097	0.063	3.65

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:14: Evaluación Estructural para CA01E- SANTIAGO DE MARIA, 2007

INVENTARIO DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO 2007											
Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	Carga(kg)	Defl0 (mm)	Defl0 (mm) corregida por temperatura	Defl 30 (mm) 12	Defl 60 (mm) 24	Defl 90 (mm) 36	Defl 150 (mm) 60	Defl 180 (mm) 72	SN cal
CA01E - Santiago de Maria	110+020	110+270	40.65	0.609	0.566	0.335	0.154	0.098	0.060	0.038	4.58
CA01E - Santiago de Maria	110+270	110+520	40.87	0.593	0.551	0.352	0.165	0.100	0.049	0.031	4.66
CA01E - Santiago de Maria	110+520	110+770	40.8	0.813	0.756	0.457	0.188	0.104	0.060	0.039	3.82
CA01E - Santiago de Maria	110+770	111+020	41.07	0.474	0.441	0.219	0.095	0.056	0.028	0.018	5.36
CA01E - Santiago de Maria	111+020	111+270	40.04	0.688	0.640	0.391	0.159	0.090	0.049	0.033	4.24
CA01E - Santiago de Maria	111+270	111+520	40.24	0.784	0.729	0.491	0.236	0.147	0.082	0.058	3.90
CA01E - Santiago de Maria	111+520	111+770	39.14	1.395	1.297	0.829	0.348	0.193	0.110	0.073	2.72
CA01E - Santiago de Maria	111+770	112+020	40.24	0.935	0.870	0.511	0.188	0.087	0.043	0.030	3.49
CA01E - Santiago de Maria	112+020	112+270	40.45	0.878	0.817	0.503	0.210	0.125	0.077	0.053	3.64
CA01E - Santiago de Maria	112+270	112+520	40.93	0.901	0.838	0.474	0.187	0.106	0.063	0.041	3.58
CA01E - Santiago de Maria	112+520	112+770	40.38	0.742	0.690	0.405	0.152	0.084	0.047	0.033	4.04
CA01E - Santiago de Maria	112+770	113+020	40.65	0.762	0.709	0.414	0.172	0.099	0.055	0.038	3.98
CA01E - Santiago de Maria	113+020	113+270	41.62	0.494	0.459	0.248	0.101	0.065	0.040	0.026	5.22
CA01E - Santiago de Maria	113+270	113+520	40.51	0.539	0.501	0.270	0.091	0.047	0.027	0.018	4.94
CA01E - Santiago de Maria	113+520	113+770	39.41	0.655	0.609	0.324	0.109	0.056	0.040	0.027	4.37
CA01E - Santiago de Maria	113+770	114+020	40.51	0.963	0.896	0.556	0.219	0.118	0.060	0.039	3.43
CA01E - Santiago de Maria	114+020	114+270	39.83	0.585	0.544	0.270	0.090	0.037	0.016	0.010	4.70
CA01E - Santiago de Maria	114+270	114+520	39.83	1.325	1.232	0.741	0.310	0.171	0.087	0.058	2.81
CA01E - Santiago de Maria	114+520	114+770	40.93	0.649	0.604	0.336	0.149	0.090	0.045	0.027	4.40
CA01E - Santiago de Maria	114+770	115+020	39.83	0.991	0.922	0.543	0.233	0.141	0.082	0.055	3.37
CA01E - Santiago de Maria	115+020	115+270	40.17	0.726	0.675	0.382	0.151	0.092	0.056	0.040	4.10

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:15: Evaluación Estructural para CA01E- SANTIAGO DE MARIA, 2002

INVENTARIO DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO 2002											
Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	Carga(kg)	Defl0 (mm)	Defl0 (mm) corregida por temperatura	Defl 30 (mm) 12	Defl 60 (mm) 24	Defl 90 (mm) 36	Defl 150 (mm) 60	Defl 180 (mm) 72	SN cal
CA01E - Santiago de Maria	104+770	105+020	53.87	1.300	1.209	0.815	0.378	0.200	0.100	0.081	2.84
CA01E - Santiago de Maria	105+020	105+270	50.81	2.487	2.313	1.616	0.704	0.309	0.161	0.152	1.89
CA01E - Santiago de Maria	105+270	105+520	52.93	1.756	1.633	0.984	0.385	0.178	0.112	0.092	2.35
CA01E - Santiago de Maria	105+520	105+770	52.6	1.610	1.497	0.985	0.420	0.228	0.123	0.101	2.48
CA01E - Santiago de Maria	105+770	106+020	52.77	1.237	1.150	0.732	0.291	0.162	0.090	0.078	2.93
CA01E - Santiago de Maria	106+020	106+270	53.21	1.045	0.972	0.574	0.287	0.196	0.095	0.077	3.26
CA01E - Santiago de Maria	106+270	106+520	51.87	1.816	1.689	1.153	0.515	0.232	0.134	0.108	2.30
CA01E - Santiago de Maria	106+520	106+770	53.45	1.444	1.343	0.788	0.333	0.164	0.097	0.082	2.66
CA01E - Santiago de Maria	106+770	107+020	51.87	1.755	1.632	0.995	0.415	0.233	0.120	0.096	2.35
CA01E - Santiago de Maria	107+020	107+270	51.19	1.935	1.800	1.114	0.467	0.220	0.129	0.102	2.21
CA01E - Santiago de Maria	107+270	107+520	52.06	1.613	1.500	0.992	0.427	0.224	0.114	0.096	2.48
CA01E - Santiago de Maria	107+520	107+770	50.62	2.497	2.322	1.529	0.638	0.305	0.162	0.128	1.88
CA01E - Santiago de Maria	107+770	108+020	53.28	1.180	1.097	0.678	0.331	0.187	0.088	0.073	3.02
CA01E - Santiago de Maria	108+020	108+270	53.4	1.063	0.989	0.633	0.306	0.161	0.075	0.061	3.22
CA01E - Santiago de Maria	108+270	108+520	53.03	1.140	1.060	0.757	0.361	0.195	0.090	0.071	3.08
CA01E - Santiago de Maria	108+520	108+770	50.22	2.310	2.148	1.217	0.595	0.358	0.201	0.160	1.98
CA01E - Santiago de Maria	108+770	109+020	51.54	2.092	1.946	1.040	0.397	0.185	0.090	0.076	2.10
CA01E - Santiago de Maria	109+020	109+270	50.74	2.297	2.136	1.417	0.638	0.328	0.153	0.119	1.98
CA01E - Santiago de Maria	109+270	109+520	50.5	2.281	2.121	1.520	0.644	0.316	0.166	0.146	1.99
CA01E - Santiago de Maria	109+520	109+770	48.48	2.884	2.682	1.834	0.760	0.337	0.172	0.135	1.72
CA01E - Santiago de Maria	109+770	110+020	51.23	2.258	2.100	1.421	0.662	0.350	0.200	0.168	2.01

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:16: Evaluación Estructural para CA01E- SANTIAGO DE MARIA, 2002

INVENTARIO DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO 2002											
Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	Carga(kg)	Defl0 (mm)	Defl0 (mm) corregida por temperatura	Defl 30 (mm) 12	Defl 60 (mm) 24	Defl 90 (mm) 36	Defl 150 (mm) 60	Defl 180 (mm) 72	SN cal
CA01E - Santiago de Maria	110+020	110+270	51.61	2.083	1.937	1.083	0.414	0.229	0.134	0.112	2.11
CA01E - Santiago de Maria	110+270	110+520	51.94	1.456	1.354	0.826	0.319	0.185	0.115	0.093	2.64
CA01E - Santiago de Maria	110+520	110+770	49.82	2.802	2.606	1.463	0.515	0.239	0.137	0.115	1.75
CA01E - Santiago de Maria	110+770	111+020	50.76	2.184	2.031	1.270	0.560	0.282	0.137	0.121	2.05
CA01E - Santiago de Maria	111+020	111+270	51.38	2.005	1.865	1.315	0.586	0.333	0.185	0.156	2.16
CA01E - Santiago de Maria	111+270	111+520	47.68	3.056	2.842	1.992	0.954	0.503	0.237	0.176	1.66
CA01E - Santiago de Maria	111+520	111+770	51.89	1.333	1.240	0.762	0.300	0.165	0.093	0.081	2.79
CA01E - Santiago de Maria	111+770	112+020	52.72	1.632	1.518	0.969	0.374	0.209	0.137	0.119	2.46
CA01E - Santiago de Maria	112+020	112+270	53.4	0.884	0.822	0.511	0.269	0.177	0.105	0.087	3.62
CA01E - Santiago de Maria	112+270	112+520	52.41	1.318	1.226	0.840	0.325	0.143	0.068	0.050	2.81
CA01E - Santiago de Maria	112+520	112+770	51.26	1.889	1.757	1.023	0.529	0.315	0.150	0.120	2.24
CA01E - Santiago de Maria	112+770	113+020	51.61	1.928	1.793	1.100	0.434	0.201	0.134	0.103	2.22
CA01E - Santiago de Maria	113+020	113+270	50.65	2.042	1.899	1.409	0.706	0.391	0.166	0.129	2.14
CA01E - Santiago de Maria	113+270	113+520	53.43	0.894	0.831	0.425	0.158	0.091	0.065	0.057	3.59
CA01E - Santiago de Maria	113+520	113+770	53.28	1.000	0.930	0.540	0.199	0.086	0.029	0.024	3.35
CA01E - Santiago de Maria	113+770	114+020	52.18	1.457	1.355	0.746	0.223	0.093	0.024	0.020	2.64
CA01E - Santiago de Maria	114+020	114+270	48.08	3.107	2.890	2.182	0.899	0.431	0.272	0.225	1.64
CA01E - Santiago de Maria	114+270	114+520	52.04	1.543	1.435	1.040	0.520	0.294	0.157	0.126	2.55
CA01E - Santiago de Maria	114+520	114+770	46.97	3.422	3.182	2.493	1.048	0.409	0.076	0.051	1.54
CA01E - Santiago de Maria	114+770	115+020	44.54	2.889	2.687	2.887	1.179	0.612	0.335	0.277	1.72
CA01E - Santiago de Maria	115+020	115+270	52.93	1.041	0.968	0.553	0.243	0.135	0.050	0.034	3.27

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:17: Resumen de Evolución Estructural.

Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	SN 2002	SN 2007	SN2015
CA01E - Santiago de Maria	104+770	105+020	2.84	4.34	3.83
CA01E - Santiago de Maria	105+020	105+270	1.89	5.31	3.94
CA01E - Santiago de Maria	105+270	105+520	2.35	5.96	3.63
CA01E - Santiago de Maria	105+520	105+770	2.48	5.28	4.08
CA01E - Santiago de Maria	105+770	106+020	2.93	5.88	4.75
CA01E - Santiago de Maria	106+020	106+270	3.26	10.08	3.00
CA01E - Santiago de Maria	106+270	106+520	2.30	5.89	3.70
CA01E - Santiago de Maria	106+520	106+770	2.66	5.65	4.66
CA01E - Santiago de Maria	106+770	107+020	2.35	5.06	3.54
CA01E - Santiago de Maria	107+020	107+270	2.21	4.13	4.62
CA01E - Santiago de Maria	107+270	107+520	2.48	4.76	3.91
CA01E - Santiago de Maria	107+520	107+770	1.88	4.33	4.64
CA01E - Santiago de Maria	107+770	108+020	3.02	5.83	2.79
CA01E - Santiago de Maria	108+020	108+270	3.22	6.72	3.96
CA01E - Santiago de Maria	108+270	108+520	3.08	5.08	4.23
CA01E - Santiago de Maria	108+520	108+770	1.98	5.13	3.76
CA01E - Santiago de Maria	108+770	109+020	2.10	3.95	3.93
CA01E - Santiago de Maria	109+020	109+270	1.98	4.76	3.52
CA01E - Santiago de Maria	109+270	109+520	1.99	4.61	4.39
CA01E - Santiago de Maria	109+520	109+770	1.72	5.16	3.50
CA01E - Santiago de Maria	109+770	110+020	2.01	3.65	5.97

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:18: Resumen de Evolución Estructural.

Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	SN 2002	SN 2007	SN2015
CA01E - Santiago de Maria	110+020	110+270	2.11	4.58	5.08
CA01E - Santiago de Maria	110+270	110+520	2.64	4.66	3.99
CA01E - Santiago de Maria	110+520	110+770	1.75	3.82	4.02
CA01E - Santiago de Maria	110+770	111+020	2.05	5.36	5.40
CA01E - Santiago de Maria	111+020	111+270	2.16	4.24	3.99
CA01E - Santiago de Maria	111+270	111+520	1.66	3.90	3.33
CA01E - Santiago de Maria	111+520	111+770	2.79	2.72	4.26
CA01E - Santiago de Maria	111+770	112+020	2.46	3.49	4.29
CA01E - Santiago de Maria	112+020	112+270	3.62	3.64	2.96
CA01E - Santiago de Maria	112+270	112+520	2.81	3.58	3.78
CA01E - Santiago de Maria	112+520	112+770	2.24	4.04	4.19
CA01E - Santiago de Maria	112+770	113+020	2.22	3.98	4.99
CA01E - Santiago de Maria	113+020	113+270	2.14	5.22	2.90
CA01E - Santiago de Maria	113+270	113+520	3.59	4.94	4.92
CA01E - Santiago de Maria	113+520	113+770	3.35	4.37	4.84
CA01E - Santiago de Maria	113+770	114+020	2.64	3.43	5.43
CA01E - Santiago de Maria	114+020	114+270	1.64	4.70	4.57
CA01E - Santiago de Maria	114+270	114+520	2.55	2.81	3.86
CA01E - Santiago de Maria	114+520	114+770	1.54	4.40	3.58
CA01E - Santiago de Maria	114+770	115+020	1.72	3.37	3.45
CA01E - Santiago de Maria	115+020	115+270	3.27	4.10	3.48

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 0:19: Información de las características de conforman los datos de estudio.

Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	Tipo de Material	Espesor Reciente 2015	Espesor 2007	Espesor 2002 (tratamiento Superficial)	ESPEJOR DE BASE GRANULAR	CBR SUBRASANTE	Primer año de Estudio	Ultimo año de Estudio	Rehabilitacion	Sellado	Tratamiento
CA01E - Santiago de Maria	104+770	105+020	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	105+020	105+270	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	105+270	105+520	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	105+520	105+770	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	105+770	106+020	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	106+020	106+270	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	106+270	106+520	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	106+520	106+770	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	106+770	107+020	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	107+020	107+270	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	107+270	107+520	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	107+520	107+770	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	107+770	108+020	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	108+020	108+270	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	108+270	108+520	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	108+520	108+770	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	108+770	109+020	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	109+020	109+270	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	109+270	109+520	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	109+520	109+770	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	109+770	110+020	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:20: Información de las características de conforman los datos de estudio.

Tramo	Tramo Inicio	Tramo Fin	Tipo de Material	Espesor Reciente 2015	Espesor 2007	Espesor 2002 (tratamiento Superficial)	ESPEJOR DE BASE GRANULAR	CBR SUBRASANTE	Primer año de Estudio	Ultimo año de Estudio	Rehabilitacion	Sellado	Tratamiento
CA01E - Santiago de Maria	110+020	110+270	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	110+270	110+520	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	110+520	110+770	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	110+770	111+020	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	111+020	111+270	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	111+270	111+520	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	111+520	111+770	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	111+770	112+020	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	112+020	112+270	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	112+270	112+520	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	112+520	112+770	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	112+770	113+020	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	113+020	113+270	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	113+270	113+520	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	113+520	113+770	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	113+770	114+020	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	114+020	114+270	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	114+270	114+520	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	114+520	114+770	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	114+770	115+020	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007
CA01E - Santiago de Maria	115+020	115+270	Concreto Asfaltico	8 cm	7.5 cm	3 cm	20 cm	12%	2002	2015	2007	2007	2007

Fuente: Elaboración propia.



**CAPITULO V: PROPUESTA DE CALIBRACIÓN DEL  
MODELO DE DETERIORO: AHUELLAMIENTO**

---

## DEFINICION DE CALIBRACIÓN.

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

Puesto que el modelo simula los cambios futuros del sistema de carreteras a partir de las condiciones actuales, la confiabilidad de los resultados depende de dos consideraciones primarias:

- La fiabilidad de la representación de las condiciones actuales y los factores que las influyen en los datos provistos del modelo, y
- La veracidad de las predicciones de los comportamientos y las interacciones entre los diferentes factores de la variedad de condiciones del modelo.

La aplicación del modelo conlleva algunos importantes pasos:

- Entrada de datos, es decir, una correcta interpretación de los requisitos de la entrada de datos y alcanzar una calidad de los mismos que sea apropiada a la fiabilidad deseada de los resultados.
- Calibración de los datos de salida: ajustando los parámetros del modelo para que los pronósticos y los datos de salida, representen fielmente, los

cambios y las influencias a lo largo del tiempo y bajo diferentes intervenciones.

- Efectos de los usuarios de la carretera (RUE) – incluye los costes de circulación del vehículo (VOC), el tiempo del trayecto, la seguridad y las emisiones, y
- Deterioro de la carretera y efectos de los trabajos (RDWE) – incluye los deterioros del pavimento y el impacto de las actividades de conservación sobre la condición del pavimento y la tasa futura de deterioro del pavimento.

