

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA



TRABAJO DE GRADO

“Estudio comparativo del desempeño estructural y funcional post construcción de los pavimentos flexibles reciclados con cemento en El Salvador”

Presentado por:

Douglas Ernesto Aquino Colorado

Aldo Aníbal Castillo Mojica

José Manuel Mejía Linares

Para optar al grado de:

Ingeniero Civil

Docente Director

Ing. y Lic. Rafael Arturo Colón Villalta.

Junio 2,013

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA



TRABAJO DE GRADO

“Estudio comparativo del desempeño estructural y funcional post construcción de los pavimentos flexibles reciclados con cemento en El Salvador”

Presentado por:

Douglas Ernesto Aquino Colorado

Aldo Aníbal Castillo Mojica

José Manuel Mejía Linares

Para optar al grado de:

Ingeniero Civil

Docente Director

Ing. y Lic. Rafael Arturo Colón Villalta.

Asesor:

Ing. Rafael Alejandro González Magaña

Santa Ana, 07 de junio de 2,013

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

ING. MARIO ROBERTO LOVO

VICERRECTORA ACADÉMICA:

MAESTRA ANA MARÍA GLOWER DE ALVARADO

SECRETARIA GENERAL:

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FISCAL:

LICDO. FRANCISCO CRUZ LETONA

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE

DECANO:

LICDO. RAÚL ERNESTO AZCÚNAGA LÓPEZ

VICEDECANO:

ING. WILLIAM VIRGILIO ZAMORA GIRÓN

SECRETARIO:

LICDO. VÍCTOR HUGO MERINO QUEZADA

JEFA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ING. MS. SORAYA LISSETTE BARRERA DE GARCÍA

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Director:

ING. Y LIC. RAFAEL ARTURO COLÓN VILLALTA.

DEDICATORIA:

Agradezco a DIOS TODOPODEROSO, por permitirme alcanzar este paso importante en mi vida, regalándome la sabiduría y fuerzas necesarias para afrontar cada reto que se me ha presentado y por qué siempre ha estado junto a mí, brindándome todo su amor y misericordia.

GLORIA LA PADRE, AL HIJO Y AL ESPIRITU SANTO COMO ERA EN UN PRINCIPIO AHORA Y SIEMPRE POR LOS SIGLOS DE LOS SIGLOS. AMÉN.

DEDICO ESTE TRUINFO A MI FAMILIA, a mi madre Maura del Carmen Mojica Moza, por estar en todos los momentos dándome fuerza y realizando un sacrificio tan grande para que pudiera cumplir mi sueño, siendo una gran mujer y enseñarme el camino correcto y a confiar siempre en DIOS, te amo madrecita con todas mis fuerzas, a mi padre Francisco Antonio Castillo Aguilar por apoyarme y animarme a luchar por cumplir mis sueños, a mis hermanos Roberto Carlos Castillo Mojica, Carmen Magaly Mojica, Jackeline Beatriz Rosales Mojica(QEPD) que me han dado todo su apoyo y amor y siempre han estado en esos momentos difíciles, a mi tía Rosy Mojica Moza por ser mi segunda madre y apoyarme con mucho amor.

DEDICO ESTE ÉXITO A UNA PERSONA MUY IMPORTANTE: Roxana Ivonne Ochoa López, porque apareciste en mi vida y te convertiste en un gran apoyo y me has dado muchas fuerzas para que logre terminar este bonito sueño dándome ese ánimo por hacer siempre lo correcto y reconocer que todo viene de DIOS.

DAR LAS GRACIAS A MIS COMPAÑEROS: José Manuel Mejía Linares, Douglas Ernesto Aquino Colorado que hemos trabajado para ver terminar esta etapa de nuestras vidas.

A MIS AMIGOS: Erick Iván López Rivas, Elisa Figueroa, Tatiana María Quiteño, Bilbao Alfredo Melara, Eric Ricardo Hernández, Guillermo Canales Mancía, Edgardo Sánchez Cruz, Héctor Arnulfo Parada, Gerber Enrique Escobar, por compartir horas de estudio y de diversión que lograron hacer más fácil cada prueba.

ALDO ANÍBAL CASTILLO MOJICA

DEDICATORIA:

Primero darle gracias a Dios Todopoderoso que sin el nada de esto hubiese sido posible dando me fuerzas en los momentos de prueba, a mamita María que siempre ha estado iluminando mi camino.

A mis padres Ernesto Aquino y Lidia de Aquino que fueron los pilares fundamentales del culmen de mi carrera, han estado ahí apoyandome en todo momento y son modelos de perseverancia y honor.

A mis hermanos Luis Mario y Nathalie que siempre me han ayudado en todo, por soportar mis enojos y momentos de angustia.

A mi familia que siempre me han dado palabras de apoyo y muestras de sinceridad.

A mis compañeros de tesis pero sobre todo amigos y hermanos Aldo y José, en los cuales hemos pasado buenos y malos momentos pero sin perder de vista el objetivo principal el cual es ser excelentes profesionales con ética y habilidades para enfrentar los problemas que se presenten en la vida profesional.

A mis amigos, Erick Iván López, Elisa Figueroa, Blanca García, Tania Díaz, Tatiana Quiteño, Guillermo Canales, y a mis compañeros con quienes he compartido excelentes momentos dentro y fuera de la universidad y que han vuelto amena la estadía dentro de la Universidad.

A los Ingenieros Asesores y docentes que contribuyeron en mi formación profesional y a los que aportaron de una u otra manera agradecimientos totales.

Y por último quiero dedicar este logro a una persona que siempre estuvo pendiente de mí, que sé que desde el cielo estará muy orgullosa de mi, mi abuela Margarita Alvarado (QEPD), este logro va para ti abuelita, mamalita.

Douglas Ernesto Aquino.

DEDICATORIA:

Agradecer a Dios todo poderoso por permitir y guiarme hasta lograr este sueño y por poner a personas tan especiales en mi camino para llenar de alegría cada uno de los momentos que viví desde que inicie mis estudios. Agradecer a mi mamá Virginia del Carmen Linares de Mejía por sacrificarse por mí, por tratar que mi atención estuviera siempre enfocada en estudiar, por preocuparse, por momentos más que yo mismo, por mi salud y mi bienestar en todo momento y recordarme que el único que hace posible cualquier victoria es Dios, a mi papá Víctor Manuel Mejía Peñate por apoyarme en mis sueños, por alentarme a pensar en grande, por enseñarme que la vida es dura y prepararme para encararla con valor, mi hermana Marcela del Carmen Mejía Linares que siempre está conmigo por inspirarme a esforzarme cada día a ser mejor y a superar cualquier problema que se ponga en frente, a mi novia Leydi Elizabeth Ruiz Canales por enseñarme que los problemas se deben enfrentar y no fingir que no existen, enseñarme que no siempre tengo la razón y que la humildad es muy importante para ser feliz, a mis amigos y compañeros de tesis Aldo Aníbal Castillo Mojica y Douglas Ernesto Aquino Colorado por hacer más fácil las pruebas en la Universidad y ayudarme a que a pesar de lo complicado que se tornaron las cosas en muchos momentos nunca perdiéramos el buen humor y el optimismo, por ser con quienes compartí la mayor parte de mi tiempo en estos últimos 6 años, a todos mis amigos con quienes los días en la Universidad se hicieron mucho más amenos, Erick Iván López Rivas, Eric Ricardo Hernández, Tatiana María Quiteño Gutiérrez, Edgardo Ernesto Sánchez Cruz, Bilbao Alfredo Melara, Guillermo Canales Mancía. Infinitamente gracias y que Dios los bendiga a todos por ser las personas que son, y que Dios mismo nos permita disfrutar juntos de los frutos de los esfuerzos que juntos hemos cosechado.

José Manuel Mejía Linares

Agradecimientos especiales

Le agradecemos al Ing. Rafael Colón Villalta por acompañarnos en este proceso como docente director y por lo cual ayudarnos con todos sus conocimientos para enriquecer el trabajo de grado. Muchas gracias y éxito en todas sus labores.

Al Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto “ISCYC” por el apoyo total en todo el tiempo para el buen desarrollo del trabajo de investigación mediante del ingeniero Carlos Antonio Quintanilla Rodríguez quien fue un importante guía para establecer los lineamientos y objetivos del proyecto.

Agradecer al Ing. Rafael Alejandro González Magaña por su apoyo a incorporarse como nuevo asesor y así definir las pautas necesarias para la finalización del trabajo de grado.

Agradecimiento al Ministerio de Obras Públicas, especialmente a la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial. MOP – UIDV, por su importante colaboración para la implementación y Desarrollo así como la facilitación de la información.

Ing. Edwin Alvarenga.

Índice

INTRODUCCIÓN	21
CAPITULO I GENERALIDADES.....	23
1.0 TITULO	23
1.1 ANTECEDENTES	23
1.1.1 ANTECEDENTES EN EL SALVADOR	26
1.2 DESCRIPCIÓN DEL TEMA.	28
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	29
1.4 JUSTIFICACIÓN	30
1.5 OBJETIVOS	32
1.6 ALCANCES	33
1.7 LIMITACIONES.....	34
CAPITULO II MARCO TEORICO	35
2.1 DEFINICIÓN DE PAVIMENTO	35
2.2 ELEMENTOS QUE INTEGRAN LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO.	35
2.2.1 SUBRASANTE	35
2.2.2 SUB-BASE	36
2.2.3 BASE	37
2.2.4 CAPA DE RODAMIENTO	37
2.3 TIPOS DE PAVIMENTOS.....	38
2.3.1 PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	38
2.3.1.1 TIPO DE DAÑOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	39
2.3.2 METODOS DE RECICLADO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES	49
2.3.2.1 RECICLAJE SUPERFICIAL.....	50
2.3.2.2 RECICLAJE EN EL LUGAR (IN SITU)	52
2.3.2.3 RECICLAJE EN PLANTA (EN CALIENTE)	53
2.3.3 RECICLADO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON CEMENTO	55
2.4 PERFILOMETRÍA LASER.....	60
2.4.1 INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)	63
2.4.1.1 EL MODELO DEL CUARTO DE CARRO (QUARTER CAR)	68
2.5 DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO	73
2.5.1 EQUIPO REPRESENTATIVOS PARA MEDICIÓN DE DEFLECTOMETRÍA	75