#### **5.1.1 OBJETIVO DEL MODELO**

El objetivo de la calibración es general modelos de deterioro con el fin de predecir su comportamiento estructural y funcional a lo largo de su vida útil, los cuales pueden ser utilizados posteriormente para la implementación de un sistema de administración o gestión de pavimentos. Es decir, obtener modelos de predicción ajustados, que ofrezcan estimaciones más realistas y confiables de los deterioros y que permitan establecer planes de conservación que tiendan a optimizar los recursos disponibles y minimizar el costo total de operación del camino (costo total = costo de operación vehicular + costo de conservación + costo exógeno).

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

### 5.1.2 LIMITANTES DE UN MODELO.

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

Algunas causas que originan divergencias son:

- **Condiciones diferentes a las originales del modelo: si el modelo se aplica fuera de su espacio de inferencia original.**
- **Modelo Inadecuado: si el modelo no contiene algunas variables que son claramente importantes, ya sea porque no resultaron estadísticamente significativas con los datos originales o porque un proceso de análisis poco profundo o incompleto no las tuvo en cuenta, esto puede ocasionar una mala predicción.**
- **Aleatoriedad del comportamiento de los materiales y las estructuras: siempre existe un cierto margen de error introducido por un comportamiento aleatorio o estocástico de los materiales que**

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

- **Errores en los datos observados: debido a inadecuadas técnicas de medición, mal registro de los datos ó toma datos que no correspondan.**
- **Errores en los datos estimados: en aquellos datos sobre los cuales no se disponga toda la información necesaria y deben ser estimados, el error en la estimación muy probablemente ocasiona error en la predicción.**

### **5.1.3 ASPECTOS IMPORTANTES EN UNA CALIBRACION.**

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

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

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

### **ADECUACIÓN DE LOS DATOS AL MODELO.**

La adecuación de datos representa la información particular que describe la existencia del caso analizado y los insumos específicos para el modelo que son requeridos por el usuario. Los ejemplos incluyen el volumen de tráfico y su composición, la geometría vial, tipo de pavimento y condición, los costos unitarios, etc.

Estos datos son, por lo tanto, fundamentalmente diferente de los parámetros internos y los coeficientes del modelo de simulación que requieren de calibración, un error en un dato significa que el modelo es analizado en un caso diferente del que se pretende, al igual que entrar en un destino equivocado en una instrucción. Por ejemplo, la exactitud de los datos de entrada puede tener repercusiones importantes en el calendario de futuras intervenciones, a veces más importantes que la tasa de deterioro. Esto se debe a que el HDM utiliza modelos incrementales y la condición existente es el punto de inicio para la elaboración de modelos.

Así como la información puede ser imprecisa o muy precisa, el modelo HDM puede funcionar, ya sea con información muy simple o una información mucho



más detallada. Sin embargo, por la naturaleza de los modelos de simulación y el software, los parámetros de entrada del modelo son fijos y explícitos.

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

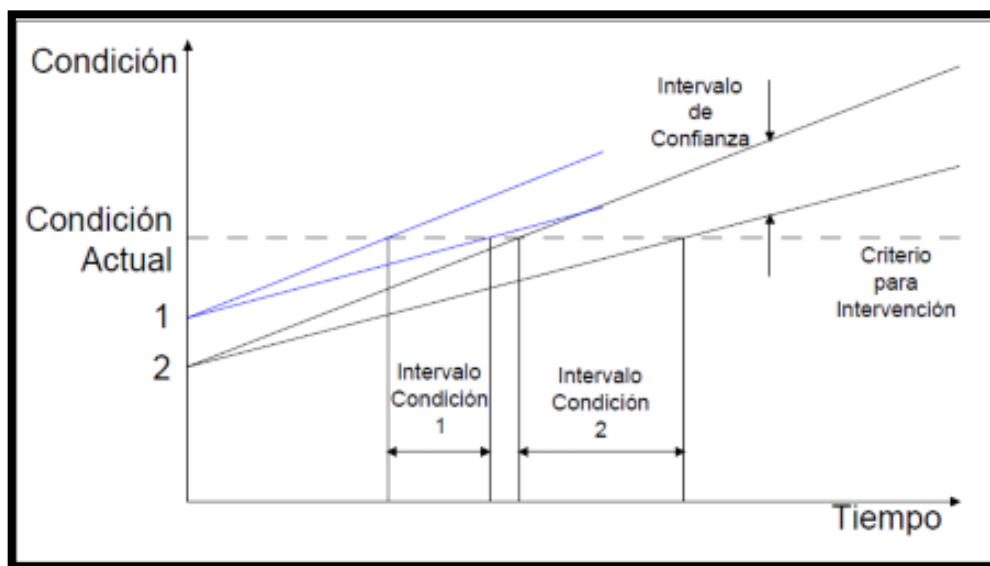


Figura: 0.1: Efecto de la condición existente y después de alguna intervención.

Fuente: Calibración de Modelos de HDM-4, Departamento de Gestión Vial, Chile.

## CALIBRACIÓN A NIVEL DE PROYECTO

### 5.1.4 METODOLOGÍA DE TRAMOS TESTIGOS

Esta metodología consiste en registrar la evolución de los diferentes deterioros en un conjunto de tramos testigo de pavimento a lo largo de un lapso determinado de tiempo, y con estos datos ajustar los modelos de deterioro para cada tramo testigo por separado, obteniendo factores de calibración para cada tipo de pavimento. Esta metodología es la que brinda mayor precisión en la predicción a futuro, pero su confiabilidad depende fuertemente del periodo de medición abarcado; es necesario recabar datos por un lapso prolongado si se desea una predicción confiable.

Según una investigación realizada por la Universidad Pontificia Universidad Católica de Chile <sup>15</sup>para realizar una medición de deterioros y modelación del comportamiento es necesario recolectar información de deterioros para diferentes tramos, cuya finalidad principal es realizar diversos análisis estadísticos que permitan establecer la confiabilidad y aceptación de la información.

---

<sup>15</sup>Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 17 N°2, año 2002, Chile.

Según la institución antes mencionada es importante considera los siguientes pasos para realiza una modelación:

- Determinación, para cada categoría, de un tramo tipo definido por los diferentes valores medios por kilómetro de los datos de inspección visual, auscultación continua, tránsito y clima. En el caso de las variables y datos de entrada más sensibles, el valor medio fue calculado en función de la longitud del tramo.
- Alimentación de los modelos con los parámetros de entrada y valores medios de las variables que caracterizan a los tramos tipo.
- Eliminación y rechazo de datos anómalos de medición de deterioro, que de acuerdo a la experiencia aparecían notoriamente desviados del comportamiento normal (por ejemplo, valores muy altos de deterioro a edades tempranas o deterioros muy bajos a edades avanzadas).
- Modelación preliminar del ahuellamiento considerando valores estimados para la ahuellamiento inicial (RDO), de modo que a partir de un proceso iterativo se revisaba y corregía este valor hasta encontrar un adecuado ajuste del modelo.

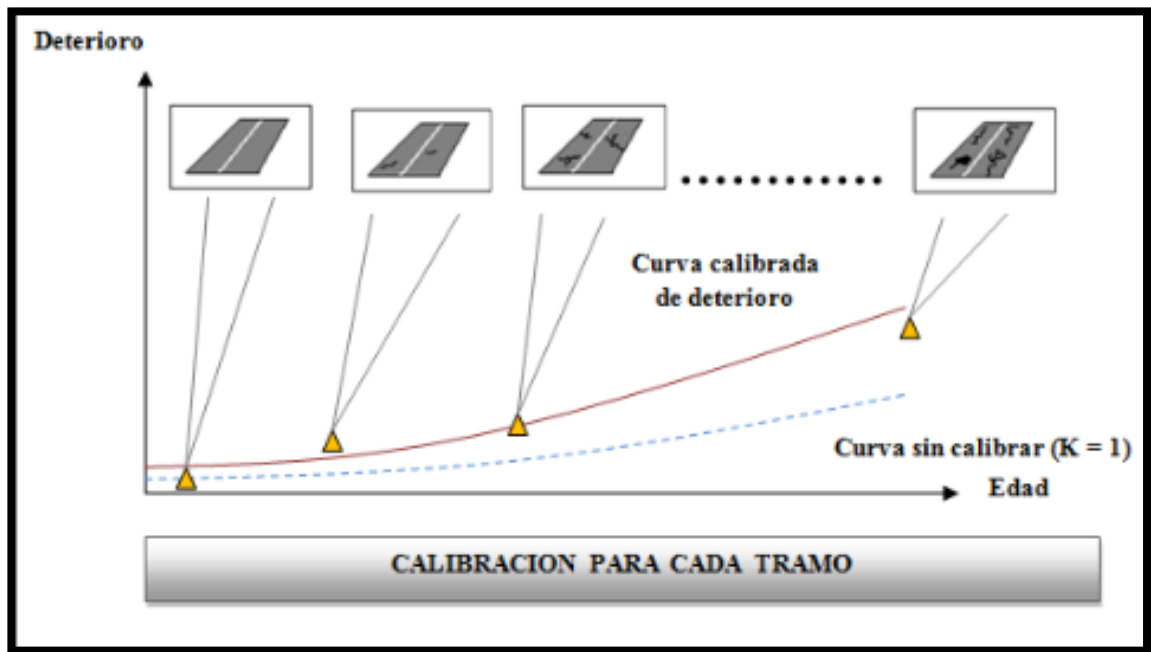


Figura: 0.1: Calibración de modelos de deterioro en tramos testigos.

Fuente: Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 17 N°2, año 2002, Chile.

### 5.1.5 CALIBRACIÓN ESTADÍSTICA DEL MODELO.

A partir de los resultados alcanzados con las modelaciones, se lograron predicciones de comportamiento que luego se compararon contra los datos medidos en los tramos testigo, permitiendo de esta manera evaluar el grado de similitud de estas predicciones con la realidad. El procedimiento propuesto para la calibración estadística de los modelos de comportamiento de pavimentos asfálticos se basa principalmente en la determinación de factores que permitan lograr un mejor ajuste de las curvas de deterioro simulado a los datos de comportamiento real, mediante la minimización de los cuadrados de las

diferencias de los datos estimados y los observados (SSD, Sum of Squared Differences)<sup>16</sup>.

A continuación, se presenta una curva típica del modelo de comportamiento y sobre ella se encuentran localizados los datos observados y la curva obtenida a partir de las predicciones del modelo; el mejor ajuste consiste en minimizar las diferencias de modo que se logre la representación más fiel y real del comportamiento en el tiempo.

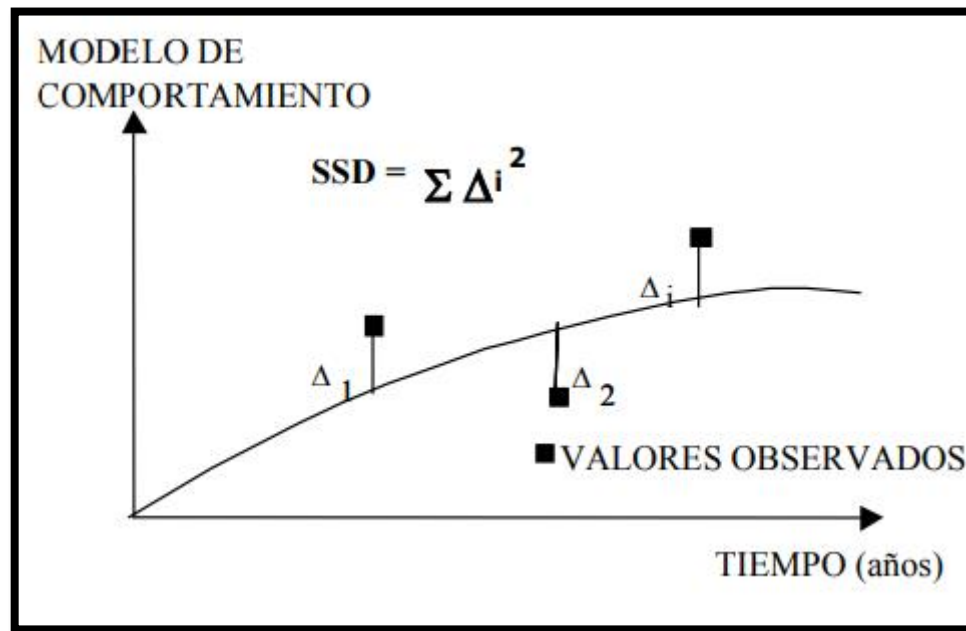


Figura: 0.2: Minimización de cuadrados de la diferencia entre valores estimados y medidos.

Fuente: Videla et al., 1992

---

<sup>16</sup> Videla et al., 1992

$$\text{Así: } SSD = \Delta^2 = \sum (Y_{\text{observado tramo } i} - Y_{\text{estimado tramo } i})^2 \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde:

SSD = Suma de los cuadrados de las diferencias entre datos observados y datos predichos

$Y_{\text{observado tramo } i}$  = Valores observados en tramo  $i$

$Y_{\text{estimado tramo } i}$  = Valores estimados en tramo  $i$

El minimizar el valor de SSD conlleva una reducción del error medio de estimación ( $S_{yx}$ ) que permite encontrar el factor de calibración  $K_i$  que asegura el mejor ajuste de la curva de deterioro y por ende la calibración del modelo de comportamiento analizado.

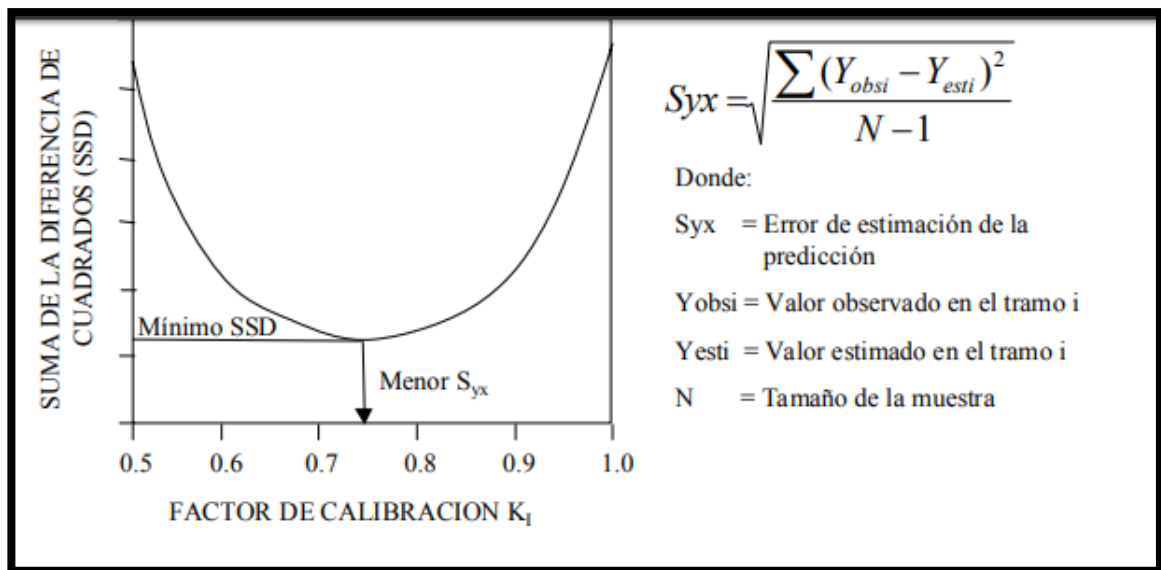


Figura: 0.3: Suma de diferencia de los cuadrados de las diferencias de los datos predichos y medidos contra el valor de los factores de Calibración  $K_i$

## METODOLOGIA DE CALIBRACIÓN DEL MODELO DE AHUELLAMIENTO EN HDM-4

Para la aplicación de la metodología de tramos, después de la recopilación de información de los diferentes inventarios que contienen deterioros y capacidad estructural, entre otros parámetros cuyo tiempo comprende desde el año 2002, 2007 y 2015, cubriendo un periodo de 13 años. Estos datos fueron proporcionados por la Dirección de Planificación de la obra Pública (DPOP), para la carretera CA01E-SANTIAGO DE MARÍA, departamento de Usulután.

La selección de tramos testigo se basó en la metodología empleada para la selección de tramos en investigaciones anteriores. La banda de estudio se divide en 42 tramos con una longitud de 250.00 m. Dichos tramos guardan una similitud muy grande en cuanto, a sus características generales, tránsito, clima, etc. Ya que se ubican dentro de la misma carretera.

El concepto de familia o categoría consiste en un conjunto de tramos que tienen características homogéneas en cuanto a tránsito, capacidad estructural y clima. Es por ello que en esta investigación se dividió en 2 familias en cuanto a la capacidad estructural.

Tabla 0:1: Agrupación de tramos en familias según capacidad estructural, año 2002.

FAMILIA 01				
CONDICIÓN 1>SN>4.0				
N°	TRAMO			SN
1	CA01E - Santiago de Maria	104+770	105+020	2.84
2	CA01E - Santiago de Maria	105+020	105+270	1.89
3	CA01E - Santiago de Maria	105+270	105+520	2.35
4	CA01E - Santiago de Maria	105+520	105+770	2.48
5	CA01E - Santiago de Maria	105+770	106+020	2.93
6	CA01E - Santiago de Maria	106+020	106+270	3.26
7	CA01E - Santiago de Maria	106+270	106+520	2.30
8	CA01E - Santiago de Maria	106+520	106+770	2.66
9	CA01E - Santiago de Maria	106+770	107+020	2.35
10	CA01E - Santiago de Maria	107+020	107+270	2.21
11	CA01E - Santiago de Maria	107+270	107+520	2.48
12	CA01E - Santiago de Maria	107+520	107+770	1.88
13	CA01E - Santiago de Maria	107+770	108+020	3.02
14	CA01E - Santiago de Maria	108+020	108+270	3.22
15	CA01E - Santiago de Maria	108+270	108+520	3.08
16	CA01E - Santiago de Maria	108+520	108+770	1.98
17	CA01E - Santiago de Maria	108+770	109+020	2.10
18	CA01E - Santiago de Maria	109+020	109+270	1.98
19	CA01E - Santiago de Maria	109+270	109+520	1.99
20	CA01E - Santiago de Maria	109+520	109+770	1.72
21	CA01E - Santiago de Maria	109+770	110+020	2.01
22	CA01E - Santiago de Maria	110+020	110+270	2.11
23	CA01E - Santiago de Maria	110+270	110+520	2.64

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 0:2: Continuación Agrupación de tramos en familias según capacidad estructural, año 2002.

24	CA01E - Santiago de Maria	110+520	110+770	1.75
25	CA01E - Santiago de Maria	110+770	111+020	2.05
26	CA01E - Santiago de Maria	111+020	111+270	2.16
27	CA01E - Santiago de Maria	111+270	111+520	1.66
28	CA01E - Santiago de Maria	111+520	111+770	2.79
29	CA01E - Santiago de Maria	111+770	112+020	2.46
30	CA01E - Santiago de Maria	112+020	112+270	3.62
31	CA01E - Santiago de Maria	112+270	112+520	2.81
32	CA01E - Santiago de Maria	112+520	112+770	2.24
33	CA01E - Santiago de Maria	112+770	113+020	2.22
34	CA01E - Santiago de Maria	113+020	113+270	2.14
35	CA01E - Santiago de Maria	113+270	113+520	3.59
36	CA01E - Santiago de Maria	113+520	113+770	3.35
37	CA01E - Santiago de Maria	113+770	114+020	2.64
38	CA01E - Santiago de Maria	114+020	114+270	1.64
39	CA01E - Santiago de Maria	114+270	114+520	2.55
40	CA01E - Santiago de Maria	114+520	114+770	1.54
41	CA01E - Santiago de Maria	114+770	115+020	1.72
42	CA01E - Santiago de Maria	115+020	115+270	3.27

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:3: Agrupación de tramos en familias según capacidad estructural, año 2007.

FAMILIA 01				
CONDICIÓN 1>SN>4.0				
N°	TRAMO			SN
17	CA01E - Santiago de Maria	108+770	109+020	3.95
21	CA01E - Santiago de Maria	109+770	110+020	3.65
24	CA01E - Santiago de Maria	110+520	110+770	3.82
27	CA01E - Santiago de Maria	111+270	111+520	3.90
28	CA01E - Santiago de Maria	111+520	111+770	2.72
29	CA01E - Santiago de Maria	111+770	112+020	3.49
30	CA01E - Santiago de Maria	112+020	112+270	3.64
31	CA01E - Santiago de Maria	112+270	112+520	3.58
33	CA01E - Santiago de Maria	112+770	113+020	3.98
37	CA01E - Santiago de Maria	113+770	114+020	3.43
39	CA01E - Santiago de Maria	114+270	114+520	2.81
41	CA01E - Santiago de Maria	114+770	115+020	3.37

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:4: Agrupación de tramos en familias según capacidad estructural, año 2007.

FAMILIA 02				
CONDICIÓN SN≥4.0				
N°	TRAMO			SN
1	CA01E - Santiago de Maria	104+770	105+020	4.34
2	CA01E - Santiago de Maria	105+020	105+270	5.31
3	CA01E - Santiago de Maria	105+270	105+520	5.96
4	CA01E - Santiago de Maria	105+520	105+770	5.28
5	CA01E - Santiago de Maria	105+770	106+020	5.88
6	CA01E - Santiago de Maria	106+020	106+270	10.08
7	CA01E - Santiago de Maria	106+270	106+520	5.89
8	CA01E - Santiago de Maria	106+520	106+770	5.65
9	CA01E - Santiago de Maria	106+770	107+020	5.06
10	CA01E - Santiago de Maria	107+020	107+270	4.13
11	CA01E - Santiago de Maria	107+270	107+520	4.76
12	CA01E - Santiago de Maria	107+520	107+770	4.33
13	CA01E - Santiago de Maria	107+770	108+020	5.83
14	CA01E - Santiago de Maria	108+020	108+270	6.72
15	CA01E - Santiago de Maria	108+270	108+520	5.08
16	CA01E - Santiago de Maria	108+520	108+770	5.13
18	CA01E - Santiago de Maria	109+020	109+270	4.76
19	CA01E - Santiago de Maria	109+270	109+520	4.61
20	CA01E - Santiago de Maria	109+520	109+770	5.16
22	CA01E - Santiago de Maria	110+020	110+270	4.58
23	CA01E - Santiago de Maria	110+270	110+520	4.66
25	CA01E - Santiago de Maria	110+770	111+020	5.36
26	CA01E - Santiago de Maria	111+020	111+270	4.24
32	CA01E - Santiago de Maria	112+520	112+770	4.04
34	CA01E - Santiago de Maria	113+020	113+270	5.22
35	CA01E - Santiago de Maria	113+270	113+520	4.94
36	CA01E - Santiago de Maria	113+520	113+770	4.37
38	CA01E - Santiago de Maria	114+020	114+270	4.70
40	CA01E - Santiago de Maria	114+520	114+770	4.40
42	CA01E - Santiago de Maria	115+020	115+270	4.10

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:5: Agrupación de tramos en familias según capacidad estructural, año 2015.

FAMILIA 01				
CONDICIÓN 1>SN>4.0				
N°	TRAMO			SN
1	CA01E - Santiago de Maria	104+770	105+020	3.83
2	CA01E - Santiago de Maria	105+020	105+270	3.94
3	CA01E - Santiago de Maria	105+270	105+520	3.63
6	CA01E - Santiago de Maria	106+020	106+270	3.00
7	CA01E - Santiago de Maria	106+270	106+520	3.70
9	CA01E - Santiago de Maria	106+770	107+020	3.54
11	CA01E - Santiago de Maria	107+270	107+520	3.91
13	CA01E - Santiago de Maria	107+770	108+020	2.79
14	CA01E - Santiago de Maria	108+020	108+270	3.96
16	CA01E - Santiago de Maria	108+520	108+770	3.76
17	CA01E - Santiago de Maria	108+770	109+020	3.93
18	CA01E - Santiago de Maria	109+020	109+270	3.52
20	CA01E - Santiago de Maria	109+520	109+770	3.50
23	CA01E - Santiago de Maria	110+270	110+520	3.99
26	CA01E - Santiago de Maria	111+020	111+270	3.99
27	CA01E - Santiago de Maria	111+270	111+520	3.33
30	CA01E - Santiago de Maria	112+020	112+270	2.96
31	CA01E - Santiago de Maria	112+270	112+520	3.78
34	CA01E - Santiago de Maria	113+020	113+270	2.90
39	CA01E - Santiago de Maria	114+270	114+520	3.86
40	CA01E - Santiago de Maria	114+520	114+770	3.58
41	CA01E - Santiago de Maria	114+770	115+020	3.45
42	CA01E - Santiago de Maria	115+020	115+270	3.48

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 0:6: Agrupación de tramos en familias según capacidad estructural, año 2015.

FAMILIA 02				
CONDICIÓN SN≥4.0				
N°	TRAMO			SN
4	CA01E - Santiago de Maria	105+520	105+770	4.08
5	CA01E - Santiago de Maria	105+770	106+020	4.75
8	CA01E - Santiago de Maria	106+520	106+770	4.66
10	CA01E - Santiago de Maria	107+020	107+270	4.62
12	CA01E - Santiago de Maria	107+520	107+770	4.64
15	CA01E - Santiago de Maria	108+270	108+520	4.23
19	CA01E - Santiago de Maria	109+270	109+520	4.39
21	CA01E - Santiago de Maria	109+770	110+020	5.97
22	CA01E - Santiago de Maria	110+020	110+270	5.08
24	CA01E - Santiago de Maria	110+520	110+770	4.02
25	CA01E - Santiago de Maria	110+770	111+020	5.40
28	CA01E - Santiago de Maria	111+520	111+770	4.26
29	CA01E - Santiago de Maria	111+770	112+020	4.29
32	CA01E - Santiago de Maria	112+520	112+770	4.19
33	CA01E - Santiago de Maria	112+770	113+020	4.99
35	CA01E - Santiago de Maria	113+270	113+520	4.92
36	CA01E - Santiago de Maria	113+520	113+770	4.84
37	CA01E - Santiago de Maria	113+770	114+020	5.43
38	CA01E - Santiago de Maria	114+020	114+270	4.57

Fuente: Elaboración propia.

Posterior a la definición de tramos de estudio en función de familias se procederá a realizar el proceso de calibración, este puede ser por dos maneras numérica o gráfica, tal como es el caso de la investigación presente.

#### **5.1.6 CALIBRACION POR METODO GRAFICO.**

##### **5.1.6.1 ANALISIS DE TRAMOS POR FAMILIA.**

A continuación, se realiza el análisis de cada uno de los tramos agrupándolos en su respectiva familia, programando las ecuaciones de los modelos HDM-4 en planillas electrónicas.

Es importante tomar las siguientes consideraciones:

- Los datos utilizados para realizar el análisis de cada familia, corresponden a los valores encontrados en tablas del capítulo IV.
- El año de inicio del análisis debe corresponder al año en el cual se realizó la última rehabilitación o mantenimiento de importancia que redujo los deterioros a cero. En nuestro caso el año de la última rehabilitación fue 2,007, por lo que el análisis inicia en 2,007.
- El periodo de análisis entonces corresponderá a la cantidad de años con los cuales se cuenta información, en este caso 7 años (desde el ultimo mantenimiento) que reduje el agrietamiento a cero.

Posteriormente se realiza el análisis. Dichos resultados se grafican y se superponen a los datos obtenidos en campo para el pavimento en cuestión, con el fin de comparar los datos predichos con los observados. Luego se procede a calibrar cada modelo.

## **CALIBRACION DEL MODELO DE AHUELLAMIENTO.**

Una de las características superficiales que el usuario advierte cuando circula por una carretera es el perfil transversal, y como elemento de éste, se encuentra el ahuellamiento. El Ahuellamiento corresponde a una deformación vertical permanente del pavimento asfáltico que se refleja en el perfil transversal y que se presenta como un surco longitudinal a lo largo del camino bajo las huellas de rodado.

La presencia La presencia del ahuellamiento en el pavimento afecta no sólo la condición estructural del pavimento (disminuye su vida útil), sino que también, en niveles extremos, afecta su condición funcional dificultando las condiciones de manejo y la seguridad de los usuarios, en especial, debido a que el ahuellamiento al ser una depresión en el pavimento, favorece la acumulación de agua en la superficie del camino pudiendo causar el fenómeno de hidroplaneo (deslizamiento sobre el agua) en condiciones de circulación bajo lluvia, lo que puede provocar un accidente. Debido a este potencial riesgo de accidente, las bases de licitación en el actual sistema de concesiones de carreteras exigen un control del ahuellamiento.

### 5.1.7 DETERMINACION DE FACTOR DE INICIAL DE CALIBRACION DE DENSIFICACION INICIAL ( $K_{rid}$ )

Es importante remarcar que la densificación inicial solamente aplica a construcciones nuevas o reconstrucciones que involucre la construcción de una capa nueva de base.

Para calcular el factor de calibración de densificación inicial  $K_{rid}$ , se aplica el procedimiento antes descrito para el método gráfico, dividiendo el valor de ahuellamiento un año después de la construcción observado entre el valor predicho por el modelo sin calibrar. Todo ello con la finalidad de iniciar el análisis por prueba y error.

A continuación, se presenta el procedimiento para realizar la calibración:

- Analizando la familia uno se asigna el valor se realiza el análisis para una familia, asignando a  $K1_{rid}$ , el valor parámetro.
- Con los resultados obtenidos se grafican sobreponiéndolos a los datos reales, y se observa la diferencia entre el año de inicio del ahuellamiento y el ahuellamiento el estimado.
- En base a las observaciones, se prueba con otro valor ya sea mayor o menor que el valor parámetro.
- Se vuelve a repetir el procedimiento hasta encontrar un valor que permita que la densificación inicial estimada se acerque a la densificación inicial (observada o real).



Como resultado de aplicar los pasos antes mencionados, se obtuvieron los siguientes resultados para la familia 1.

Tabla 0:1: Factor de Calibración para Densificación inicial o inicio de ahuellamiento.

<b>FACTOR DE CALIBRACION PARA DENSIFICACION INICIAL (PROFUNDIDAD INICIAL DE AHUELLAMIENTO)</b>		
<b>FAMILIA 01</b>	$K_{rid1}$	<b>0.219</b>
<b>FAMILIA 02</b>	$K_{rid2}$	<b>0.236</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### **5.1.8 DETERMINACION DE FACTOR DE CALIBRACION DE DEFORMACION ESTRUCTURAL O PROGRESION DE AHUELLAMIENTO ( $K_{rst}$ )**

Para realizar la determinación de dicho factor se aplicó el método estadístico de minimización de los cuadrados de las diferencias de los datos estimados y los observados, explicado anteriormente. Como resultado de este proceso se obtuvo un valor parámetro, el cual sirve para comenzar el procedimiento de prueba y error.

Los siguientes pasos son una guía para realizar la respectiva calibración:

- Primera prueba (1): se realiza el análisis para una familia, asignando a  $K_{rid}$ , el valor parámetro, y colocando a  $K_{rst}$  su valor definitivo, debido a que la progresión de ahuellamiento depende de esta.

- Los resultados obtenidos se grafican sobreponiéndolos a los datos reales, y se observa la diferencia entre la tendencia de los valores de ahuellamiento real, y el estimado.
- Basándose en estas observaciones, se prueba con otro valor ya sea mayor o menor que el valor inicial con el objetivo de lograr que la curva del modelo se ajuste lo más posible a los datos de campo, procurando que se localice en el centro de la nube de puntos.
- Se vuelve a repetir el procedimiento hasta encontrar un valor que haga que la curva estimada se apegue lo más posible a los datos observados.

Tabla 0:2: Factor de Calibración para deformación estructural o progresión de ahuellamiento.

<b>FACTOR DE CALIBRACION PARA DEFORMACION ESTRUCTURAL (PROGRESION O INCREMENTO EN AHUELLAMIENTO)</b>		
<b>FAMILIA 01</b>	$K_{rst1}$	<b>0.89</b>
<b>FAMILIA 02</b>	$K_{rst2}$	<b>0.87</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### **5.1.9 DETERMINACION DE FACTOR DE CALIBRACION DE DEFORMACION PLASTICA O INCREMENTO DE DEFORMACION PLASTICA AHUELLAMIENTO ( $K_{rpd}$ )**

De la misma manera que se realizó el análisis para obtener el factor de calibración para progresión de ahuellamiento se realizara obtener el factor de calibración de deformación plástica.

Es así que para determinar de dicho factor se aplicó el método estadístico de minimización de los cuadrados de las diferencias de los datos estimados y los observados, explicado anteriormente. Como resultado de este proceso se obtuvo un valor parámetro, el cual sirve para comenzar el procedimiento de prueba y error.