2.5.1.1	VIGA BENKELMAN (carga estática).....	75
2.5.1.2	DEFECTÓGRAFO LACROIX.....	76
2.5.1.3	DEFLECTOMETRO DE IMPACTO.....	77
2.5.2	CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES DE LAS CAPAS	82
2.5.2.1	DEFLEXIÓN MAXIMA (do)	83
2.5.2.2	MÓDULO RESILIENTE (MR).....	84
2.5.2.3	NÚMERO ESTRUCTURAL. (SN).....	89
2.6	AHUELLAMIENTO	90
2.6.1	TIPOS DE AHUELLAMIENTO.....	91
2.6.1.1	AHUELLAMIENTO EN LA CAPA ASFÁLTICA.....	91
2.6.1.2	AHUELLAMIENTO PRODUCIDO EN CAPAS SUBYACENTES.....	91
2.6.2	CAUSAS DEL AHUELLAMIENTO.....	93
2.6.2.1	ALTAS TEMPERATURAS.....	94
2.6.2.2	CARGAS PESADAS	95
2.6.2.3	CIRCULACIÓN A BAJAS VELOCIDADES	95
2.6.2.4	EFECTO DEL TIPO DE ASFALTO	96
2.6.2.5	EFECTO DEL AGREGADO.....	96
CAPITULO III MARCO METODOLOGICO.....		99
3.1	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE LA PERFILOMETRÍA LASSER	99
3.1.1	METODOLOGÍA DEL PROCESO DEL LEVANTAMIENTO DE CAMPO	103
3.1.2	METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.	104
3.2	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO	105
3.2.1	METODOLOGÍA DE RECOLECCIÓN DEL LEVANTAMIENTO DE CAMPO.....	124
3.2.2	METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	126
CAPITULO IV RESUMEN DE “ANÁLISIS COMPARATIVO ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL POST CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES RECICLADOS CON CEMENTO EN EL SALVADOR (ETAPA 1)”.....		129
4.1	GENERALIDADES	129
4.2	CARRETERA LITORAL (CA-02W). DESVÍO A PUERTO DE ACAJUTLA Y DESVÍO PUERTO DE LA LIBERTAD 130	
4.2.1	ANÁLISIS FUNCIONAL.....	132
4.2.2	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	136
4.3	RUTA RN-04 TRAMO SAN MARCOS–ZACATECOLUCA.....	137
4.3.1	ANÁLISIS FUNCIONAL.....	139
4.3.2	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	143

4.4	CARRETERA LITORAL (CA-02E), TRAMO COMALAPA – ZACATECOLUCA.....	143
4.4.1	ANÁLISIS FUNCIONAL.....	145
4.4.2	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	150
4.5	CARRETERA LITORAL (CA-02E), TRAMO USULUTÁN – EL DELIRIO.....	156
4.5.1	ANÁLISIS FUNCIONAL.....	157
4.5.2	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	161
4.6	CARRETERA LITORAL (CA-02E), TRAMO EL DELIRIO- LA UNIÓN	162
4.7	CARRETERA LITORAL (CA-02E), TRAMO EL DELIRIO- LA UNIÓN	163
4.7.1	ANÁLISIS FUNCIONAL.....	164
4.7.2	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	167
4.8	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE CARRETERAS SELECCIONADAS	169
CAPITULO V OBTENCIÓN DE DATOS		175
5.1	DESCRIPCIÓN DEL TRAMO COMALAPA-ZACATECOLUCA	175
5.1.1	INSPECCIÓN VISUAL	181
5.1.2	MICROPAVIMENTO.....	183
5.2	TRABAJO DE CAMPO CON PERFILÓMETRO LASER	185
5.2.1	RESULTADOS OBTENIDOS	186
5.2.1.1	RESULTADOS DE ENSAYOS CON PERFILÓMETRO LASSER	188
5.2.1.2	REGISTROS DE IRI.....	188
5.2.1.3	REGISTROS DE AHUELLAMIENTO	190
5.3	TRABAJO DE CAMPO CON DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD).....	191
5.3.1	RESULTADOS OBTENIDOS	198
5.3.1.1	REGISTROS DE DEFLEXIONES.....	199
CAPITULO VI RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		202
6.1	RESULTADOS DE LA PERFILOMETRÍA.....	202
6.2	INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)	202
6.2.1	ANÁLISIS DEL IRI CARRIL DERECHO	204
6.2.2	ANÁLISIS DEL IRI CARRIL IZQUIERDO	207
6.3	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE CARRILES	210
6.4	ANÁLISIS DE LA CONDICIÓN FUNCIONAL DEL TRAMO COMALAPA – ZACATECOLUCA.....	212
6.5	AHUELLAMIENTO	213
6.6	RESULTADOS DE LA DEFLECTOMETRÍA. DE IMPACTO.....	218
6.6.1	MÓDULO RESILIENTE	218
6.6.2	CALCULO DE EL MODULO EFECTIVO DEL PAVIMENTO (EP).....	241

6.6.3	CALCULO DEL NÚMERO ESTRUCTURAL	249
6.6.4	CALCULO DE MR DE DISEÑO	256
6.7	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	258
6.7.1	MÓDULO RESILIENTE	259
6.7.1.1	MÓDULO RESILIENTE CARRIL IZQUIERDO (MR)	260
6.7.1.2	MÓDULO RESILIENTE CARRIL DERECHO (MR).....	262
6.7.2	MÓDULO EFECTIVO DEL PAVIMENTO	264
6.7.2.1	MODULO EFECTIVO DEL PAVIMENTO CARRIL IZQUIERDO.....	264
6.7.2.2	MODULO EFECTIVO DEL PAVIMENTO CARRIL DERECHO	266
6.7.3	NUMERO ESTRUCTURAL	267
6.7.3.1	NUMERO ESTRUCTURAL CARRIL IZQUIERDO. (S _{Neff}).....	268
6.7.3.2	NUMERO ESTRUCTURAL CARRIL DERECHO (S _{Neff})	270
6.7.4	ANÁLISIS DEFLEXIÓN MÁXIMA.....	271
6.7.4.1	DEFLEXIÓN MAXIMA CARRIL IZQUIERDO. (do).....	272
6.7.4.2	DEFLEXIÓN MAXIMA CARRIL DERECHO. (do)	273
6.7.5	ANÁLISIS ESTRUCTURAL COMPARATIVO ENTRE CARRILES	275
6.7.6	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PROYECTO	276
CAPITULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		277
7.1	CONCLUSIONES.....	277
7.2	RECOMENDACIONES	282
BIBLIOGRAFÍA.....		284
ANEXOS.....		286

Índice de Figuras

CAPITULO II MARCO TEORICO	35
Figura 2.1 Sección típica de un pavimento flexible.....	38
Figura 2.2 Agrietamiento Superficial.....	39
Figura 2.3 Agrietamiento.	40
Figura 2.4 agrietamiento.	40
Figura 2.5 Agrietamiento Profundo.	41
Figura 2.6 reflejo en Juntas y Grietas.	42
Figura 2.7 reciclado con cemento.	60

Figura 2.8 medición de la regularidad de un pavimento.	65
Figura 2.9 modelo del cuarto de carro (quarter car), fuente Benjamin Soto Nuñez, Control de Calidad en Pavimentos, Tesis.	69
Figura 2.10 valores del Índice de Rugosidad Internacional (IRI). Fuente CM ingenieros.	71
Figura 2.11 Viga benkelman para medición de Deflectometría.	76
Figura 2.12 Deflectógrafo Lacroix.	77
Figura 2.13 Deflectómetro de impacto (FWD) DYNATEST MODELO 8000. "MOP-UIDV"	79
Figura 2.14 Aplicación de carga del deflectómetro de impacto fwd dynatest 8000	80
Figura 2.15 Deflectómetro de impacto (FWD) marca dynatest 8000.	80
Figura 2.16 Prueba de deflexión por impacto.	83
Figura 2.17 Deflexión máxima Do, valor registrado exactamente abajo el plato de carga.	84
Figura 2.18 Esquema de medición de deflexiones con Deflectómetro de Impactos.	86
Figura 2.19 ahuellamiento.	90
Figura 2.20 ahuellamiento superficial presente en la capa asfáltica.	91
Figura 2.21 ahuellamiento en capas subyacentes.	92
Figura 2.22 Modelo reológico del comportamiento de materiales viscoelásticos.	93
Figura 2.23 medición de ahuellamiento manual.	94
Figura 2.24 vehículo cargado excesivamente.	95
Figura 2.25 Granulometría para tráfico pesado y moderado. Banda Superpave TM 19 Fuente: Análisis de casos de Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas Chilenas. Santiago, Chile. 2002.	97
Figura 2.26 Variación de densidad y contenido de vacíos en la mezcla asfáltica Fuente: Análisis de casos de Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas Chilenas. Santiago, Chile. 2002	98
CAPITULO III MARCO METODOLOGICO.	99
Figura 3.1 detalle de toma de medidas con perfilómetro laser.	104
Figura 3.2 Determinación de Ep/ MR	122
Figura 3.3 SNeff método NDT.	124
Figura 3.4 detalle de toma de medidas con deflectómetro de impacto.	125
CAPITULO IV RESUMEN DE "ANÁLISIS COMPARATIVO ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL POST CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES RECICLADOS CON CEMENTO EN EL SALVADOR (ETAPA 1)"	129
Figura 4.1 equipo para la realización del ensayo de velocidad de pulso.	150
CAPITULO V OBTENCIÓN DE DATOS	175
Figura 5.1 tramo Comalapa hacia Zacatecoluca que corresponde al tramo en estudio, que comprende del kilómetro 45 al kilómetro 47.5.	180
Figura 5.2 Efecto de la regularidad superficial en el confort sentido por los usuarios de la ruta	185

Figura 5.3. Perfilómetro Láser.....	186
Figura 5.4 Equipo de deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer)	193

Índice de Tablas

CAPITULO II MARCO TEORICO	35
Tabla 2.1 Fallas en pavimentos flexibles-deformaciones	45
Tabla 2.2 Fallas en pavimentos flexibles-deformaciones	46
Tabla 2.3 Fallas en pavimentos flexibles-deformaciones	48
Tabla 2.4 Fallas en pavimentos flexibles-deformaciones	48
Tabla. 2.5 valores de PSI para la evaluación funcional del pavimento.....	64
Tabla 2.6 de valores del PCI con su correspondiente descripción cualitativa de la condición del pavimento.	66
Tabla 2.7 Condiciones del pavimento según IRI.	72
Tabla 2.8 cuadro comparativo PSI-IRI	73
Tabla 2.9, valores de carga de los diferentes tipos de deflectómetro.	78
Figura 2.24 vehículo cargado excesivamente.	95
CAPITULO III MARCO METODOLOGICO.....	99
Tabla 3.1. Intervalos longitudinales de almacenamiento de datos.....	100
Tabla 3.2 Resolución en mediciones verticales.	101
Tabla 3.3 requerimientos de precisión.....	102
Tabla 3.4 calibración de celda de carga.....	111
Tabla 3.5 desviación de frecuencia.	112
CAPITULO IV RESUMEN DE “ANÁLISIS COMPARATIVO ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL POST CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES RECICLADOS CON CEMENTO EN EL SALVADOR (ETAPA 1)”	129
Tabla 4.1 Datos generales CARRETERA LITORAL (CA-02W)	131
Tabla 4.2 Análisis de daños en carretera sección Acajutla – La Libertad.....	132
Tabla 4.3 Resistencia a la compresión sección Acajutla – La Libertad.....	136
Tabla 4.4 Datos generales Ruta RN-04, Tramo San Marcos – Zacatecoluca.	138
Tabla 4.5 Análisis de daños en carretera sección San Marcos – Zacatecoluca	139
Tabla 4.6 Carretera Litoral (CA-02E), tramo Comalapa – Zacatecoluca.....	144
Tabla 4.7 PCI tramo Comalapa - Zacatecoluca.....	145
Tabla 4.8 Análisis de daños en carretera sección Comalapa - Zacatecoluca	146

Tabla 4.9 resultados de la prueba de velocidad de pulso.....	151
Tabla 4.10 resultados de la resistencia a la compresión carretera CA-02E Litoral Comalapa – Zacatecoluca.....	152
Tabla 4.11 valores de resistencia y módulo elástico dinámico.	153
Tabla 4.12 valores de resistencia de diseño vrs resistencia 2011	155
Tabla 4.13 Carretera Litoral (CA-02E), tramo Usulután- El Delirio	156
Tabla 4.14 Análisis de daños en carretera sección Usulután - El Delirio.	157
Tabla 4.15 resultados de la resistencia a la compresión carretera CA-02E Litoral Usulután–El Delirio.	161
Tabla 4.16 Carretera Litoral (CA-02E), tramo Delirio – La Unión.....	163
Tabla 4.17 Análisis de daños en carretera sección El delirio - La Unión	164
Tabla 4.18 resultados de la resistencia a la compresión carretera CA-02E Litoral El Delirio – La Unión.....	168
Tabla 4.19 Resumen analítico de carreteras seleccionadas.....	169
Tabla 4.20 Análisis comparativo entre carreteras.	172
CAPITULO V OBTENCIÓN DE DATOS	175
Tabla No. 5.1 Análisis, Alternativa Propuesta	176
Tabla No. 5.2 Recomendaciones, Alternativa Usada	177
Tabla 5.3 703-8 Slurry Seal and Micro-Surfacing Aggregate Gradation and Application Rates.....	178
Tabla 5.4 inspección visual.	182
Tabla 5.5, valores de IRI obtenidos mediante el uso del perfilómetro inercial lasser	189
Tabla 5.6 datos de ahuellamiento obtenidos mediante el uso del perfilómetro inercial laser.	190
Tabla 5.7 deflexiones obtenidas mediante el uso del deflectómetro de impacto.....	200
CAPITULO VI RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	202
Tabla 6.1. Valor de IRI en cada estacionamiento.	203
Tabla 6.2 ahuellamiento	215
Tabla 6.3 Calificación de carretera según su ahuellamiento.....	217
Tabla 6.4 resumen de las deflexiones en pulgadas, (dr).	226
Tabla 6.5 radio de Centro de la Carga hasta el punto de medición.....	227
Tabla 6.6 resumen de módulo resiliente para cada punto de análisis.	228
Tabla 6.7 resumen de MR*do/P	235
Tabla 6.8 EP/MR de cada punto evaluado.....	237
Tabla 6.9 de ae de cada punto evaluado.....	238
Tabla 6.10 valores de la $0.7*ae$	239
Tabla 6.11 valores que cumple con $r \geq 0.7ae$	240
Tabla 6.12 resumen de los valores de EP.	243

Tabla 6.14 módulo resiliente de diseño (MRc)	257
Tabla 6.15 clasificación según su valor del número estructural para análisis estructural.	267

Índice de Gráficos

CAPITULO IV RESUMEN DE “ANÁLISIS COMPARATIVO ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL POST CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES RECICLADOS CON CEMENTO EN EL SALVADOR (ETAPA 1)”	129
Gráfico 4.1 Análisis de PCI versus porcentaje de daños por tramos.	133
Gráfico 4.2 Representación de daños de acuerdo a sus niveles de severidad en la vía.	134
Gráfico 4.3 Representación de daños en área con su respectivo porcentaje en la vía.	135
Gráfico 4.4 Resistencia a la compresión sección Acajutla – La Libertad.....	136
Gráfico 4.5 Análisis de PCI versus porcentaje de daños por tramos.	140
Gráfico 4.6 Representación de daños de acuerdo a sus niveles de severidad en la vía.	141
Gráfico 4.7 Representación de daños en área con su respectivo porcentaje en la vía.	142
Gráfica 4.8. Análisis de PCI versus porcentaje de daños por tramos.	147
Gráfico 4.9. Representación de daños de acuerdo a sus niveles de severidad en la vía.	148
Gráfico 4.10. Representación de daños en área con su respectivo porcentaje en la vía.	149
Gráfico 4.11 valores de resistencia a la compresión CA-02E Comalapa – Zacatecoluca.	153
Gráfico 4.12 valores de resistencia y módulo elástico dinámico.	154
Gráfico 4.13 valores de resistencia de diseño vrs resistencia 2011.	155
Gráfico 4.14 Análisis de PCI versus porcentaje de daños por tramos.	158
Gráfico 4.15 Representación de daños de acuerdo a sus niveles de severidad en la vía.	159
Gráfico 4.16. Representación de daños en área con su respectivo porcentaje en la vía.	160
Gráfico 4.17 Resistencia a la compresión sección Usulután – El Delirio.....	161
Gráfico 4.18 Análisis de PCI versus porcentaje de daños por tramos.	165
Gráfico 4.19 Representación de daños de acuerdo a sus niveles de severidad en la vía.	166
Gráfico 4.20 Representación de daños en área con su respectivo porcentaje en la vía.	167
Gráfico 4.21 Resistencia a la compresión sección El Delirio – La Unión.	168
Gráfico 4.22 Comparación de PCI entre carreteras.	170
Gráfico 4.23 Comparación de total de daños entre carreteras.	172
Gráfico 4.24 Área daños en que afectan las carreteras seleccionadas en m ²	173
CAPITULO VI RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	202

Gráfico 6.1 IRI para rodera derecha, lateral derecho.	204
Gráfico 6.2 IRI rodera izquierda lateral derecho.	205
Gráfico 6.3 valor promedio IRI correspondiente al carril derecho que va de Comalapa a Zacatecoluca. 206	206
Gráfico 6.4 IRI rodera derecha carril izquierdo.....	207
Gráfico 6.5. IRI rodera derecha carril izquierdo.....	208
Gráfico 6.6 IRI carril izquierdo que conduce de Zacatecoluca a Comalapa.	209
Gráfico 6.7 índice de Rugosidad Internacional comparativo entre carriles.....	211
Gráfico 6.8 ahuellamiento comparativo entre carriles	216
Gráfico 6.9 módulo resiliente correspondiente al MR ₃₀	229
Gráfico 6.10 módulo resiliente correspondiente al MR60.	230
Gráfico 6.11 módulo resiliente correspondiente al MR90.	231
Gráfico 6.12 módulo resiliente correspondiente al MR120.	232
Gráfico 6.13 módulo resiliente correspondiente al MR150.	233
Gráfico 6.14 módulo resiliente correspondiente al MR180.	234
Gráfico 6.15 Módulo Efectivo correspondiente al EP60.	244
Gráfico 6.16 Módulo Efectivo correspondiente al EP90.	245
Gráfico 6.17 Módulo Efectivo correspondiente al EP120.	246
Gráfico 6.18 Módulo Efectivo correspondiente al EP150.	247
Gráfico 6.19 Módulo Efectivo correspondiente al EP180	248
Gráfico 6.20 Número Estructural correspondiente al S _{Neff} 60.....	251
Gráfico 6.21 Número Estructural correspondiente al S _{Neff} 90.....	252
Gráfico 6.22 Número Estructural correspondiente al S _{Neff} 120.....	253
Gráfico 6.23 Número Estructural correspondiente al S _{Neff} 150.....	254
Gráfico 6.24 Número Estructural correspondiente al S _{Neff} 180.....	255
Gráfico 6.25 Modulo resiliente del carril izquierdo.	260
Gráfico 6.26 Módulo resiliente carril derecho.....	262
Gráfico 6.27 Modulo Efectivo del pavimento para el carril izquierdo.....	264
Gráfico 6.28 EP carril derecho.....	266
Gráfico 6.29 número estructural carril izquierdo	268
Gráfico 6.30 número estructural carril derecho.	270
Gráfico 6.31 deflexión máxima carril izquierdo.....	272
Gráfico 6.32 deflexión máxima carril derecho.....	274

DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

1. AIPCR: Asociación Mundial de Carreteras.
2. ASTM: American Society for Testing and Materials.
3. AASHO: American Association of State Highway and Officials.
4. AASTHO: American Association of State Highway and Transportation Official.
5. AC: Concreto Asfáltico Flexible. (Asphalt Concret)
6. CBR: Relación de Valor Soporte de California (California Bearing Ratio).
7. Correlación: indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas.
8. DMI: Medidor de Distancia.
9. FWD: Deflectómetro de Impacto (Falling weight deflectometer)
10. FHWA: Oficina de la Administración Federal de Carreteras (Federal Highway Administration).
11. HIR: Reciclado en Caliente In Situ.
12. HWD: Deflectómetro de Peso.(Heavy Weigth Deflectometer)
13. IRI: Índice de Rugosidad Internacional (International Roughness Index)
14. ISCYC: Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto.
15. MOP: Ministerio de Obras Públicas, Transporte Vivienda y Desarrollo Urbano de El Salvador.
16. MOP-UIDV: Ministerio de Obras Públicas Unidad de Investigación y Desarrollo Vial.
17. Micropavimento: una mezcla compuesta por emulsión asfáltica modificada por polímeros, 100% agregados triturados, finos minerales, agua y otros aditivos, debidamente proporcionados y tendidos en una superficie apropiadamente preparada.
18. MR: Módulo Resiliente.
19. MRc = Módulo Resiliente de Diseño.
20. NDT: Pruebas No Destructivas (Database of Nondestructive Testing)
21. Número Estructural Efectivo: la capacidad de un firme para soportar las solicitaciones del tráfico. Tiene unidades de longitud y se expresa en milímetros y/o Pulgadas.

22. Piel de Cocodrilo: Corresponden a agrietamientos de la carpeta de rodamiento, que en casos simples, no se manifiestan con hundimientos o desplazamientos de las capas que conforman la estructura del pavimento.
23. PSR: Grado de Serviciabilidad Presente(*Present Serviceability Rating*)
24. PSI: Índice de Serviciabilidad Presente(*Present Serviceability Index*)
25. PCI: Índice de condición del Pavimento (*Pavement Condition Index*): índice numérico, desarrollado para obtener la irregularidad de la superficie del pavimento y la condición operacional de este.
26. PCC: pavimentos rígido de cemento portland.
27. AC/PCC: Pavimentos Compuestos.
28. Rigidez: es la capacidad de un objeto ortopédico, sólido o elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones y/o desplazamientos.
29. Reología: es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir.
30. Rodera (Lateral): Surco o marca que dejan a su paso las ruedas de un vehículo, que hace referencia a roderas Externas e Internas.
31. RSP: perfilómetro laser de Referencia Inercial (*Road Surface Profiler*)
32. SUPERPAVE: "*Superior Performing Asphalt Pavements*", el cual designa un pavimento asfáltico cuya composición específica corresponde a una receta resultante de la investigación sobre pavimentos llevada a cabo en los EEUU entre 1987 y 1993.
33. SHRP: Programa de Investigación Estratégica Carretera (*Strategic Highway Research Program*)
34. SI: Sistema Internacional.
35. SIECA: Sistema de Integración Económica Centroamericana.
36. TPDA: Transito Promedio Diario Anual.
37. UPES: Universidad Politécnica de El Salvador.
38. UTEP: Universidad del paso Texas.