Los siguientes pasos son una guía para realizar la respectiva calibración:

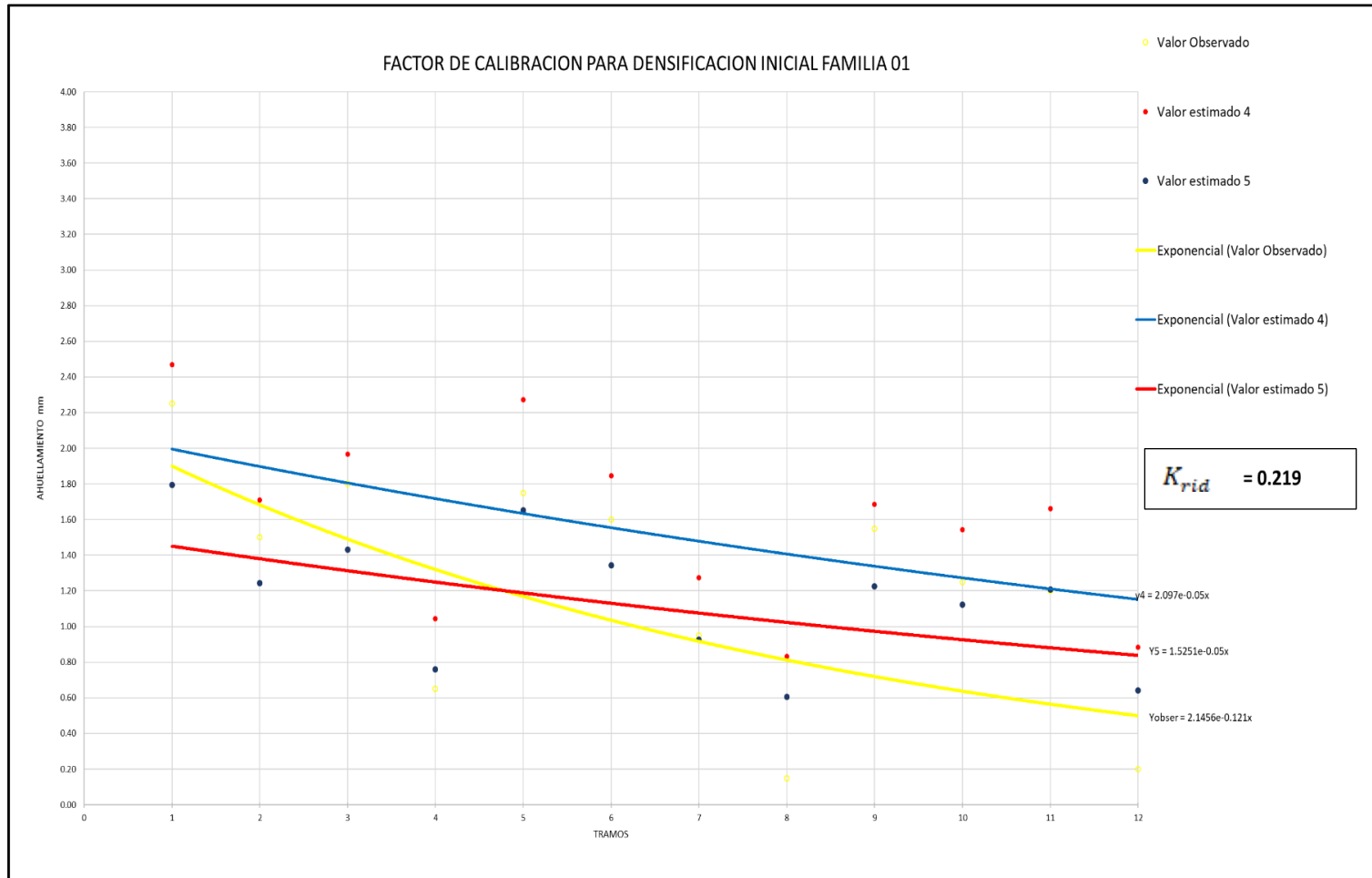
- Primera prueba (1): se realiza el análisis para una familia, asignando a  $K_{rid}1$ , el valor parámetro, y colocando a su  $K_{rpd}$  valor definitivo, debido a que la progresión de deformación plástica depende de esta.
- Los resultados obtenidos se grafican sobreponiéndolos a los datos reales, y se observa la diferencia entre la tendencia de los valores de ahuellamiento real, y el estimado.
- Basándose en estas observaciones, se prueba con otro valor ya sea mayor o menor que el valor inicial con el objetivo de lograr que la curva del modelo se ajuste lo más posible a los datos de campo, procurando que se localice en el centro de la nube de puntos.
- Se vuelve a repetir el procedimiento hasta encontrar un valor que haga que la curva estimada se apegue lo más posible a los datos observados.

Tabla 0:3: Factor de Calibración para deformación plástica o progresión de deformación plástica.

<b>FACTOR DE CALIBRACION PARA DEFORMACION PLASTICA (PROGRESION DE INCREMENTO EN AHUELLAMIENTO)</b>		
<b>FAMILIA 01</b>	<b><math>K_{rpd1}</math></b>	<b>0.0054</b>
<b>FAMILIA 02</b>	<b><math>K_{rpd2}</math></b>	<b>0.00455</b>

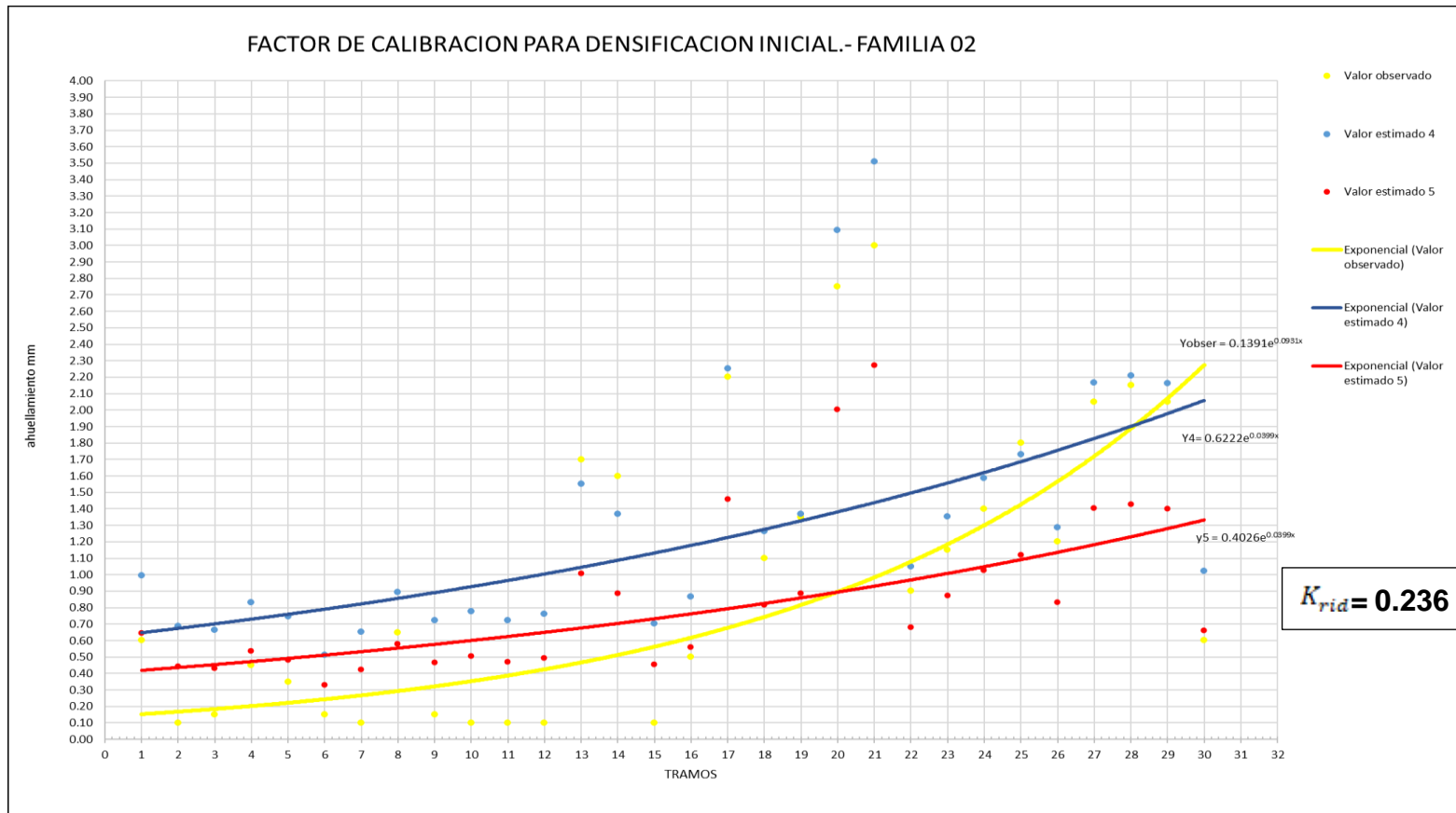
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica: 1: Factor de Calibración para Densificación Inicial Familia 01.



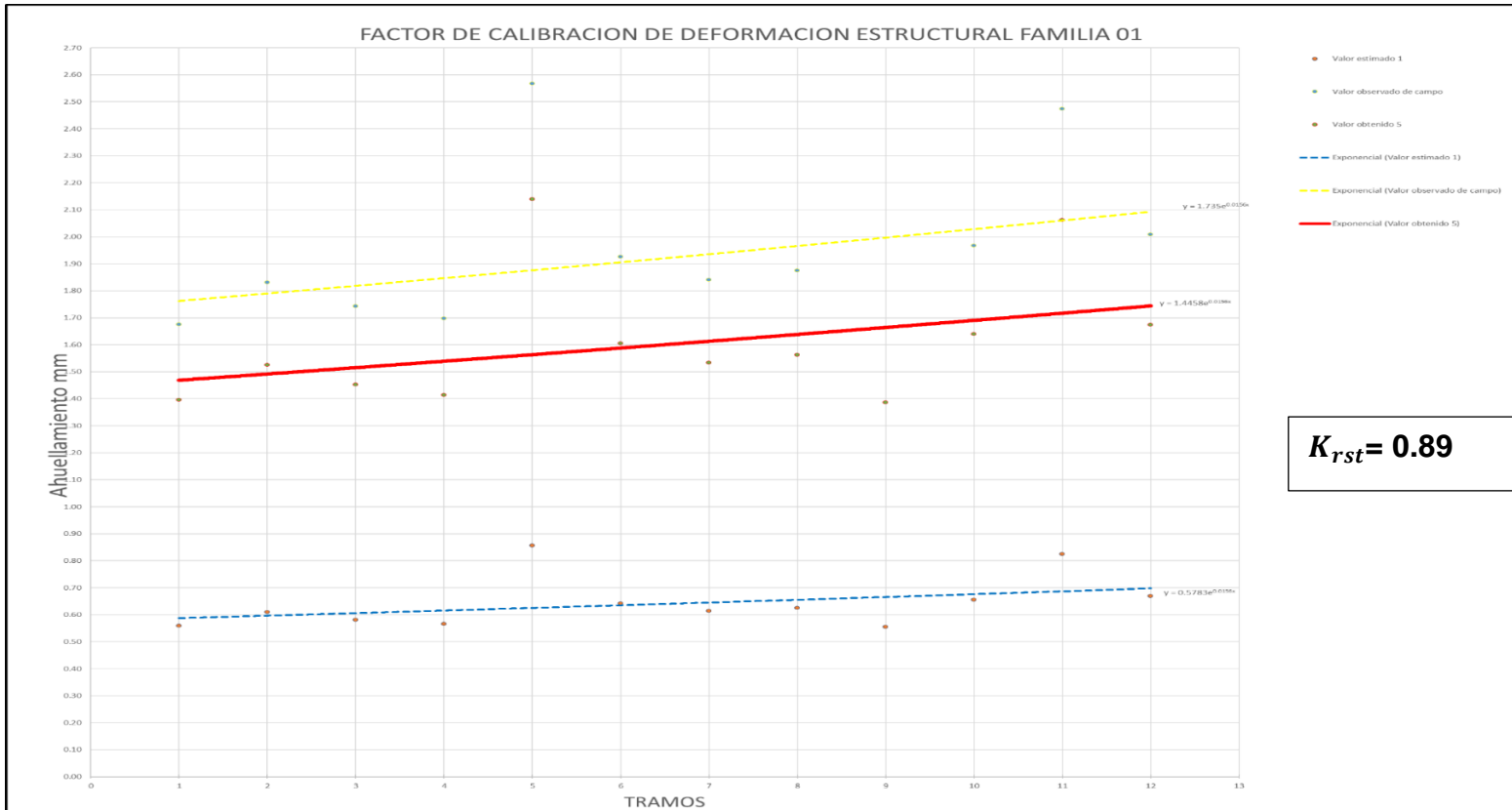
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica: 2: Factor de Calibración para Densificación Inicial Familia O2.



Fuente: Elaboración propia.

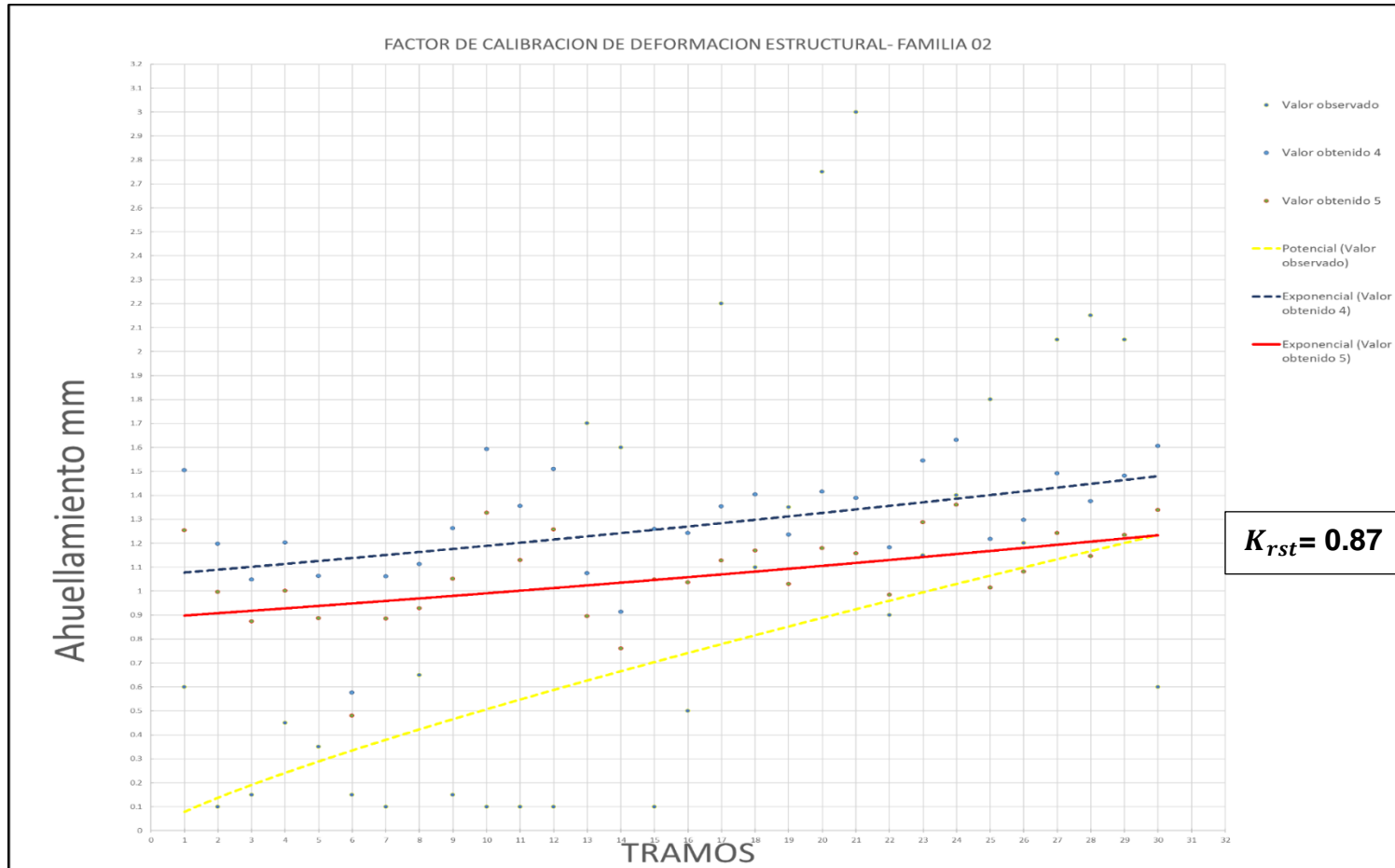
Gráfica: 3: Factor de Calibración de Deformación estructural familia 01.



$K_{rst} = 0.89$

Fuente: Elaboración propia.