INTRODUCCIÓN

La red vial de El Salvador presentó niveles altos de deterioro por el bajo nivel de inversión en décadas pasadas por lo cual se ha hecho necesario implementar nuevas tecnologías en la construcción de bases y sub bases de estructuras de pavimentos, desde hace muchos años diversas carreteras construidas en varias regiones del mundo, han demostrado las múltiples ventajas de los materiales estabilizados con cemento, siendo el incremento en las propiedades mecánicas del material y la reducida susceptibilidad a la humedad, las principales referencias de dicho material a través de la historia.

El reciclaje de pavimento asfáltico es una tecnología especial que permite la reconstrucción de pavimentos envejecidos y/o deteriorados, empleando sus materiales de construcción originales más la acción de un conglomerante como lo es el cemento. Esto es posible en la medida en que no haya llegado a un grado de degradación tal que no permita una recuperación eficiente.

El pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y del clima. Estos dos factores, junto con el envejecimiento natural de los materiales, hacen que el firme sufra un proceso de deterioro progresivo. Este envejecimiento y deterioro del firme conlleva una disminución paulatina en los niveles de seguridad y confort del tráfico, que al sobrepasar ciertos valores hacen necesaria una operación de conservación.

Mediante el apoyo obtenido por el Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto (ISCYC) y la Unidad de Investigaciones y de Desarrollo Vial del Ministerio de Obras Públicas (MOP-UIDV) se llevará a cabo el estudio comparativo del desempeño estructural y funcional post-construcción de los pavimentos flexibles reciclados con cemento en El Salvador, esta investigación consta de dos etapas siendo esta la segunda, en la primera etapa realizada por tesis de la Universidad Politécnica de El Salvador (UPES) se efectuaron levantamientos de

deterioros, cálculo de índices de condición, extracciones de núcleos y determinación de diversos parámetros de resistencia mecánica.

La conservación de la red vial es en la actualidad un aspecto de gran importancia debido a los recursos que moviliza. El presupuesto necesario para el mantenimiento, así como los problemas ambientales que de él se derivan, justifican la búsqueda de nuevas técnicas que permitan reducir costos y sean respetuosas con el medio. En este contexto, el reciclado de pavimentos, como medio de optimizar los recursos, toma un renovado protagonismo y se convierte en una necesidad analizar los resultados obtenidos mediante las pruebas de perfilometría laser y Deflectometría de impacto.

El Deflectometro de impacto y el Perfilómetro laser son equipos de alta tecnología que permiten realizar evaluaciones no destructivas a las carreteras, el Perfilómetro permite realizar una inspección a la superficie de la carretera para conocer la funcionalidad, y la comodidad con que los vehículos transitan, mientras que el Deflectometro de impacto ayuda a conocer el estado estructural de la carretera por medio de su rigidez, deflexión, número estructural de capas, entre otros.

El desecho de los materiales envejecidos del pavimento, además de provocar problemas relacionados con la adquisición de nuevos materiales y con su disposición, resulta contraproducente desde el punto de vista técnico, ya que pese a estar envejecidos, conservan buena parte de sus cualidades.

CAPITULO I GENERALIDADES.

1.0 TITULO

Estudio comparativo del desempeño estructural y funcional post construcción de los pavimentos flexibles reciclados con cemento en El Salvador.

1.1 ANTECEDENTES

Los caminos forman parte importante de la evolución de las sociedades, han permitido una comunicación entre diferentes lugares generando una movilización de diversos recursos. Las necesidades han cambiado con el tiempo a tal grado que los antiguos caminos de tierra se han convertido en importantes autopistas en las cuales el estado estructural y funcional es indispensable para el funcionamiento de esta, para brindar seguridad y comodidad a los usuarios.

Las carreteras constantemente se encuentran sometidas a factores que deterioran progresivamente su estructura llevándolas a una reducción en la comodidad y seguridad que debe brindar, es así como surge necesidad de mantener las carreteras en buen estado, y para esto existen una gran cantidad de técnicas que no solo permiten la conservación sino también su rehabilitación.

Una técnica que en los últimos años se ha utilizado para renovar las características estructurales y funcionales de las carreteras deterioradas es el RECICLADO CON CEMENTO, los orígenes de esta se remontan a la época posterior a la Segunda Guerra Mundial, cuando en el Reino Unido para reparar las carreteras secundarias afectadas por la misma se puso en práctica un procedimiento llamado Retread Process¹ o proceso de recauchutado.

¹ Extraído de TECNICA DE RECICLADO DE FIRMES CON CEMENTO, autor Ing. Carlos Jofré, Madrid España, 2003

Retread Process: consiste en escarificar el pavimento, añadir en caso necesario una pequeña cantidad de agregados y mezclar in situ el material escarificado con el aportado con ayuda de una motoniveladora o una grada de discos. A continuación se regaba con una emulsión bituminosa de bajo contenido de ligante, e inmediatamente se procedía al mezclado con gradas de discos. El primer día sólo se compactaba muy ligeramente el material mezclado, puesto que tenía mucha agua, y al día siguiente se terminaba la compactación. Se trataba de un procedimiento muy simple pero que, ejecutado correctamente, proporcionaba unos resultados aceptables.

Entre otros intentos que se han hecho a nivel mundial se encuentran:

- ❖ 1930 primer caso documentado en Estados Unidos de América de reciclado “in situ” en caliente de pavimento flexible (HIR²)
- ❖ 1970-1980 Avances importantes y aplicación moderada en USA y diversos países de Europa.
- ❖ en 1983 en el aeropuerto del Condado de Mohave, Kingman, Arizona y el aeropuerto municipal de Winslow para el mejoramiento de una pista aterrizaje.
- ❖ En los últimos 20 años amplios desarrollo en equipos y mayor aplicación a nivel mundial especialmente en reciclado en frío.

La técnica a seguido utilizándose de forma no muy generalizada, puesto que los equipos de los que se disponía no podían garantizar una mezcla adecuada con el cemento ni tampoco una compactación eficaz en espesores superiores a 15 cm, cifra que hoy en día se considera como el límite inferior para poder obtener una capa reciclada con una correcta capacidad de soporte.

Para los años 80 fue cuando el reciclado in situ con adición de cemento para el acondicionamiento de carreteras se desarrolló con un éxito notable, debido principalmente a tres factores:

² HIR: Reciclado en caliente in situ

1. Un mejor conocimiento de las características mecánicas de los materiales tratados con cemento y del comportamiento de los pavimentos semirrígidos.
2. Empleo de nuevos equipos de mayor potencia, rendimiento y profundidad de trabajo, que proporcionan una mayor calidad del producto final y por otra parte se traducen en una reducción de costos.
3. La creciente conciencia ecológica, que ha impulsado esta técnica por los beneficios medioambientales que aporta ante el agotamiento de los yacimientos de agregados existentes y la dificultad de abrir nuevas explotaciones.

Como resultado de esta amplia experiencia, el reciclado con cemento, empleado en un principio únicamente en vías de baja intensidad de tráfico, se aplica ya en carreteras con un importante volumen de vehículos pesados. Un ejemplo destacado lo constituye una obra con una longitud total de 30 km en una carretera de la red estatal de España, en la que la intensidad media diaria de vehículos pesados en cada sentido varía entre 800 y 1200, según los tramos. El reciclado del pavimento existente, en una profundidad entre 25 y 30 cm, se llevó a cabo en 1995. Con solamente 10 cm de mezcla bituminosa (5 cm hasta 1998) su comportamiento puede considerarse excelente.

También como consecuencia de este desarrollo, varias administraciones han publicado o tienen muy avanzada la elaboración de prescripciones y guías técnicas para el proyecto o ejecución de reciclados con cemento. Al temprano ejemplo de Japón (1988) hay que añadir, entre otros, los de España, Alemania, Francia, Inglaterra, la región valona de Bélgica o el estado de Nueva Gales del Sur (Australia).

Asimismo, para difundir las técnicas de reciclado el Comité Técnico Internacional de Pavimentos de la AIPCR (Asociación Mundial de Carreteras) está redactando distintas guías sobre las mismas, una de las cuales estará dedicada al reciclado con cemento.

En la actualidad el reciclado con cemento es una técnica muy utilizada en un gran número de países repartidos por todo el mundo. Australia, Estados Unidos, Francia, Sudáfrica, España, son algunos de los líderes de la misma. Sus aplicaciones no se limitan a pavimentos de carreteras, habiéndose ya utilizado, por ejemplo, en las pistas de algunos aeropuertos.

Actualmente en América Latina también lo aplican países como: Venezuela, México y Colombia.

1.1.1 ANTECEDENTES EN EL SALVADOR

En El Salvador la implementación de la técnica comenzó aproximadamente en el año 2001, teniendo en cuenta que la mayoría de las principales vías poseían una carpeta de rodadura de mezcla asfáltica y base granular las cuales estaban formadas por agregados pétreos de origen ígneo (basalto y andesita), considerados de muy buena calidad lo que permitió implementar la técnica de reciclado como un plan de conservación y rehabilitación de la red vial.

Inicialmente, las mezclas se realizaron con 5% de cemento fabricado según normas ASTM C-595 y C-1157, obteniéndose resultados de resistencia a compresión altos, razón por la cual se procedió a optimizar el diseño de mezcla, reduciendo la cantidad de cemento en algunos casos hasta 2½% en peso, obteniéndose resistencias a compresión entre 2 y 3.5 MPa, con las que generalmente se diseña la base de la estructura de pavimento en El Salvador.

La técnica se ha ejecutado en diversos proyectos en todo el territorio salvadoreño entre los cuales tenemos:

La carretera el litoral que ha sido reciclada en un 65% de su longitud total, siendo la carretera en la que se ha utilizado en mayor grado el reciclado con cemento, entre algunos proyectos rehabilitados en esta carretera se encuentran:

- ❖ Carretera litoral (CA-02W), tramo entre CA-12 (desvió al puerto Acajutla) y CA-04 (desvió puerto la libertad). Reciclada en el año 2002 un tramo de 77 kilómetros y con un espesor de 13cm.
- ❖ Carretera litoral (CA-02E). tramo El Delirio – La Unión. Reciclada en el año 2003 un tramo de 58 kilómetros y con un espesor de 33cm.
- ❖ Carretera litoral (CA-02E), tramo Comalapa-Zacatecoluca. Reciclada en el periodo de los años 2002- 2003 un tramo de 66 kilómetros y con un espesor de 20cm.
- ❖ Ruta RN-10N entre carreteras RN-09 y CA-01W (El Congo), esta vía fue reciclada y rehabilitada para el año 2009 con una longitud de 2.01 km y un espesor de 20cm.
- ❖ Ruta RN-04, Tramo San Marcos- Zacatecoluca. Proyecto ejecutado en los años 2003-2004 con una longitud de 50km y un espesor de 15cm.
- ❖ Etc.