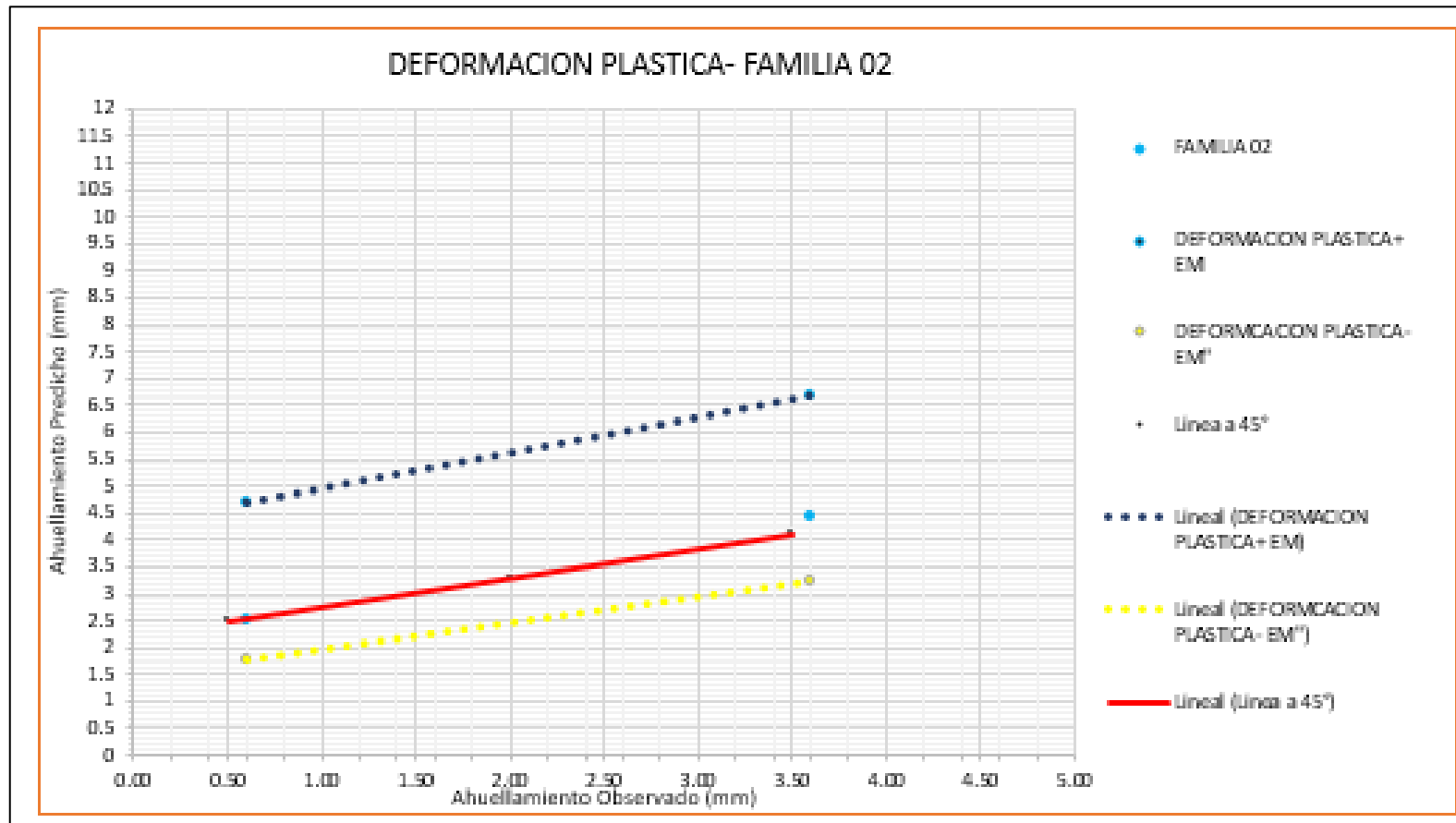
Gráfica: 4: Factor de Calibración de Deformación Estructural Familia 02.



Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 5: Factor de Calibración de Deformación Plástica- Familia 02.



Fuente: Elaboración propia.

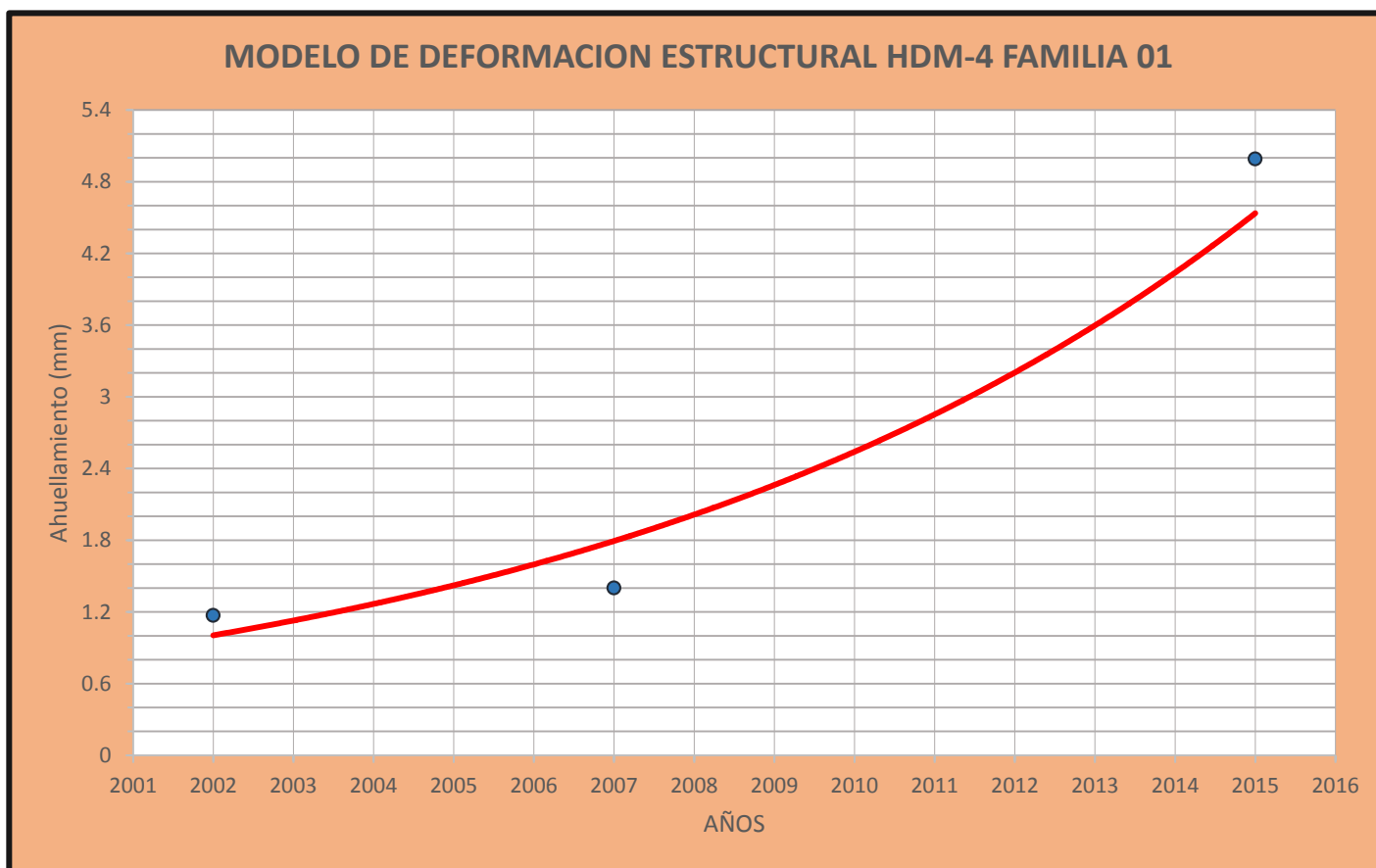
Como resultado de la investigación se obtuvieron los siguientes factores de calibración para los modelos de deterioro Ahuellamiento de HDM-4 para pavimentos flexibles en base granular. En condiciones similares podrán ser aplicados en carreteras de nuestro país, seleccionando los factores para familias cuyas características se han como se mencionaba compatibles a las seleccionadas en dicha investigación.

Tabla 0:4: Factores de Calibración del Modelo de Deterioro Ahuellamiento para CA01-E-Santiago de María, Usulután, El Salvador.

<b>MODELO</b>	<b>FACTOR DE CALIBRACION</b>	<b>FAMILIA 01</b>	<b>FAMILIA 02</b>
<b>DENSIFICACION INICIAL</b>	$K_{rid}$	<b>0.219</b>	<b>0.236</b>
<b>DEFORMACION ESTRUCTURAL</b>	$K_{rst}$	<b>0.89</b>	<b>0.87</b>
<b>DEFORMACION PLASTICA</b>	$K_{rpd}$	<b>0.0054</b>	<b>0.00455</b>

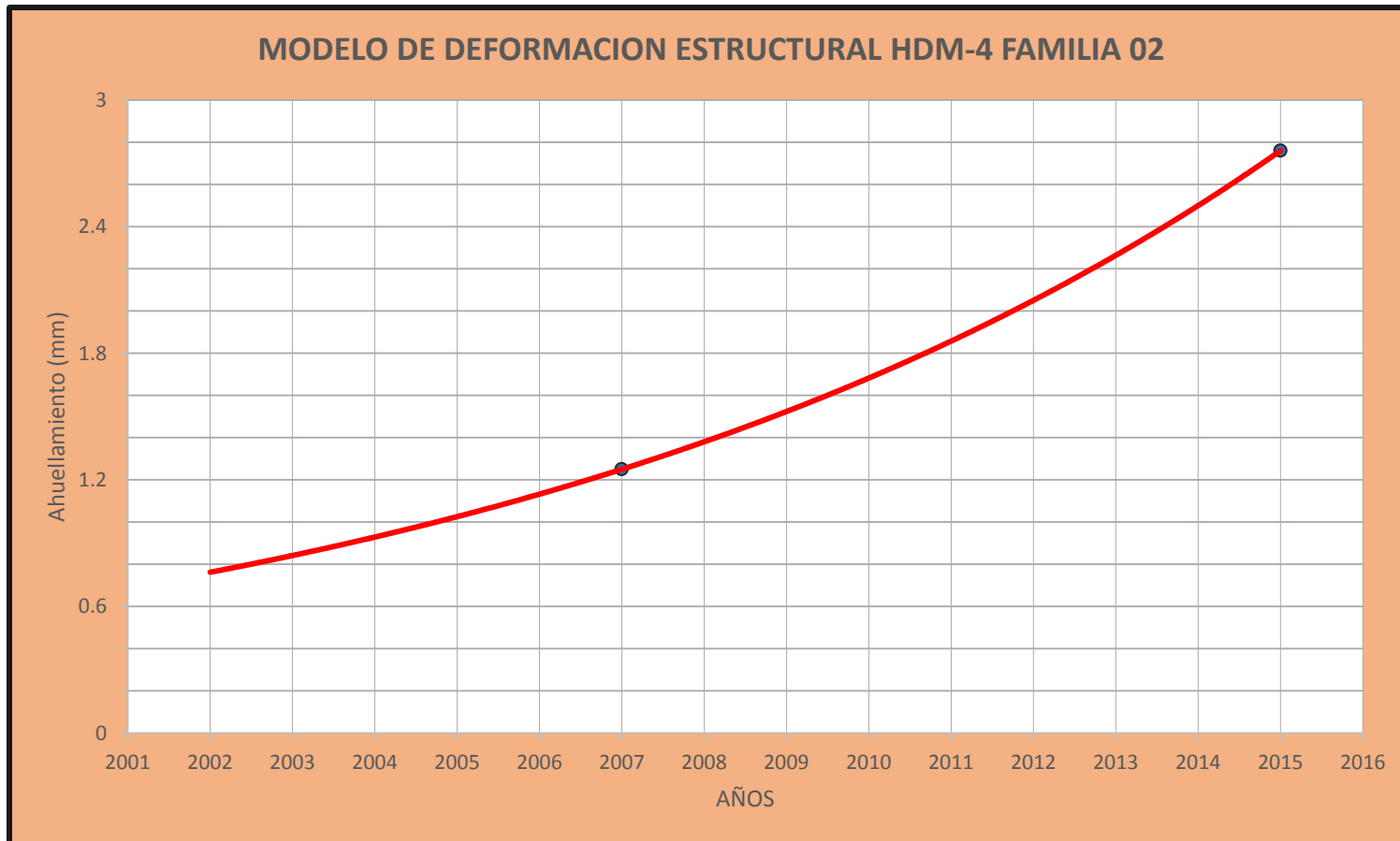
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica: 5: Calibración del Modelo Deformación Estructural HDM-4 para Familia 01



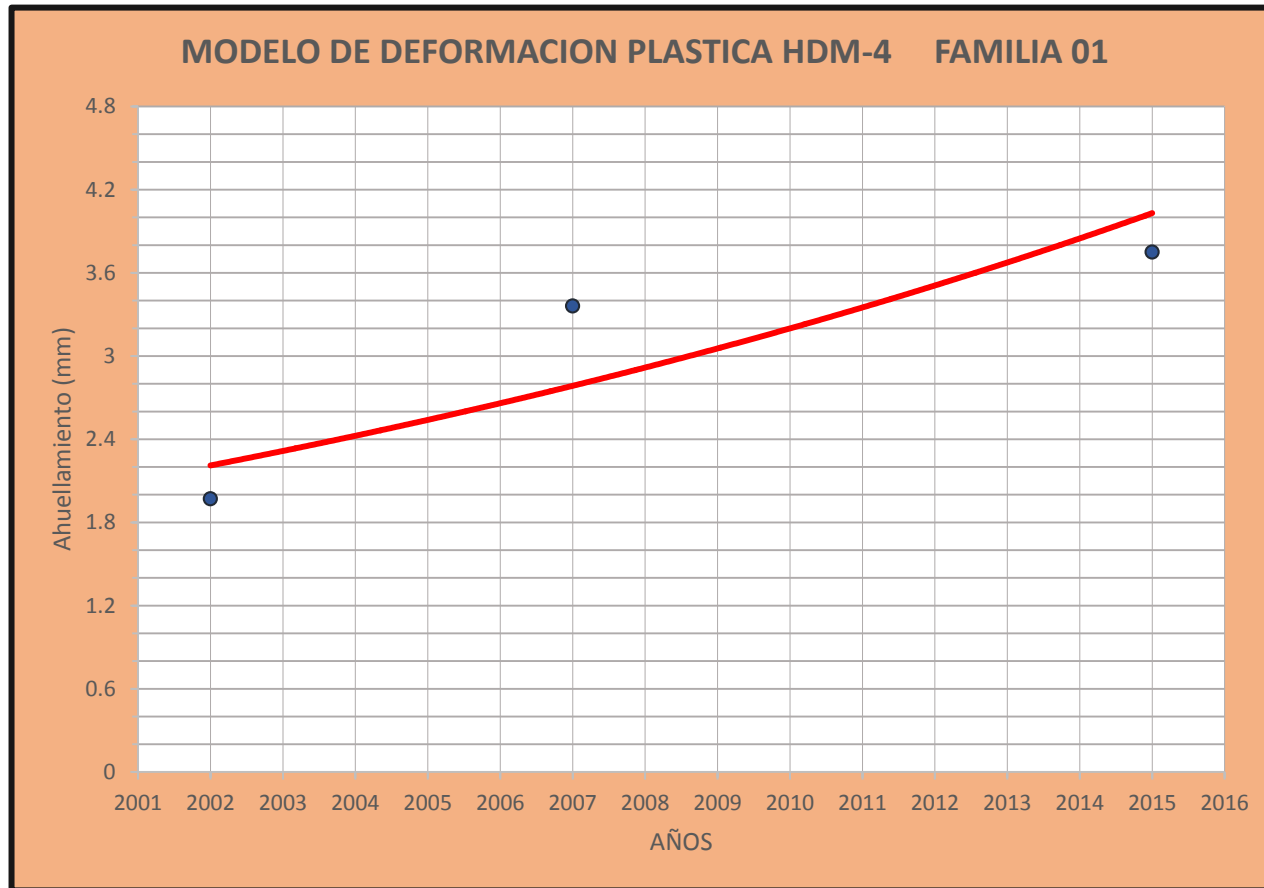
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica: 6: Calibración del Modelo Deformación Estructural HDM-4 para Familia 02



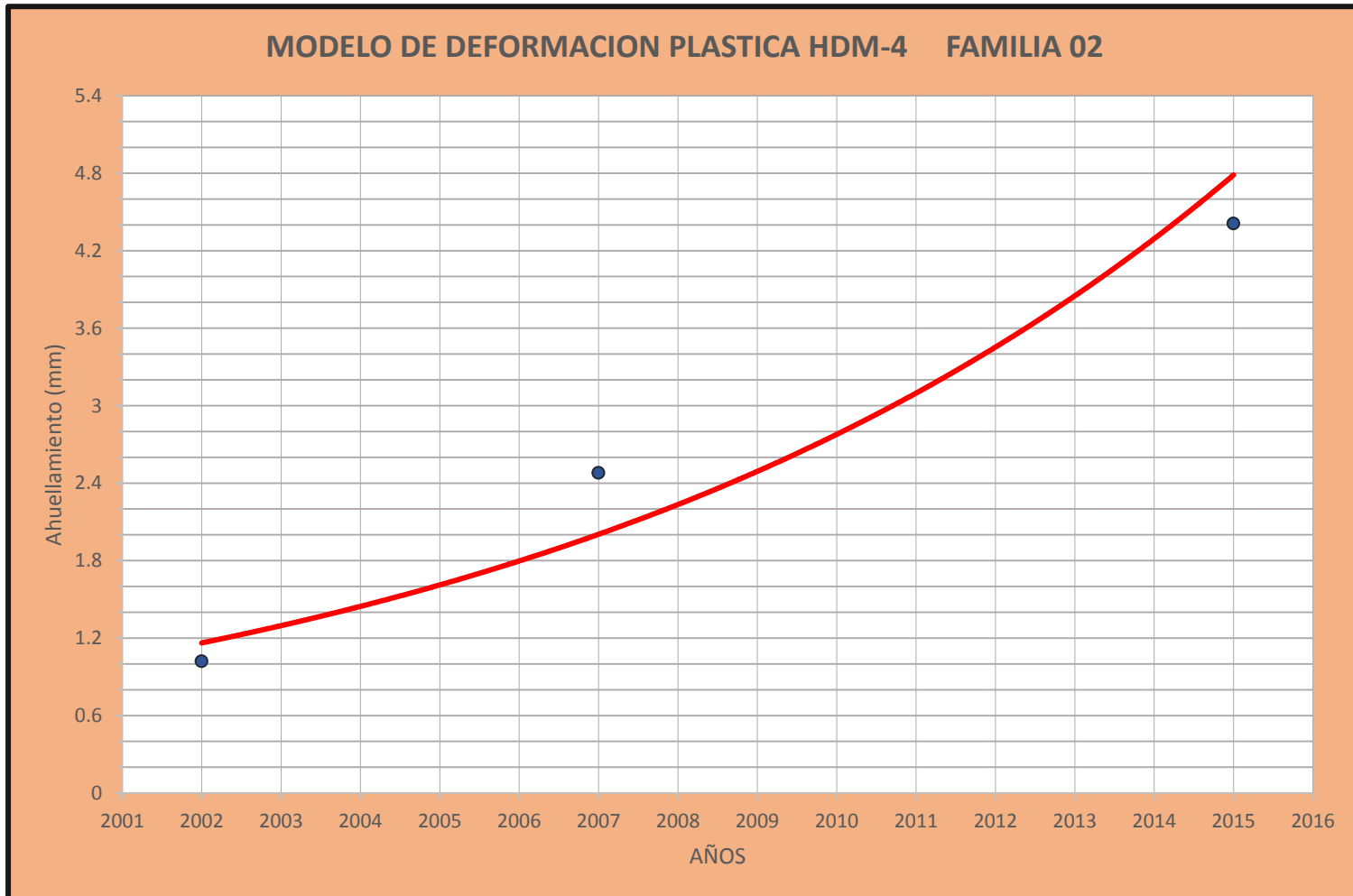
Fuente: Elaboración propia

Gráfica: 7: Calibración del Modelo Deformación Plástica HDM-4 para Familia 01



Fuente: Elaboración propia

Gráfica: 8: Calibración del Modelo Deformación Plástica HDM-4 para Familia 02



Fuente: Elaboración propia

## CONFIABILIDAD EN LA CALIBRACIÓN.

En base a las tablas 5.5.1 a 5.5.3 y 5.5.4. Se presenta a continuación la verificación de la calidad de predicción o calibración. La cual consiste en comparar para cada uno de los modelos evaluados en la investigación, los valores observados contra los valores obtenidos o predichos dentro de los parámetros de calibración.

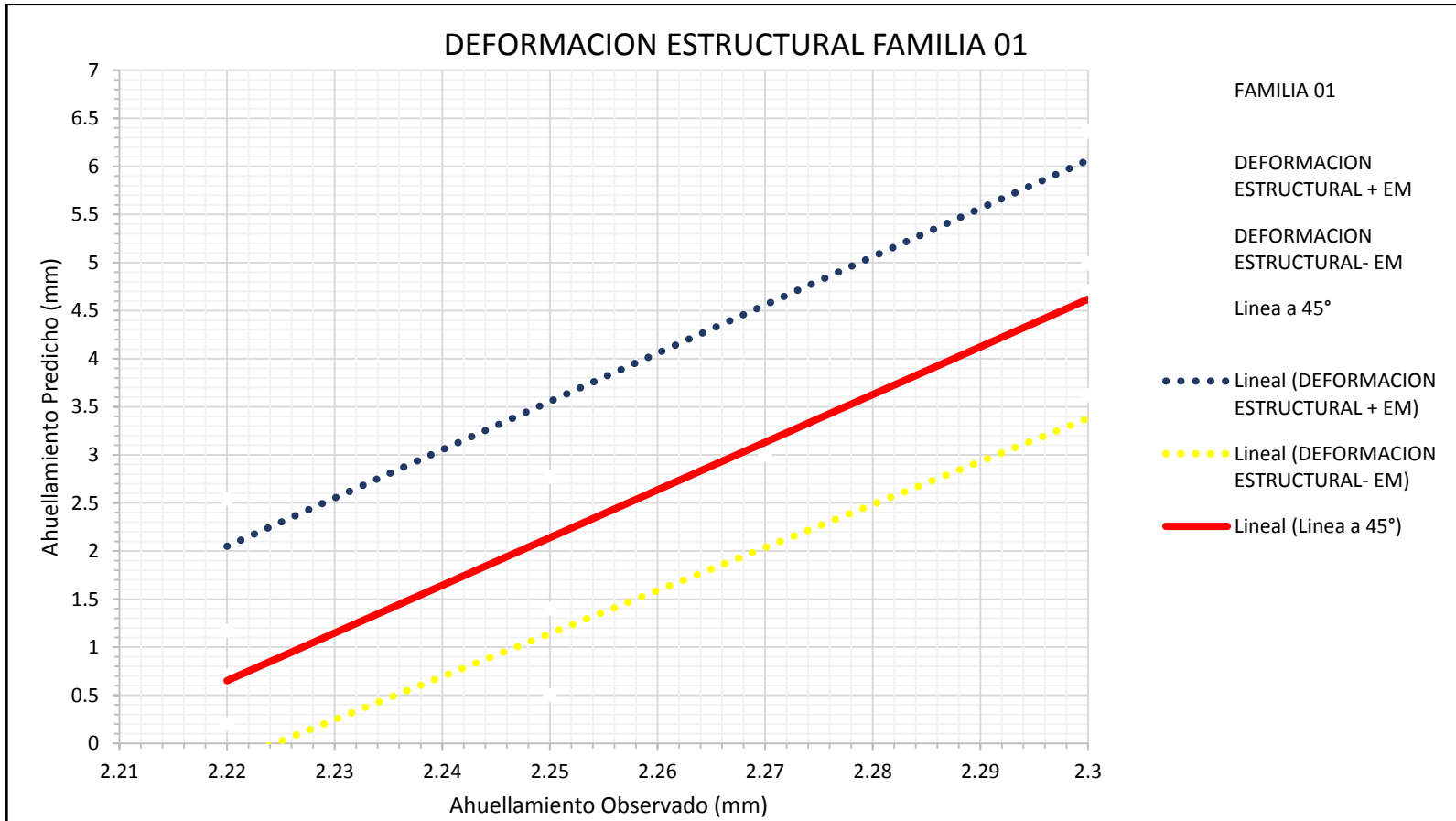
El coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y el Error medio de Estimación (EM) son los indicadores que nos permitirán corroborar la confiabilidad en la predicción.

Tabla 0:1: Factor de Correlación y Error medio Estimado para el respectivo modelo de deterioro.

MODELO	FAMILIA 01		FAMILIA 02	
	$R^2$	EM	$R^2$	EM
DENSIFICACION INICIAL	0.99	0.16	0.97	0.94
DEFORMACION ESTRUCTURAL	0.93	1.37	0.97	1.77
DEFORMACION PLASTICA	0.98	5.42	0.87	2.27

Fuente: Elaboración propia

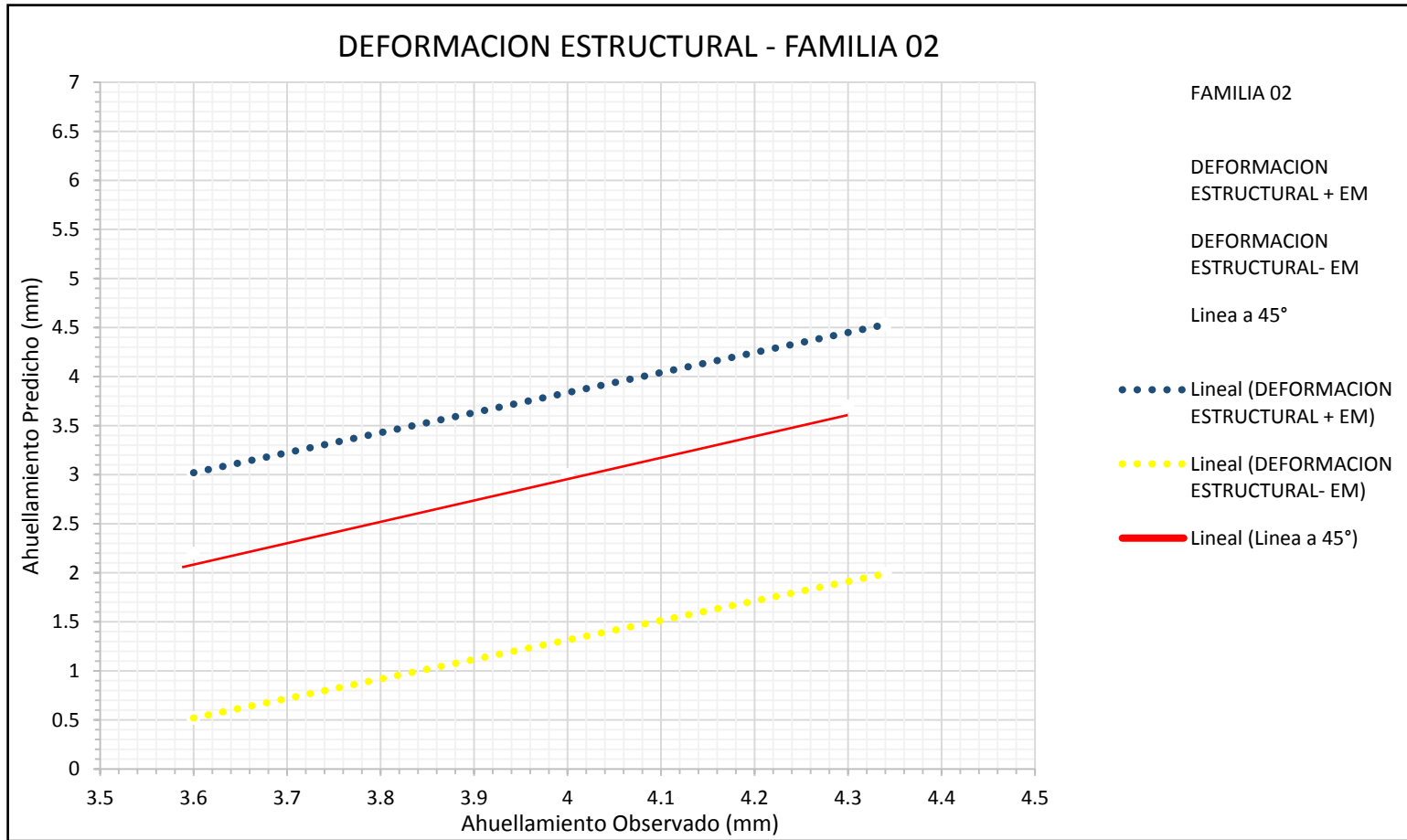
Gráfica: 9: Verificación de Calidad en la predicción del modelo Deformación Estructural Familia 01



Fuente: Elaboración propia

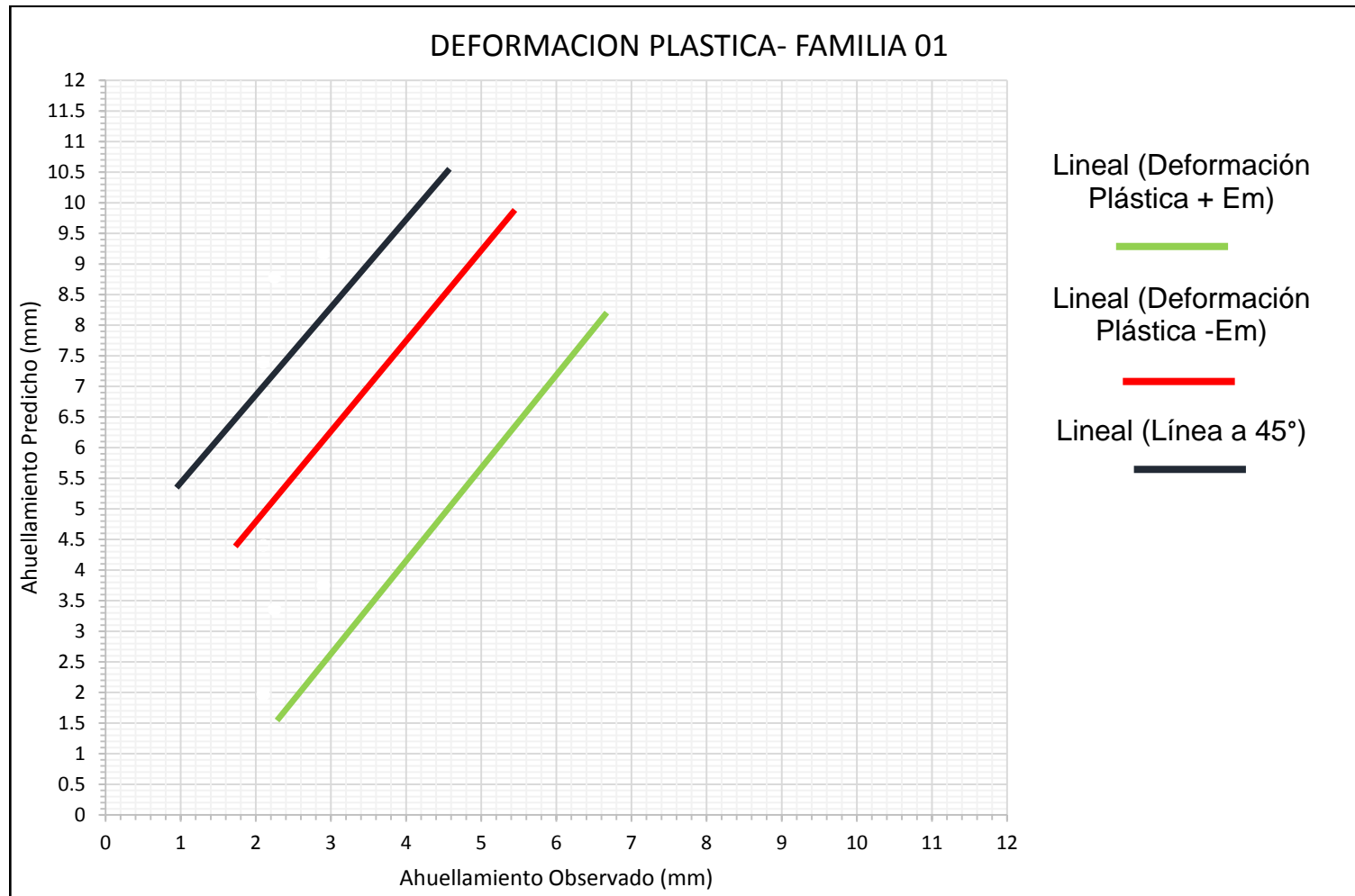


Gráfica: 10: Verificación de Calidad en la predicción del modelo Deformación Estructural - Familia 02



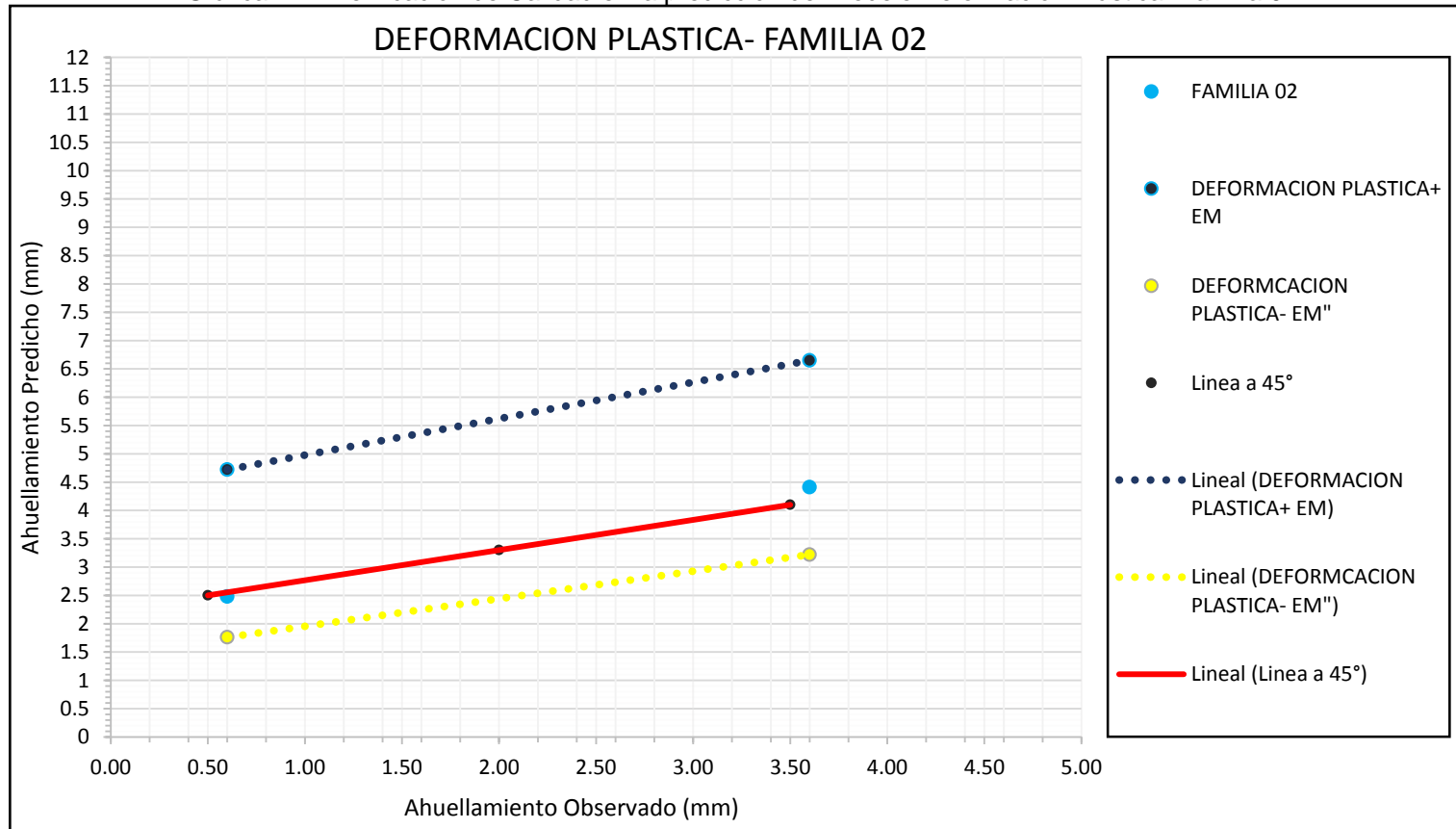
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica: 11: Verificación de Calidad en la predicción del modelo Deformación Plástica- Familia 01



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica: 12: Verificación de Calidad en la predicción del modelo Deformación Plástica- Familia 02



Fuente: Elaboración propia.



**CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y  
RECOMENDACIONES.**

---

## CONCLUSIONES.

- Los valores de calibración obtenidos fueron resultado de la implementación del sistema de ecuaciones proporcionadas por el programa Highway Development and Management System (HDM-4) para el deterioro Ahuellamiento en Pavimentos Flexibles con base Granular.
- Los factores de calibración obtenidos nos permiten desarrollar predicciones más realistas del comportamiento de un pavimento, sin embargo deberán ser utilizados condiciones similares a las del pavimento analizado, es decir, para categorías funcionales primarias, que incluyen volúmenes de tránsito altos, condiciones climatológicas, tipo de base, espesor del paquete estructural, entre otros aspectos.
- Producto de la investigación los factores de calibración obtenidos producto serán de mucha utilidad en la implementación de un Sistema de Gestión de Pavimentos cuya finalidad es determinar el inicio y evolución del deterioro Ahuellamiento, y así desarrollar planes de mantenimiento que contribuyan a reducir los costos de las intervenciones de manera oportuna.
- Como resultado del análisis en la verificación de calidad en la predicción o confiabilidad en la calibración obtuvimos por medio de indicadores estadísticos en cada familia analizada valores de coeficientes de

correlación ( $R^2$ ) superiores a 0.50 y error medio de la estimación (EM) desde 0.16 a 5.42. Es por ello que al realizar una comparación entre valores observados y simulados o predichos indica que la mayoría de resultados se encuentra dentro de la tendencia, lo cual significa una calibración satisfactoria.

## RECOMENDACIONES.

- Se sugiere utilizar los factores de calibraciones obtenidos en la presente investigación, en carreteras que poseen características similares a las de las vías de estudio, con la finalidad que obtener predicciones que se adapten a las condiciones reales de la carretera de estudio.
- Se recomienda seguir investigando las diferentes variables que intervienen en cada uno de los modelos de calibración planteados para el caso del deterioro Ahuellamiento, así como otros deterioros considerados en el programa Highway Development and Management System (HDM-4), con la finalidad de conocer la importancia que tienen estos en la calibración. Así poner un mayor énfasis en la información a incorporar dentro de la investigación.
- Para aplicar la metodología de “Tramos Testigos”, se recomienda contar con información de inventario del pavimento que considere al menos 5 años de evolución del pavimento con el fin de obtener resultados más confiables.
- Se recomienda continuar con el estudio del modelo Ahuellamiento del programa Highway Development and Management System (HDM-4) para

ratificar los resultados obtenidos en la investigación y de esta manera ayudar a expandir el espacio de deducción en los tramos de estudio considerados, que permitan adaptar los modelos a una cantidad mayor de categorías de pavimentos.

- En estudios posteriores se recomienda realizar calibraciones de los modelos de deterioro en pavimentos flexibles que aún no han sido considerados en investigaciones previas, así como en esta investigación, utilizando como guía la presente investigación.
- Se exhorta en futuras investigaciones considerar aspectos económicos y ambientales dentro de la calibración de modelos de deterioros mediante Highway Development and Management System (HDM-4).



## **BIBLIOGRAFÍA.**

---

➤ **MARCO ANALITICO Y DESCRIPCION DE MODELOS.**

J.B. Odoki & Henry G. R: Keraly

Highway Development & Management

➤ **VISION GENERAL DE HDM-4**

Henry G. R: Keraly

Highway Development & Management

➤ **GUIA DE CALIBRACION Y ADAPTACION, VERSION I, VOLUMEN 4 Y  
5, MANUAL HDM-4**

Banco Mundial

➤ **MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS**

Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA)

➤ **GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURA VIAL**

Hernán de Solminihaç T.

Ediciones Universidad Católica de Chile

Primera Edición

➤ **CATALOGO CENTROAMERICANO DE DAÑOS A PAVIMENTOS  
VIALES.**

Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA), Guatemala,

Diciembre 2000

➤ **METODOLOGIA DE DESARROLLO Y UTILIZACION DE MODELOS INCREMENTALES DE PREDICION DEL DETERIORO EN CAMINOS, Y SU APLICACION A PAVIMENTOS DE HORMIGÓN”.**

Dr. Marcelo G. Bustos, Pontificia Universidad Católica de Chile.

➤ **CALIBRACION DE LOS MODELOS DE GRIETAS Y BACHES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL PROGRMA HDM-4 PARA EL SALVADOR.**

Karen Araya y Eunice Tobar, Universidad de El Salvador, Agosto 2010.

### **LIBROS ELECTRONICOS**

➤ **ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS DE DETERIORO DEL HDM-4 PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.**

Publicación Técnica No 253. Sanfandila, Qro., México. Año 2004.

Ricardo Solorio Murillo; Roberto Israel Hernández D.; José A. Gómez López.

➤ **CALIBRACIÓN DE MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE HDM-III Y HDM-4 PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A LAS CONDICIONES DE CHILE.**

Revista BIT, Marzo 2002

➤ **CALIBRACIÓN DEL MODELO DE GRIETAS ESTRUCTURALES PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EN HDM-4 A LAS CONDICIONES DE CHILE.**

Volumen 17 N° 1, año 2002. Págs. 12 – 22. Revista Ingeniería de Construcción.

Hernán Solminihaç, Priscila Hidalgo, Mauricio Salgado, Miguel Valdés.

➤ **EL HDM-4 COMO HERRAMIENTA DE AYUDA PARA LA CONSERVACIÓN DE CARRETERAS.**

Comunicación Libre - VIII Jornadas Nacionales sobre Conservación de Carreteras.

Ramón Crespo del Río y Pedro Yarza Álvarez. Madrid.

➤ **THE CALIBRATION AND USE OF HDM-IV PERFORMANCE MODELS IN A PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM.**

Gustav T. Rohde, Fritz Jooste, Elzbieta Sadzik, Theunis Henning.

Conference in Durban, South Africa. 1998.

**ANEXOS.**

---

## ANEXO A



Designation: D 4695 – 96

## Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 4695; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscripted epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

### 1. Scope

1.1 This guide provides recommendations for measuring pavement deflections resulting from the application of a known transient load, a steady-state dynamic load, or an impulse load applied by a nondestructive deflection testing (NDT) device. Deflections are measured with sensors that monitor the vertical movement of the pavement surface. This guide describes the general information that should be obtained regardless of the type of testing device used.

1.2 This guide is applicable for deflection measurements made on flexible (asphalt concrete (AC)), rigid (Portland Cement Concrete (PCC) or continuously reinforced concrete (CRCP)), or composite (AC/PCC) pavements.

1.3 This guide provides general information that is required for three suggested levels of testing effort, as follows:

1.3.1 *Level I*—a general overview of pavement condition for network analysis

1.3.2 *Level II*—a routine analysis of the pavement for purposes such as overlay or rehabilitation design projects.

1.3.3 *Level III*—a detailed or specific analysis of the pavement, such as the evaluation of joint efficiency or foundation support for PCC slabs.

1.4 The values stated in SI units are to be regarded as standard. Inch-pound units given in parentheses are for information purposes only.

1.5 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

2.1 *AASHTO Standard*<sup>2</sup>

T256—Standard Recommended Practice for Pavement Deflection Measurements

<sup>1</sup> This guide is under the jurisdiction of Committee D-4 on Road and Paving Materials, and is the direct responsibility of Subcommittee D04.39 on Non-Destructive Testing of Pavement Structures.

Current edition approved Feb. 10, 1996. Published April 1996. Last previous edition D 4695 – 83. Originally published as D 4695 – 83.

<sup>2</sup> Available from the American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., NW, Washington, DC 20001.

### 3. Summary of Guide

3.1 This guide consists of recommendations for measuring vertical or normal pavement surface deflections, directly under or at locations radially outward (offset), or both, from the load center. Several offset deflection measurements at a specific test location describe what is called a deflection "basin". Each NDT device is operated according to the standard operating procedure applicable to the device.

3.2 Recommendations for collection of general information such as ambient temperature, pavement temperature, equipment calibration, number of tests, and test location pertain to all devices.

### 4. Significance and Use

4.1 The nondestructive measurement of pavement deflections provides information that can be used for the structural analysis of the pavement system. The series of measured deflections or deflection basins may serve as inputs for models that estimate the overall stiffness of the pavement system, the effective or apparent modulus of elasticity of individual pavement layers (also known as "backcalculation"), or an equivalent thickness of a reference material. Either the effective modulus of elasticity or equivalent thickness may be used for mechanistic pavement evaluation and overlay design.

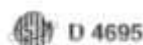
### 5. Apparatus

5.1 The apparatus used in this guide shall be one of the deflection measuring devices given in 5.2 and shall consist of some type of probe or surface contact sensor to measure normal pavement movements when subjected to a given load type.

5.2 *Deflection Measuring Devices:*

5.2.1 *Noncontinuous Static Device*,<sup>3</sup> that operates on a single lever-arm principle. This device should have a minimum 2.5 in (8 ft) long probe and the extension of the probe should depress a dial gage or electronic sensor that measures maximum pavement deflection with a resolution of 0.025 mm (0.001 in.) or better. The vehicle used with the static deflection device should be a truck carrying an 80 kN (18 000 lb) test load on a single rear axle. The rear axle should have dual 280 by 570

<sup>3</sup> An example of this instrument is the Seibert Broadband Beam, manufactured by Seibert Inc., Materials Testing Div., 2205 Lee St., Evanston, IL 60202.



mm (11.0 by 22.5 in.) 12-ply tires inflated to 480 kPa (70 psi). Other axle loads, tire sizes, and inflation pressures are permissible; however, the loading configuration must be indicated in the engineering report, for example as outlined in AASHTO Standard T256.

5.2.2 *Semicontinuous Static Device*,<sup>4</sup> that operates on a double lever-arm principle. The vehicle operating this device should be a truck carrying a 130 kN (29 000 lb) single-axle test load. It should have dual 280 by 570 mm (11.0 by 22.5 in.) 12-ply tires inflated to 480 kPa (70 psi). Other axle loads, tire sizes and inflation pressures are permissible, however, the loading configuration should be indicated in the engineering report. The test vehicle should be equipped with a double lever arm with probes, the geometry and size of which makes it possible to measure the maximum pavement deflection in both wheel paths with a resolution of 0.025 mm (0.001 in.) or better. The extension of each lever arm holding the probe should depress an electronic sensor, which may be of any type provided it delivers an analog or digital signal correlated with the movement of this extension, and therefore with the deflection of the pavement surface under the effect of the moving test load. The truck should be able to lift and move the probes from one measurement point to the next, lower them onto the pavement surface, and make another set of measurements in a fully automated process, and at constant vehicle speed.

5.2.3 *Steady State Dynamic Device*,<sup>5</sup> that uses a dynamic force generator to produce an oscillatory load. The force generator should either use counter-rotating masses or a servo-controlled hydraulic actuator to produce the peak-to-peak load. It should measure pavement deflections using four or more sensors with a resolution of 0.001 mm (0.00004 in.) or better, and should be capable of producing a 4.5 kN (1000 lb) peak-to-peak load or greater.

5.2.4 *Impulse Device*,<sup>6</sup> that creates an impulse load on the pavement by dropping a mass from different heights onto a rubber or spring buffer system. It should measure pavement deflections using five or more sensors with a resolution of 0.001 mm (0.00004 in.) or better, and should be capable of producing a 40 kN (9000 lb) load or greater.

## 6. Calibration of Deflection Measuring Devices

6.1 *Load*—The procedure for calibrating the load cell (if a load cell is used by the device) is dependent upon the type of apparatus used. Regardless of the apparatus used, the load cell calibration should be checked at least once per month during continuous operation. Whenever the device is used on an intermittent basis, the load cell calibration should be checked before testing begins. For impulse devices, reference load cell calibration should be carried out at least once per year, for example as outlined in Appendix A of SHRP Report SHRP-P-

661.<sup>7</sup> Steady state dynamic devices equipped with load cells may be calibrated by measuring the load cell output under known static loading conditions, such as the load of the device itself. Load cells should be calibrated at least once per year following the manufacturer's instructions. For noncontinuous and semicontinuous static deflection equipment, immediately prior to testing weigh the axle load of the truck if the ballast consists of a material that can absorb moisture (sand, etc). Trucks with steel or concrete block loads only need to be weighed if the loads are changed.

6.2 *Deflection*—The procedure for calibrating the deflection sensors is dependent upon the type of apparatus used. Regardless of the apparatus used, the calibration of the deflection sensors should be checked at least once per month of continuous daily operation. Reference deflection sensor calibration should be carried out in accordance with the manufacturer's recommendations or any other applicable procedures. Whenever the device is used on an intermittent basis, the deflection sensor calibration should be checked before testing begins. If the device has more than one sensor, a relative calibration check may be conducted by stacking the sensors in a column that measures the deflection at a single point, for example as outlined in Appendix A of SHRP Report SHRP-P-661.<sup>7</sup> Also, a standard test area may be used to check the calibration of the sensors. This consists of establishing a reference test point, such as at the interior of a known slab. Static devices should be calibrated daily with feeler gages. When performing deflection sensor calibration, induced deflections should be similar in magnitude to the deflections encountered during normal testing.

## 7. Testing Procedures

7.1 *General*—The procedure to be followed is dependent upon which type of apparatus is used. The following general information is suggested as the minimum data that needs to be collected, regardless of the type of device used:

7.1.1 *Load*—For impulse load devices, record the peak load applied to the pavement surface by the deflection device. For steady state devices, record the peak-to-peak load. For transient (static) devices, record the axle load of the test vehicle.

7.1.2 *Load Frequency*—If applicable, record the frequency of oscillatory loading for those devices such as a Road Rater. The Dynaflect frequency is set by the manufacturer, generally at 8 Hz.

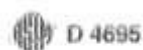
7.1.3 *Geometry of Loaded Area and Deflection Sensor Locations*—For proper modeling of the pavement structure and backcalculation, etc., it is necessary that the locations of the load, deflection sensors, pavement surface cracks, and PCC joints are known and recorded. Record the location of the nearest joint or crack, in any direction from the center of the load. Record the location and orientation of all sensors as measured radially outward from the center of the load, for example "300 mm (12 in.) ahead of the applied load". In accordance with the selected method of evaluating joint efficiency (or load transfer), the load(s) and deflection sensor(s)

<sup>4</sup> An example of this instrument is the Lacroix Deflectograph.

<sup>5</sup> Examples of this instrument are the Geolog Dynaflect and the Foundation Mechanics Road Rater, manufactured by Geolog Inc., 103 Industrial Blvd., Conroy, TX and Foundation Mechanics Inc., 421 E. El Segundo Blvd., El Segundo, CA 90245.

<sup>6</sup> Examples of this instrument are the Dynatest Falling Weight Deflectometer (FWD), the KUAB 2m-FWD, The Phoenix FWD, and the Jils FWD.

<sup>7</sup> Report SHRP-P-661 Manual for FWD Testing in the Long-Term Pavement Performance Study.



D 4695

should be properly positioned, for example with one or more sensors on each side of the joint and the load placed as close as possible to the “leave” (downstream) side of the joint in question. Failure to note the presence of joints and cracks within the zone of influence of the load could result in errors in estimating layer moduli through backcalculation, etc.

**7.1.4 Time of Test**—Record the date and time the measurements were obtained.

**7.1.5 Air and Pavement Temperatures**—At a minimum, record the pavement surface temperature at each test location to provide data for estimating the average temperature of the bound pavement layer(s). If needed for the analyses, the ambient air temperatures should also be recorded. In lieu of the ambient air temperature, some procedures use the five-day mean air temperature, that is, the sum of the high and low air temperatures for the five days immediately preceding testing, divided by ten to estimate the weighted average or mid-depth temperature of the bound layer(s). If feasible, pavement layer temperatures may be more accurately determined by drilling holes to various depths within the pavement layer(s), filling the bottom of these holes with glycerin or any other suitable liquid, and recording the temperature of the fluid at the desired depth. If testing is done for an extended period of time, take temperature measurements of the fluid every 1 to 2 h to establish a direct correlation between air, pavement surface, and depth temperature measurements. Often, temperature gradients may exist within PCC slabs that can cause curling or warping of the slabs, and thereby significantly affect the measured deflections. In these cases it may be necessary to monitor the temperatures within the slab (for example, with thermocouples), at the surface, mid-depth and bottom of a control slab.