En El Salvador, existen más de 725,000 m³ de pavimentos flexibles reciclados con cemento que han sido colocados aproximadamente en la misma época.

Actualmente todas las carreteras que han sido reestructuradas con pavimento flexible reciclado prestan el servicio regular para el cual fueron construidas por lo que se considera que es el momento adecuado para investigar las respuestas estructurales y funcionales que esta técnica presenta bajo las condiciones existentes propias de El Salvador. El ISCYC en conjunto con tesis de la UPES han realizado una investigación que incluye la realización de levantamientos de deterioros, cálculo de índices de condición, extracciones de núcleos y determinación de diversos parámetros de resistencia mecánica.

Tomando como muestra algunas de estas carreteras en diferentes lugares y condiciones climáticas para así generar una primera etapa de información del comportamiento estructural y funcional que tienen estos pavimentos en condiciones reales de trabajo

1.2 DESCRIPCIÓN DEL TEMA.

Concretamente los pavimentos reciclados con cemento consisten en reutilizar los materiales de la capa de rodadura y base de una estructura de pavimento flexible, disgregándolos; adicionar un conglomerante/aglomerante (en este caso cemento); agua (para la hidratación, envuelta y compactación), eventualmente agregados (como correctores granulométricos o con otros fines) y algún aditivo, con una dosificación obtenida mediante ensayos. La mezcla homogénea de estos materiales se extiende, compacta y cura adecuadamente, constituyendo una base o capa de mayor resistencia estructural de un nuevo pavimento.

La investigación a realizar es la continuación de una primera etapa, en ella estudiantes de la Universidad Politécnica de El Salvador realizaron levantamientos de deterioros, cálculo de índices de condición, extracciones de núcleos y determinación de diversos parámetros de resistencia mecánica en 5 proyectos: Carretera Litoral (CA-02W), tramo entre CA-12 (Desvío al puerto de Acajutla) y CA-04 (Desvío Puerto de La Libertad); Ruta RN-04, tramo San Marcos-Zacatecoluca; Carretera Litoral (CA-02E), tramo El Delirio- La Unión; Carretera Litoral (CA-02W), tramo Usulután-El Delirio y Carretera Litoral (CA-02W), tramo Comalapa-Zacatecoluca, estos datos sustentan una base y es importante brindarle un apartado especial para analizar la información y las conclusiones que se obtuvieron gracias a todos los ensayos realizados.

De los 5 proyectos mencionados en el trabajo realizado por los alumnos de la Universidad Politécnica de El Salvador, el actual trabajo de grado selecciona uno, Carretera Litoral (CA-02W), tramo Comalapa-Zacatecoluca, para realizar pruebas de deflectómetro y perfilómetro, que a diferencia de las pruebas realizadas en la primera etapa, tanto la perfilometría como la deflectometría son pruebas no destructivas y que representan un enriquecimiento a la investigación en general.

El proyecto de la Carretera Litoral (CA-02W), tramo Comalapa-Zacatecoluca cuenta con la particularidad que además de practicársele la técnica de pavimento reciclado, se ha colocado un micropavimento como parte del mantenimiento rutinario de vías tipo especial tema que será ampliado en un punto posterior.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existe un periodo en el cual una carretera cumple su tiempo de vida útil por lo que surge la necesidad de una reconstrucción o mantenimiento de esta y así obtener una nueva red vial que cumpla con todos los requisitos necesarios para hacerla transitable, a partir de esta necesidad han surgido numerosas técnicas para la rehabilitación de carreteras y el uso de ellas dependerá de las necesidades que se presenten y de las ventajas que cada una ofrezcan.

En El Salvador, a partir del año 2001, se han realizado aproximadamente 725,000 m³ de pavimento utilizando la técnica de reciclado de carreteras asfálticas con cemento, esta técnica resulta ser amistosa con la naturaleza reutilizando el material de la base y carpeta de rodadura minimizando en gran medida la utilización de nuevo material.

La utilización del reciclado de carreteras asfálticas con cemento es una técnica relativamente nueva en El Salvador por lo que desde los primeros años de su utilización surgía la necesidad de realizar pruebas y comprobar la factibilidad de su utilización.

El Ministerio de Obras Públicas de El Salvador, específicamente la Unidad de Investigación, cuenta con Perfilómetro Laser y Deflectómetro de Impacto, equipo sofisticado que posee la particularidad de realizar pruebas no destructivas, estas pruebas serán realizadas por personal del Ministerio de Obras Públicas y los datos arrojados por el Perfilómetro Laser y el Deflectómetro de Impacto serán los que se utilizarán para realizar los análisis de pavimentos reciclado asfálticos, específicamente en el proyecto de la Carretera Litoral (CA-02W), tramo Comalapa-Zacatecoluca.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La ingeniería de carreteras es considerada como una de las ramas más complejas de la ingeniería civil, ya que al momento de realizar cada una de las etapas se involucran múltiples aspectos, que deben ser tomados en cuenta para su diseño y posterior ejecución, estos aspectos serán aquellos que permitan reducir los costos tanto en materiales como en mano de obra, disminuir la explotación de recursos, reducir tiempo, etc.

El reciclado de pavimentos flexibles con cemento cuenta con una gran aceptación internacional ya que minimiza la inversión económica, en Estados Unidos los costos del reciclaje con cemento son entre un 40 y 50% menores que los de la colocación de una nueva.

A partir del año 2001, en El Salvador se ha venido trabajando con la técnica de reciclado de carreteras con cemento, la cual permite reutilizar el material inservible de la carpeta de rodamiento y base a reciclar, triturarlo, agregarle cemento y generar una nueva base. Esta técnica ha sido utilizada en la rehabilitación de carreteras existentes en diferentes zonas dentro del país por lo que la importancia de medir la respuesta a las condiciones propias de El Salvador se convierte en una necesidad.

La técnica de pavimentos asfálticos reciclado con cemento tiene pocos años de ser utilizada en El Salvador, de igual manera el número de investigaciones realizadas son pocas, dentro de los primeros análisis realizados se encuentra el trabajo de grado elaborado por alumnos de la Universidad Politécnica de El Salvador, en él se incluyen cálculos de índice de condición, extracción de núcleos y diversos parámetros de resistencia mecánica.

Realizar un análisis completo utilizando los datos extraídos de las pruebas con Deflectómetro de impacto y Perfilómetro laser generaran información diferente a la que anteriormente se tiene y permite enriquecer y profundizar más la investigación de la técnica de pavimento asfáltico reciclado con cemento en El Salvador.

Mediante la investigación se prevé que se obtendrá la información necesaria que permita la utilización de esta técnica de una forma más confiable pues se contará con la información técnica que la amparé, esto a su vez permitirá sustituir la manera tradicional de rehabilitar una carretera deteriorada y generará indirectamente beneficios ambientales, disminuyendo la explotación de canteras pétreas, generando un alivio considerable al deterioro ambiental existente.

Los recursos económicos con los que actualmente cuenta cualquier institución ya sea privada o gubernamental son limitados y mediante la utilización de esta técnica para las carreteras se tendría una opción que genere un ahorro considerable en los costos directos.

1.5 OBJETIVOS

Objetivo general:

- ◆ Identificar el desempeño estructural y funcional post construcción de pavimentos flexibles reciclados con cemento en El Salvador.

Objetivos Específicos:

- ◆ Generar una base de datos de pruebas destructivas mediante el análisis a las pruebas y conclusiones generadas del trabajo de grado, “Estudio comparativo estructural y funcional post construcción de los pavimentos asfálticos reciclados con cemento en El Salvador” realizada por los estudiantes de la Universidad Politécnica de El Salvador.
- ◆ Analizar las pruebas hechas con Deflectómetro de Impacto (FWD) y Perfilómetro Laser partiendo del kilómetro 45 y finalizando en el kilómetro 47 ½ de la Carretera litoral (CA-02E), tramo Comalapa- Zacatecoluca.
- ◆ Generar conclusiones acerca del actual desempeño estructural y funcional de la carretera litoral (CA-02E), tramo Comalapa- Zacatecoluca.

1.6 ALCANCES

- ◆ Mediante el análisis hecho al trabajo de grado, “Análisis comparativo estructural y funcional post construcción de los pavimentos asfálticos reciclados con cemento en El Salvador” realizado por estudiantes de la Universidad Politécnica de El Salvador (UPES), generar una base previa a análisis de los datos obtenidos con perfilómetro laser y deflectómetro de impacto. (como una comparación de calidad de información de similitud de valores como resultados de las diferentes pruebas)
- ◆ Con el análisis de las pruebas de Perfilometría, partiendo del kilómetro 45 y finalizando en el kilómetro 47 ½ de la Carretera litoral (CA-02E), tramo Comalapa- Zacatecoluca. Se obtendrá el parámetro “INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL” (IRI), el cual permite realizar una evaluación de la condición de la superficie de la carretera lo que contribuirá a conocer el estado funcional del proyecto en estudio.
- ◆ Con el análisis de las pruebas de Deflectometría, partiendo del kilómetro 45 y finalizando en el kilómetro 47 ½ de la Carretera litoral (CA-02E), tramo Comalapa- Zacatecoluca, Se logre obtener la caracterización de los materiales de las capas así como la identificación de secciones uniformes que permitan realizar un análisis estructural completo de las carreteras en estudio.
- ◆ Dentro de la información general del Trabajo de grado se incluirá un informe del micropavimento aplicado a la Carretera litoral (CA-02E), tramo Comalapa- Zacatecoluca.

1.7 LIMITACIONES

- ◆ Se solicitó la colaboración del Ministerio de Obras Publicas-Unidad de Investigación y Desarrollo Vial (MOP-UIDV) por ser la única institución que cuenta con el equipo necesario para realizar la investigación, con el cual se pretendía evaluar 5 proyectos, sin embargo debido a los compromisos de trabajo del MOP-UIDV, esta investigación se vio reducida de cinco a dos proyectos y posteriormente a un solo proyecto.
- ◆ La realización de las pruebas de campo estarán sujetas a la agenda de trabajo del MOP-UIDV, y como consecuencia también la entrega de la información necesaria para la realización de la investigación.
- ◆ Entre la realización de las pruebas de ambos trabajos de grado existe una diferencia de tiempo de un año y cuatro meses, tiempo suficiente para que las carreteras sufran cambios estructurales y funcionales.
- ◆ Los parámetros que se obtendrán con el Perfilómetro laser y Deflectómetro de impacto son diferentes a los obtenidos con el análisis estructural y funcional realizado por UPES, por lo que se eliminan las posibilidades de generar una comparación directa entre las cálculos expuesto en la tesis realizada por UPES y la realizada actualmente por UES.
- ◆ La Carretera litoral (CA-02E), tramo Comalapa- Zacatecoluca, cuenta con una capa de micropavimento, sin embargo, no se puede generar una comparación entre las condiciones estructurales y funcionales de la carretera previa a la colocación del micropavimento con las condiciones actuales por no contar con la información necesaria de la carretera cuando funcionaba sin micropavimento.

CAPITULO II MARCO TEORICO

2.1 DEFINICIÓN DE PAVIMENTO

Pavimento es una estructura cuya función fundamental es distribuir eficientemente las cargas concentradas de las ruedas de los vehículos, de manera que el suelo subyacente pueda soportarlas sin falla o deformación excesiva.

Además el pavimento debe ofrecer una superficie lisa, no resbaladiza, que resista la intemperie y finalmente debe proteger al suelo de la pérdida de sus propiedades, por efecto del sol, las lluvias y el frío.

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el período para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.

2.2 ELEMENTOS QUE INTEGRAN LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO.

2.2.1 SUBRASANTE

La subrasante se define como la capa de terreno de una carretera, que soporta la estructura del pavimento y que se extiende hasta una profundidad en que no le afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto.

Subrasante se denomina al suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento. En la década del 40, el concepto de diseño de pavimentos estaba basado en las propiedades ingenieriles de la subrasante. Estas propiedades eran la clasificación de suelos, plasticidad, resistencia al corte, susceptibilidad a las heladas y drenaje.

De la calidad de esta capa depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea éste flexible o rígido. Como parámetro de evaluación de esta capa se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas del tránsito. Es necesario tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las eventuales variaciones de volumen (hinchamiento - retracción).

2.2.2 SUB-BASE

Realmente se trata de una base de menor calidad ya que al estar más alejada de las cargas del tráfico, estas le llegan más atenuadas. En muchos casos se ha atribuido también a la sub-base una función drenante, en particular cuando las capas inferiores son poco permeables. Sin embargo esto no debe ser considerado como general en algunos casos el que la sub-base sea muy permeable puede ser perjudicial para la estructura, por su capacidad de almacenar mucha agua.

Función económica. Una de las principales funciones de esta capa es netamente económica; en efecto, el espesor total que se requiere para que el nivel de esfuerzos en la subrasante sea igual o menor que su propia resistencia, puede ser construido con materiales de alta calidad; sin embargo, es preferible distribuir las capas más calificadas en la parte superior y colocar en la parte inferior del pavimento la capa de menor calidad la cual es frecuentemente la más barata. Esta solución puede traer consigo un aumento en el espesor total del pavimento y no obstante, resultar más económica.

Capa de transición. La subbase bien diseñada impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante y por otra parte, actúa como filtro de la base impidiendo que los finos de la subrasante la contaminen menoscabando su calidad.

Disminución de las deformaciones. Algunos cambios volumétricos de la capa subrasante, generalmente asociados a cambios en su contenido de agua (expansiones), o a cambios extremos de temperatura (heladas), pueden absorberse con la capa subbase, impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.

Resistencia. La subbase debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores y transmitidas a un nivel adecuado a la subrasante.

Drenaje. En muchos casos la subbase debe drenar el agua, que se introduzca a través de la carpeta o por las bermas, así como impedir la ascensión capilar.

2.2.3 BASE

Resistencia. La función fundamental de la base granular de un pavimento consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.

Función económica. Respecto a la carpeta asfáltica, la base tiene una función económica análoga a la que tiene la subbase respecto a la base.

2.2.4 CAPA DE RODAMIENTO

Superficie de rodamiento. La carpeta debe proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito.

Impermeabilidad. Hasta donde sea posible, debe impedir el paso del agua al interior del pavimento.

Resistencia. Su resistencia a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento.

2.3 TIPOS DE PAVIMENTOS

En nuestro medios los pavimentos se clasifican en: pavimentos flexibles, pavimentos semi-rígidos o semi-flexibles, pavimentos rígidos y pavimentos articulados.

2.3.1 PAVIMENTOS FLEXIBLES

Este tipo de pavimentos están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. No obstante puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra.

En la Figura 2.1 se muestra un corte típico de un pavimento flexible.

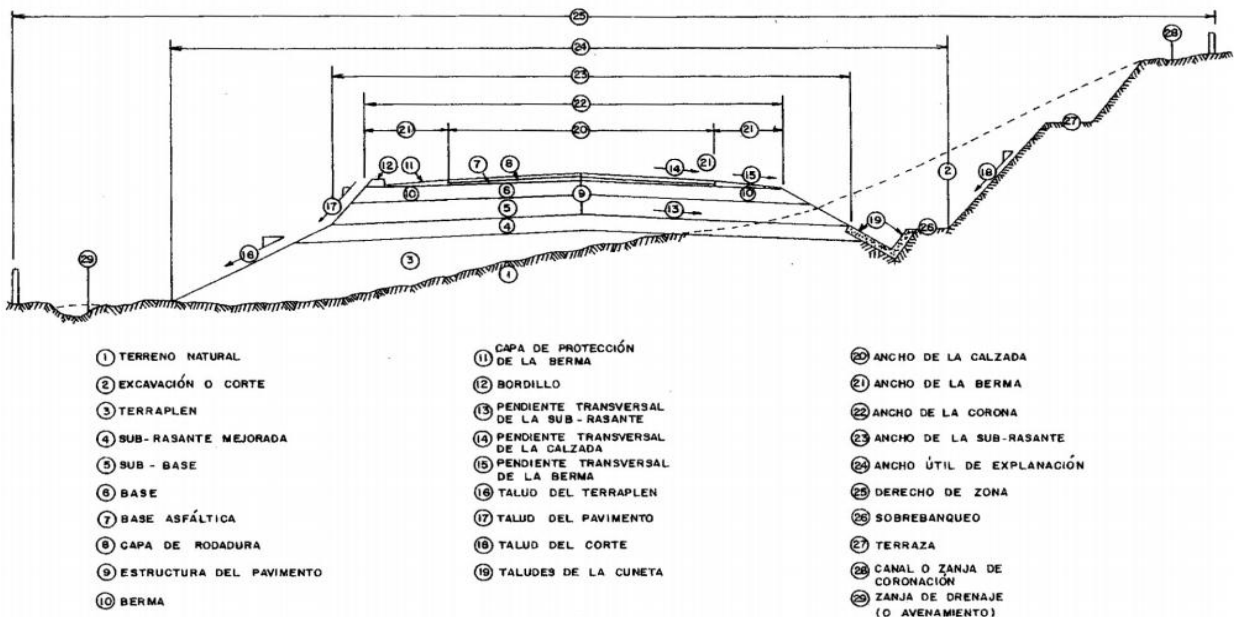


Figura 2.1 Sección típica de un pavimento flexible.

2.3.1.1 TIPO DE DAÑOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

Falla de Pavimento P1: Fallas o agrietamientos superficiales tipo piel de cocodrilo. Corresponden a agrietamientos de la carpeta de rodamiento, que en casos simples, no se manifiestan con hundimientos o desplazamientos de las capas que conforman la estructura del pavimento (ver figura 2.2). Este tipo de falla permite la percolación o infiltración de gran cantidad de agua en la base del pavimento y por esta razón la falla progresa rápidamente.

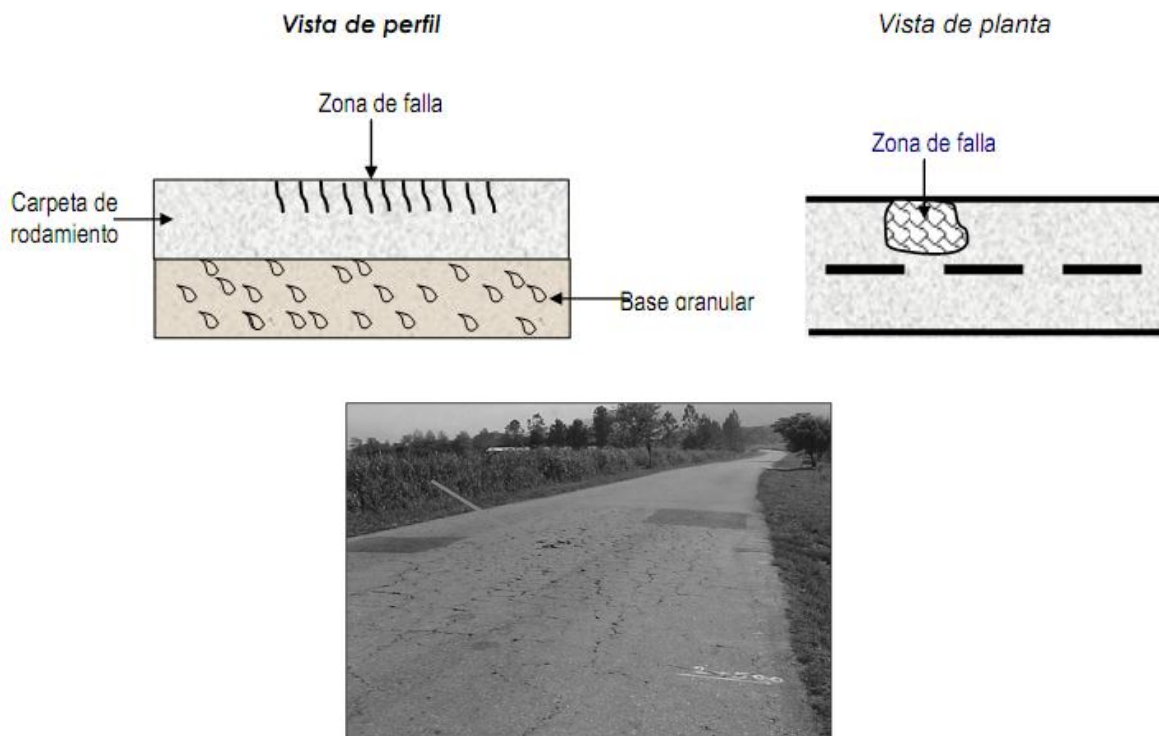


Figura 2.2 Agrietamiento Superficial.

Falla de Pavimento P2: Fallas o agrietamientos profundos con marcas tipo piel de cocodrilo, asociados a hundimientos por deformación de uno o más componentes de la estructura del pavimento (ver figura 2.3). La presencia de este tipo de falla implica un bacheo profundo y en casos extremos hay que restituir la estructura del pavimento.

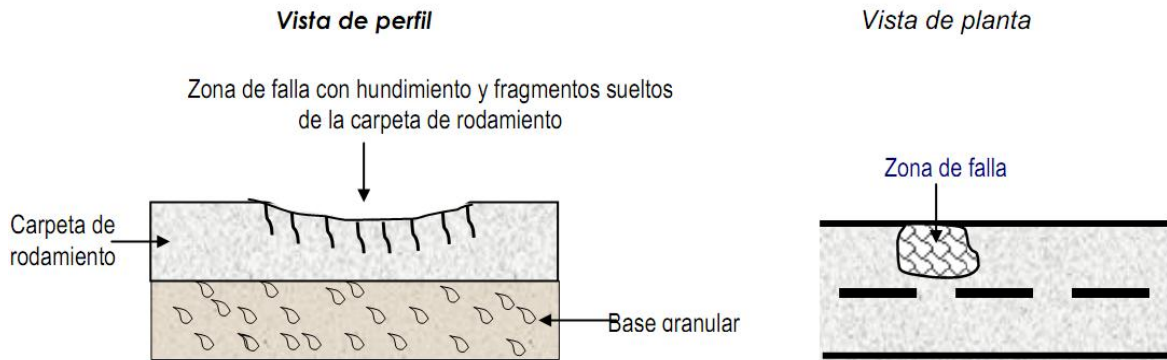


Figura 2.3 Agrietamiento.