**7.2 Test Method**—Depending on the type of apparatus, there are a number of test methods that can be applied. Steady state devices capable of variable loads and frequencies can be used to conduct “load sweeps” (multiple tests at various loads, at the same test location and frequency) or “frequency sweeps” (multiple tests at various frequencies, at the same test location and load). Impulse devices are typically capable of applying various loads, and some can control the shape and duration of the load pulse. Joint efficiency measurements on jointed PCC pavements can be made with devices equipped with multiple sensors by placing the load plate on one side of the joint and positioning sensors on both sides of the joint (see also 7.1.3).

**7.3 Testing Locations**—The test location and number of tests are dependent upon the testing level selected. Three suggested levels of testing are as follows:

**7.3.1 Level 1**—This test level provides for a general (for example, network) overview of pavement condition with limited testing. Testing should be performed at 200 to 500 m

(500 to 1500 ft) intervals, depending on specific pavement conditions, but a minimum of 5 to 10 tests per uniform pavement section are recommended to ensure a statistically significant sample. For AC and CRCP pavements, as a minimum, the load should be positioned along the outer wheel path, or alternatively along the centerline of CRCP slabs. For jointed PCC pavements, the load should first be positioned at or near the geometric center of the slab. For Level 1 testing, at least 5 % of the slabs covered should be tested at the joints as well, for deflection or load transfer efficiency.

**7.3.2 Level 2**—This test level provides for a more detailed analysis of the pavement, for example, for the purpose of overlay or rehabilitation design. Testing should be performed at 25 to 200 m (100 to 500 ft) intervals, depending on specific pavement conditions, with a minimum coverage of 10 to 20 tests recommended per uniform pavement section. For AC and CRCP pavements, as a minimum the load should be positioned along the outer wheel path, or alternatively along the centerline of CRCP slabs. For jointed PCC pavements, the load should first be positioned at or near the geometric center of the slab and then moved to the nearest joint and positioned along the same line, generally on the leave side of the joint. On roads, streets and highways, joint tests are often conducted along the outer wheel path. Generally, not every joint associated with each interior slab test is covered; however, a minimum joint coverage rate of 25 % is recommended. On airfield PCC pavements, joint efficiency measurements may be carried out on both transverse and longitudinal joints.

**7.3.3 Level 3**—This test level provides for a highly detailed or specific analysis of the pavement for purposes such as identifying localized areas of high deflection or detecting subsurface voids on PCC pavements. For AC or CRCP pavements, testing should be performed at 3 to 25 m (10 to 100 ft) intervals, along one or more test lines. On roads, streets and highways, testing is often carried out in both wheel paths. For jointed PCC pavements, the load should first be positioned at or near the geometric center of every slab along the length of the test section, and then moved to the nearest joint or crack on each slab, either along the outer wheel path or at the corner of the slab, or both. On airfield PCC pavements, joint efficiency measurements should be carried out on both transverse and longitudinal joints.

## 8. Keywords

8.1 Benkelman beam; deflection surveys; deflection testing; deflectograph; falling-weight deflectometer (FWD); heavy-weight deflectometer (HWD); impulse deflection testing device; load/deflection testing; nondestructive testing (NDT); pavement deflection; pavement testing; static deflection testing device; steady-state dynamic deflection testing device

*The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of the standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19380.*



## ANEXO B

*Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples,  $p_t = 2.5$*

Carga por eje		SN					
(kips)	(KN)	1.0 (25.4)	2.0 (50.8)	3.0 (76.2)	4.0 (101.6)	5.0 (127.0)	6.0 (152.4)
2	8.9	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004
4	17.8	.003	.004	.004	.003	.002	.002
6	26.7	.011	.017	.017	.013	.01	.009
8	35.6	.032	.047	.051	.041	.034	.031
10	44.5	.078	.102	.118	.102	.088	.080
12	53.4	.168	.198	.229	.213	.189	.176
14	62.3	.328	.358	.399	.388	.360	.342
16	71.2	.591	.613	.646	.645	.623	.606
18	80.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	89.0	1.61	1.57	1.49	1.47	1.51	1.55
22	97.9	2.48	2.38	2.17	2.09	2.18	2.30
24	106.8	3.69	3.49	3.09	2.89	3.03	3.27
26	115.7	5.33	4.99	4.31	3.91	4.09	4.48
28	124.6	7.49	6.98	5.90	5.21	5.39	5.98
30	133.5	10.3	9.5	7.9	6.8	7.0	7.8
32	142.4	13.9	12.8	10.5	8.8	8.9	10.0
34	151.3	18.4	16.9	13.7	11.3	11.2	12.5
36	160.0	24.0	22.0	17.7	14.4	13.9	15.5
38	169.1	30.9	28.3	22.6	18.1	17.2	19
40	178.0	39.3	35.9	28.5	22.5	21.1	23.0
42	186.9	49.3	45.0	35.6	27.8	25.6	27.7
44	195.8	61.3	55.9	44.0	34.0	31.0	33.1
46	204.7	75.5	68.8	54.0	41.4	37.2	39.3
48	213.6	92.2	83.9	65.7	50.1	44.5	46.5
50	222.5	112	102	79	60	53	55

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tandem,  $p_1 = 2.5$ 

Carga por eje (kips)	(KN)	SN					
		1.0 (25.4)	2.0 (50.8)	3.0 (76.2)	4.0 (101.6)	5.0 (127.0)	6.0 (152.4)
2	8.9	.0001	.0001	.0001	.0000	.0000	.0000
4	17.8	.0005	.0005	.0004	.0003	.0003	.0002
6	26.7	.002	.002	.002	.001	.001	.001
8	35.6	.004	.006	.005	.004	.003	.003
10	44.5	.008	.013	.011	.009	.007	.006
12	53.4	.015	.024	.023	.018	.014	.013
14	62.3	.026	.041	.042	.033	.027	.024
16	71.2	.044	.065	.07	.057	.047	.043
18	80.0	.070	.097	.109	.092	.077	.070
20	89.0	.107	.141	.162	.141	.121	.110
22	97.9	.160	.198	.229	.207	.180	.166
24	106.8	.231	.273	.315	.292	.260	.242
26	115.7	.327	.370	.420	.401	.364	.342
28	124.6	.451	.493	.548	.534	.495	.470
30	133.5	.611	.648	.703	.695	.658	.633
32	142.4	.813	.843	.889	.887	.857	.834
34	151.3	1.06	1.08	1.11	1.11	1.09	1.08
36	160.0	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	169.1	1.75	1.73	1.69	1.68	1.70	1.73
40	178.0	2.21	2.16	2.06	2.03	2.08	2.14
42	186.9	2.76	2.67	2.49	2.43	2.51	2.61
44	195.8	3.41	3.27	2.99	2.88	3.00	3.16
46	204.7	4.18	3.98	3.58	3.40	3.55	3.79
48	213.6	5.08	4.80	4.25	3.98	4.17	4.49
50	222.5	6.12	5.76	5.03	4.64	4.86	5.28
52	231.4	7.33	6.87	5.93	5.38	5.63	6.17
54	240.3	8.72	8.14	6.95	6.22	6.47	7.15
56	249.2	10.3	9.6	8.1	7.2	7.4	8.2
58	258.1	12.1	11.3	9.4	8.2	8.4	9.4
60	267.0	14.2	13.1	10.9	9.4	9.6	10.7
62	275.9	16.5	15.3	12.6	10.7	10.8	12.1
64	284.7	19.1	17.6	14.5	12.2	12.2	13.7
66	293.6	22.1	20.3	16.6	13.8	13.7	15.4
68	302.5	25.3	23.3	18.9	15.6	15.4	17.2
70	311.4	29.0	26.6	21.5	17.6	17.2	19.2
72	320.3	33.0	30.3	24.4	19.8	19.2	21.3
74	329.2	37.5	34.4	27.6	22.2	21.6	23.6
76	338.1	42.5	38.9	31.1	24.8	23.7	26.1
78	347.0	48.0	43.9	35.0	27.8	26.2	28.8
80	355.9	54.0	49.4	39.2	30.9	29.0	31.7
82	364.8	60.6	55.4	43.9	34.4	32.0	34.8
84	373.7	67.8	61.9	49.0	38.2	35.3	38.1
86	382.6	75.7	69.1	54.5	42.3	38.8	41.7
88	391.5	84.3	76.9	60.6	46.8	42.6	45.6
90	400.4	93.7	85.4	67.1	51.7	46.8	49.7

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes ínteros,  $pt = 2.5$ 

Carga por eje		SN					
(kips)	(KN)	pulg		(mm)			
		1.0 (25.4)	2.0 (50.8)	3.0 (76.2)	4.0 (101.6)	5.0 (127.0)	6.0 (152.4)
2	8.9	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
4	17.8	.0002	.0002	.0002	.0001	.0001	.0001
6	26.7	.0006	.0007	.0005	.0004	.0003	.0003
8	35.6	.001	.002	.001	.001	.001	.001
10	44.5	.003	.004	.003	.002	.002	.002
12	53.4	.005	.007	.006	.004	.003	.003
14	62.3	.008	.012	.01	.008	.006	.006
16	71.2	.012	.019	.018	.013	.011	.010
18	80.0	.018	.029	.028	.021	.017	.016
20	89.0	.027	.042	.042	.032	.027	.024
22	97.9	.038	.058	.060	.048	.040	.036
24	106.8	.053	.078	.084	.068	.057	.051
26	115.7	.072	.103	.114	.095	.080	.072
28	124.6	.098	.133	.151	.128	.109	.099
30	133.5	.129	.169	.195	.170	.145	.133
32	142.4	.169	.223	.247	.220	.191	.175
34	151.3	.219	.266	.308	.281	.246	.228
36	160.0	.279	.329	.379	.352	.313	.292
38	169.1	.352	.403	.461	.436	.393	.368
40	178.0	.439	.491	.554	.533	.487	.459
42	186.9	.543	.594	.661	.644	.597	.567
44	195.8	.666	.714	.781	.769	.723	.692
46	204.7	.811	.854	.918	.911	.868	.838
48	213.6	.979	1.015	1.072	1.069	1.033	1.005
50	222.5	1.17	1.20	1.24	1.25	1.22	1.20
52	231.4	1.40	1.41	1.44	1.44	1.43	1.41
54	240.3	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	249.2	1.95	1.93	1.90	1.90	1.91	1.93
58	258.1	2.29	2.25	2.17	2.16	2.20	2.24
60	267.0	2.67	2.60	2.48	2.44	2.51	2.58
62	275.9	3.09	3.00	2.82	2.76	2.85	2.95
64	284.7	3.57	3.44	3.19	3.10	3.22	3.36
66	293.6	4.11	3.94	3.61	3.47	3.62	3.81
68	302.5	4.71	4.49	4.06	3.88	4.05	4.30
70	311.4	5.38	5.11	4.57	4.32	4.52	4.84
72	320.3	6.12	5.79	5.13	4.8	5.03	5.41
74	329.2	6.93	6.54	5.74	5.32	5.57	6.04
76	338.1	7.84	7.37	6.41	5.88	6.15	6.71
78	347.0	8.83	8.28	7.14	6.49	6.78	7.43
80	355.9	9.92	9.28	7.95	7.15	7.45	8.21
82	364.8	11.1	10.4	8.8	7.9	8.2	9.0
84	373.7	12.4	11.6	9.8	8.6	8.9	9.9
86	382.6	13.8	12.9	10.8	9.5	9.8	10.9
88	391.5	15.4	14.3	11.9	10.4	10.6	11.9
90	400.4	17.1	15.8	13.2	11.3	11.6	12.9

*Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples,  $p_t = 3.0$*

Carga por eje		SN					
(kips)	(KN)	1.0 (25.4)	2.0 (50.8)	3.0 (76.2)	4.0 (101.6)	5.0 (127.0)	6.0 (152.4)
2	8.9	.0008	.0009	.0006	.0003	.0002	.0002
4	17.8	.004	.008	.006	.004	.002	.002
6	26.7	.014	.030	.028	.018	.012	.010
8	35.6	.035	.070	.080	.055	.040	.034
10	44.5	.082	.132	.168	.132	.101	.086
12	53.4	.173	.231	.296	.260	.212	.187
14	62.3	.332	.388	.468	.447	.391	.358
16	71.2	.594	.633	.695	.693	.651	.622
18	80.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	89.0	1.60	1.53	1.41	1.38	1.44	1.51
22	97.9	2.47	2.29	1.96	1.83	1.97	2.16
24	106.8	3.67	3.33	2.69	2.39	2.6	2.96
26	115.7	5.29	4.72	3.65	3.08	3.33	3.91
28	124.6	7.43	6.56	4.88	3.93	4.17	5.00
30	133.5	10.2	8.9	6.5	5.0	5.1	6.3
32	142.4	13.8	12.0	8.4	6.2	6.3	7.7
34	151.3	18.2	15.7	10.9	7.8	7.6	9.3
36	160.0	23.8	20.4	14.0	9.7	9.1	11.0
38	169.1	30.6	26.2	17.7	11.9	11.0	13.0
40	178.0	38.8	33.2	22.2	14.6	13.1	15.3
42	186.9	48.8	41.6	27.6	17.8	15.5	17.8
44	195.8	60.6	51.6	34.0	21.6	18.4	20.6
46	204.7	74.7	63.4	41.5	26.1	21.6	23.8
48	213.6	91.2	77.3	50.3	31.3	25.4	27.4
50	222.5	110	94	61	37	30	32

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem,  $p_1 = 3.0$ 

Carga por eje		SN					
(kips)	(KN)	1.0 (25.4)	2.0 (50.8)	3.0 (76.2)	4.0 (101.6)	5.0 (127.0)	6.0 (152.4)
2	8.9	.0002	.0002	.0001	.0001	.0000	.0000
4	17.8	.001	.001	.001	.000	.000	.000
6	26.7	.003	.004	.003	.002	.001	.001
8	35.6	.006	.011	.009	.005	.003	.003
10	44.5	.011	.024	.020	.012	.008	.007
12	53.4	.019	.042	.039	.024	.017	.014
14	62.3	.031	.066	.068	.045	.032	.026
16	71.2	.049	.096	.109	.076	.055	.046
18	80.0	.075	.134	.164	.121	.090	.076
20	89.0	.113	.181	.232	.182	.139	.119
22	97.9	.166	.241	.313	.260	.205	.178
24	106.8	.238	.317	.407	.358	.292	.257
26	115.7	.333	.413	.517	.476	.402	.360
28	124.6	.457	.534	.643	.614	.538	.492
30	133.5	.616	.684	.788	.773	.702	.656
32	142.4	.817	.870	.956	.953	.896	.855
34	151.3	1.07	1.10	1.15	1.15	1.12	1.09
36	160.0	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	169.1	1.75	1.71	1.64	1.62	1.66	1.70
40	178.0	2.21	2.11	1.94	1.89	1.98	2.08
42	186.9	2.75	2.59	2.29	2.19	2.33	2.50
44	195.8	3.39	3.15	2.70	2.52	2.71	2.97
46	204.7	4.15	3.81	3.16	2.89	3.13	3.50
48	213.6	5.04	4.58	3.70	3.29	3.57	4.07
50	222.5	6.08	5.47	4.31	3.74	4.05	4.70
52	231.4	7.27	6.49	5.01	4.24	4.57	5.37
54	240.3	8.65	7.67	5.81	4.79	5.13	6.10
56	249.2	10.2	9.0	6.7	5.4	5.7	6.9
58	258.1	12.0	10.6	7.7	6.1	6.4	7.7
60	267.0	14.1	12.3	8.9	6.8	7.1	8.6
62	275.9	16.3	14.3	10.2	7.7	7.8	9.5
64	284.7	18.9	16.4	11.6	8.6	8.6	10.5
66	293.6	21.8	18.9	13.2	9.6	9.5	11.6
68	302.5	25.1	21.7	15.0	10.7	10.5	12.7
70	311.4	28.7	24.7	17.0	12.0	11.5	13.9
72	320.3	32.7	28.1	19.2	13.3	12.6	15.2
74	329.2	37.2	31.9	21.6	14.8	13.8	16.5
76	338.1	42.1	36.0	24.3	16.4	15.1	17.9
78	347.0	47.5	40.6	27.3	18.2	16.5	19.4
80	355.9	53.4	45.7	30.5	20.1	18.0	21.0
82	364.8	60.0	51.2	34.0	22.2	19.6	22.7
84	373.7	67.1	57.2	37.9	24.6	21.3	24.5
86	382.6	74.9	63.8	42.1	27.1	23.2	26.4
88	391.5	83.4	71.0	46.7	29.8	25.2	28.4
90	400.4	92.7	79.8	51.7	32.7	27.4	30.5