Este tipo de falla se debe a deformaciones por sobre carga o compresibilidad del terreno de fundación cuando no existe una subbase granular o la presencia de materiales compresibles.



Figura 2.4 agrietamiento.

Falla de Pavimento P3: Falla o agrietamiento profundo con grietas del tipo piel de cocodrilo, hundimientos y desplazamientos laterales del pavimento. Esta falla está asociada en todos los casos con excesiva plasticidad de uno de los componentes del pavimento, bien sea la base granular, la subbase o el terreno de fundación.

La plasticidad de cualquier material es más determinante en la falla mientras más humedad hay presente en el suelo. (Ver figura 2.5)

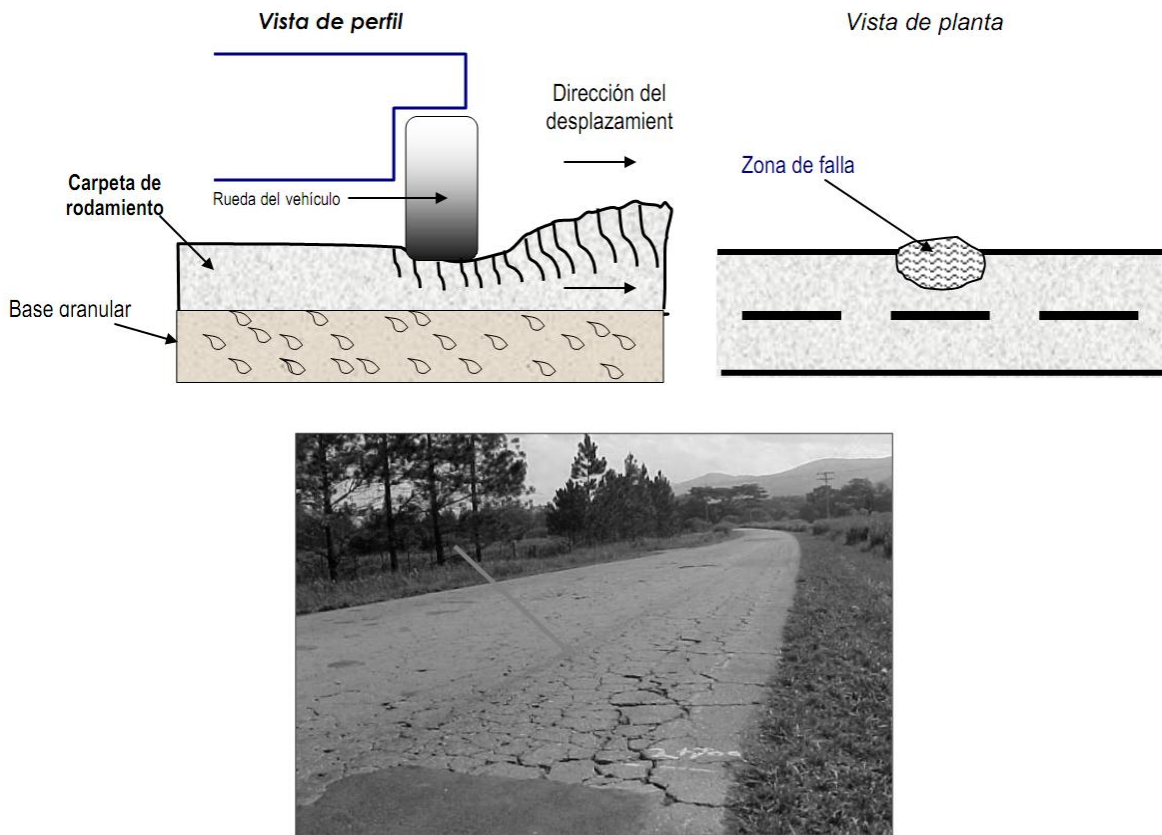


Figura 2.5 Agrietamiento Profundo.

Falla de Pavimento P4: Reflejo de juntas y grietas por repavimentaciones con materiales de diferentes comportamientos Reológico. Esto es muy frecuente cuando se colocan pavimentos de concreto asfáltico sobre pavimentos de concreto rígido o reparaciones de tuberías, acueductos, cloacas o ductos de gases donde antes de colocar la carpeta flexible se repara con concreto.

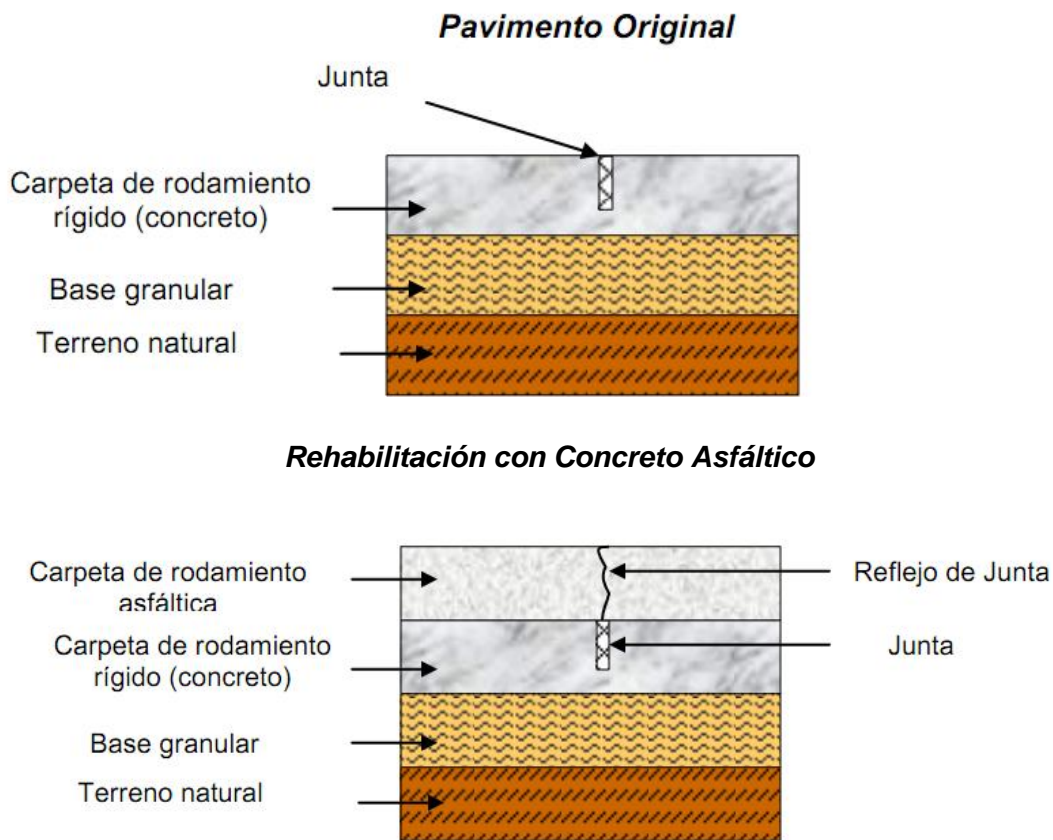


Figura 2.6 reflejo en Juntas y Grietas.

CLASIFICACIÓN DE LOS DAÑOS SUPERFICIALES DE LOS PAVIMENTOS

En las Tablas 2.1 al 2.4 se presentan las clasificaciones de los tipos más importantes de fallas de pavimentos. En dichas tablas se puede apreciar que los tipos de fallas en pavimentos flexibles son más variados que en pavimentos rígidos, por cuanto los primeros permiten mayor diversidad en su construcción y es más frecuente la construcción de pavimentos flexibles económicos, particularmente en nuestro medio, a causa de la necesidad de hacer economías en los costos iniciales.

Las fallas en los pavimentos flexibles se han clasificado en cuatro grupos principales: deformaciones, fisuras y grietas, desprendimientos y afloramientos.

Dentro de cada grupo se da una asignación única a cada tipo de falla, con su descripción, causas posibles de falla y criterios generales de reparación.

Además de la identificación de la falla, es necesario establecer el nivel de intensidad de la misma a fin de cuantificar su progreso con el tiempo y poder así determinar el momento oportuno de ejecutar las obras de conservación que sean necesarias. En nuestro medio se utilizan cuatro niveles para las diversas fallas, asignándolas A, B, C y D. Lógicamente, esta clasificación da lugar a calificaciones subjetivas, pero la elaboración de un registro fotográfico secuencial de la evolución de la falla, permite minimizar la dificultad.

Combinación de las fallas

Cuando una determinada falla alcanza cierta magnitud, evoluciona hacia otro tipo de falla mayor, lo que dificulta la interpretación.

Así por ejemplo, en los pavimentos flexibles es posible que un asentamiento no corregido permita la formación de fisuras de pequeña magnitud, que con el tiempo se interconectan formando un sistema tipo piel de cocodrilo, el cual permite el ingreso de agua y consecuente degradación de la estructura que lleva a la desintegración del pavimento.

En consecuencia, es importante efectuar, periódicamente, un seguimiento y evaluación del pavimento, de tal forma que sea sencilla y oportuna la detección e interpretación de los deterioros que presente en el tiempo.

Utilidad de la evaluación

La definición de secciones homogéneas, de falla, junto con algunos datos sobre las características geotécnicas de los materiales de las diversas capas del pavimento y el conocimiento del comportamiento estructural en su conjunto, permitirán al ingeniero deducir, con un criterio verdaderamente racional, las obras de conservación rutinaria y de mejoramiento que garanticen la prolongación de la vida del pavimento al menor costo posible.

Fallas en pavimentos flexibles-deformaciones			
Tipo de deformación	Descripción	Causas posibles de la falla	Criterio general de reparación
1 - Asentamientos a) Longitudinales simples y dobles	Depresiones longitudinales continuas a lo largo de las huellas de tránsito, con o sin levantamiento de las áreas adyacentes.	Cargas de tránsito muy pesados para las cuales el espesor total del pavimento es insuficiente. Pobre calidad de saturación del suelo de subrasante. Falta de estabilidad de las capas del pavimento.	En las zonas de mayor deterioro, remover el pavimento y reconstruir las partes afectadas. Colocar una sobrecapa de retuerzo previa nivelación de la superficie del pavimento existente. Si la subrasante se encuentra saturada, colocar dispositivos de subdrenaje.
b) Transversales	Depresiones localizadas del pavimento perpendicularmente al eje de la vía.	Deficiencias de compactación en terraplenes de acceso a obras de arte, en transiciones corte-terraplén en zanjas excavadas por compañía de servicios públicos. Deficiencias de compactación de alguna capa del pavimento en una franja determinada. Saturación de la subrasante.	Levantar el pavimento en las zonas afectadas hasta la capa deficientemente compactada, densificada adecuadamente y reconstruir el pavimento. Si esto no es posible, renivelar sistemáticamente con una mezcla asfáltica hasta obtener el perfil adecuado instalar dispositivos de subdrenaje.
2 - Baches	Depresiones localizadas generalmente de forma del pavimento, circular o parecida a ella. No se advierten pérdidas de materiales del pavimento.	Drenaje subterráneo deficiente, contaminación y/o heterogeneidad de las capas del pavimento, así como densidad local insuficiente.	Ejecución de un parche, reemplazando los materiales inadecuados. Si el tránsito lo impide, efectuar renivelaciones sistemáticas con concreto asfáltico.
3 - Abultamientos	Ondulaciones de la superficie, por lo general perpendiculares al eje de la vía.	Baja estabilidad de la capa asfáltica, la cual ha sido sometida a cargas pesadas. Si se trata de una mezcla en vía posible falta de curado en la mezcla. Zonas de frenado y	Si la capa de rodadura es un tratamiento superficial, escarificada, mezclarla con la base y recompactarla antes de colocar una nueva capa asfáltica. Si la capa asfáltica es gruesa, lo más conveniente es remover la capa,

		<p>estacionamiento.</p> <p>Deslizamiento de las carpetas sobre la base, debido a un riego de liga excesivo.</p>	<p>recompactar la base y colocar una nueva carpeta.</p>
<p>4 - Desplazamiento de borde</p>	<p>Corrimientos y distorsiones de la capa del pavimento. asfáltica en los bordes</p>	<p>Falta de adherencia de la capa de rodadura.</p> <p>Falta de contención por las bermas. Tránsito pesado y contaminación de las capas granulares.</p> <p>Baja estabilidad de la capa de rodadura.</p>	<p>Reconstrucción de las lonas de pavimento afectadas y construcción o reparación de bermas.</p>

Tabla 2.1 Fallas en pavimentos flexibles-deformaciones

Tabla 2.2			
Fallas en pavimentos flexibles-deformaciones			
Tipo de deformación	Descripción	Causas posibles de la falla	Criterio general de reparación
<p>5- Piel de Cocodrilo</p>	<p>Fisuras o grietas interconectadas formando polígonos de tamaño variable, semejando una malla o piel de cocodrilo.</p>	<p>Cumplimiento de la vida útil del pavimento.</p> <p>Pavimento estable sobre subrasantes elásticas.</p> <p>Tránsito muy pesado para el espesor del pavimento existente. Asfalto muy duro o en cantidad deficiente.</p>	<p>Colocación de una sobrecapa para prolongar la vida del pavimento. Si se advierten deficiencias de drenaje, instalar dispositivos adecuados, remover el material húmedo y reemplazarlo por uno adecuado.</p>
<p>6- Lengüetas</p>	<p>Grietas parabólicas en la capa asfáltica en el sentido de viaje de los vehículos.</p>	<p>Adherencia inadecuada entre la capa de rodadura y la base.</p> <p>Tránsito pesado y muy lento.</p>	<p>Si las grietas son muy pequeñas, sellarlas con un producto asfáltico. Si son pronunciadas remover la capa superficial hasta el punto en que haya una buena capa ligante entre las</p>

			dos capas y luego hacer un parche.
7- Rectilíneas a) Longitudinales	Fisuras y grietas paralelas al eje del pavimento, en general cerca al borde y a las huellas del tránsito.	Asentamiento de terraplenes. Cambios diferenciales de humedad en los suelos de subrasante. Deficiencias de drenaje superficial. Circulación de vehículos pesados muy cerca del borde del pavimento. Falta de sobreebancho en la base. Bermas muy angostas en zonas de terraplén.	Si el problema principal es el agua, colocar dispositivos de drenaje. Las grietas deben sellarse con asfalto líquido y arena. Si se han producido asentamientos en el borde, recuperar el nivel con una capa asfáltica. Si el terraplén es muy angosto, ampliarlo.
b) Transversales	Fisuras y grietas perpendiculares al eje del pavimento.	Juntas de trabajo deficientes. Asentamientos en el contacto corte-terraplén. Espesor insuficiente de pavimento.	Sellado de grietas. Si hay insuficiencia de espesor, colocar una sobrecapa.
8- Otras a) Por Reflexión	Fisuras y grietas de tamaño y dirección irregular en la superficie.	Contracción de bases de suelo-cemento, que se refleja en la superficie. Ampliación de calzadas. Sobre capas asfálticas construidas sobre pavimentos rígidos.	Si son pequeñas, no es necesario tomar ninguna acción. Si tienen cierto tamaño, sellarlas.
b) En Bloque	Fisuras y grietas formando polígonos de bordes regulares, con ángulos por lo general rectos.	Generalmente, mezclas asfálticas de agregado fino con alto contenido de asfalto de baja penetración. Falta de tránsito en la vía.	Sellar las grietas con un producto adecuado y colocar un tratamiento superficial.

Tabla 2.2 Fallas en pavimentos flexibles-deformaciones

Tabla 2.3**Fallas en pavimentos flexibles-deformaciones**

Tipo de deformación	Descripción	Causas posibles de la falla	Criterio general de reparación
9 - Ojo de pescado	Cavidad redondeada con bordes más o menos bien definidos y sin hundimientos en zonas aledañas.	Debilidad local del pavimento por escasez y/o endurecimiento del asfalto, o por ser muy delgada la capa asfáltica. Exceso o defecto de finos en la mezcla. Si la base es débil el fenómeno va progresando con la profundidad y se traduce en desintegración.	Hacer una caja y parchar. Un remedio menor consiste en limpiar el hueco y rellenarlo con mezcla asfáltica.
10- Pérdida de película de ligante	Superficie del pavimento en la que los agregados han perdido su cubierta asfáltica.	Deficiente adherencia del ligante con los agregados pétreos. Cantidad insuficiente de <i>asfalto</i> en la mezcla. Acción del agua y tránsito intenso.	Colocación de un sello con agregado pétreo de buena adherencia con asfalto.
11 - Descascaramiento	Pérdida de fragmentos de la capa asfáltica sin afectar las capas superiores.	Deficiencia en el riego de liga o imprimación. Capa de rodadura permeable y poco compactada o de espesor insuficiente.	Colocación de un tratamiento superficial de protección.
12 - Pérdida de agregado	En la superficie del pavimento se advierte que el agregado ha sido desplazado por acción del tránsito.	Esta falla ocurre generalmente en tratamientos superficiales, librado al tránsito antes del tiempo oportuno o ejecución en tiempo muy frío y húmedo.	Si el área afectada es pequeña, ejecutar un parche. Si es grande, cubrirla con un nuevo tratamiento dosificando convenientemente el asfalto para evitar afloramientos.

13 - Cabezas duras	Partículas minerales de tamaño variable sobresalen de la superficie de la capa de rodadura.	Deficiencias en la gradación de los agregados y/o heterogeneidad en su dureza.	Si el problema no es muy pronunciado, no es necesaria ninguna medida correctiva. Si la magnitud del problema es importante, colocar un sello.
--------------------	---	--	---

Tabla 2.3 Fallas en pavimentos flexibles-deformaciones

Tabla 2.4			
Fallas en pavimentos flexibles-deformaciones			
Tipo de deformación	Descripción	Causas posibles de la falla	Criterio general de reparación
14- Afloramiento de Agua	Presencia de agua en la superficie de la calzada, proveniente de las capas inferiores.	Fuente de agua bajo la calzada; drenaje interno deficiente capa superficial permeable.	Captación de las aguas subterráneas mediante dispositivos adecuados de drenaje.
15- Afloramiento de Ligante	Áreas en las que el asfalto ha exudado en la superficie de pavimento.	Exceso de asfalto en la mezcla. Pocos vacíos en la mezcla. Exceso en la imprimación o riego de liga.	Si la falla abarca gran área, colocar una sobrecapa de protección adecuadamente dosificada. En pequeñas áreas remover el material del área afectada y reemplazarlo por uno adecuado.
16- Afloramiento de Mortero	Ascenso de mortero en la capa de rodadura y descenso del agregado grueso.	Exceso de finos. Altas temperaturas de servicio y colocación de la mezcla muy caliente.	Si la superficie no es resbaladiza no es necesario tomar ninguna medida; en caso contrario, cubrirla con un tratamiento superficial.

Tabla 2.4 Fallas en pavimentos flexibles-deformaciones

2.3.2 METODOS DE RECICLADO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES

Se entiende por reciclaje a la reutilización, generalmente luego de cierto tratamiento, de un material de pavimento que ha cumplido su finalidad inicial, el cual puede emplearse para construir un refuerzo en la misma carretera o alguna capa de una calzada nueva.

Entre los factores fundamentales que han contribuido al desarrollo de estas técnicas merecen destacarse las siguientes:

- a) La crisis energética causante de los significativos aumentos en los precios de los productos derivados del petróleo.
- b) El progresivo agotamiento de las fuentes de obtención de los agregados pétreos de adecuada calidad y el incremento de sus precios en canteras.

A estos aspectos debe adicionarse la influencia notable de los costos del transporte cuando los agregados pétreos de calidad se encuentran a considerable distancia de las obras. Factor considerado de significativo peso en los análisis de precios de las obras.

c) Los aspectos ecológicos y la necesidad de conservar el medio ambiente, son factores que les otorgan actualmente la debida atención en los países más desarrollados, razones por las cuales es notoria la tendencia hacia la reutilización de los materiales existentes en lugar de proceder a la explotación de yacimientos y canteras, contaminando la zona donde se realizan estas actividades.

d) La crítica disponibilidad de los recursos económicos destinados a proyectos nuevos o su insuficiencia para hacer frente a la continua y efectiva conservación, rehabilitación y reconstrucción de los sistemas viables existentes, ha obligado a estudiar y aplicar técnicas de mantenimiento menos onerosas pero con un comportamiento similar a las actuaciones convencionales.

2.3.2.1 RECICLAJE SUPERFICIAL

Este sistema es aplicable a espesores muy delgados de pavimento, puede realizarse en caliente o en frío y constituye una solución en aquellos casos en los que existen problemas de deslizamiento, ya que mediante la eliminación de un espesor superficial débil, se pueden regenerar las características antideslizantes del pavimento. Así mismo, puede resultar aplicable cuando se presenten otros tipos de fallas superficiales, tales como degradación de la carpeta por pérdidas de ligante o agregados pétreos o abultamientos producidos por el empleo de mezclas asfálticas de baja estabilidad. El retiro de esta delgada capa puede ser de carácter provisional hasta que se decida extender una nueva capa asfáltica o bien puede ser una solución a largo plazo, válida en todos los casos en que no existan defectos de tipo estructural.

1. Fresado en frío.- consiste en el molido en frío, controlado automáticamente, de la superficie del pavimento para restaurar las rasantes especificadas y remover ondulaciones y otras imperfecciones, dejando una superficie texturizada, resistente al deslizamiento y al hidroplaneo, que sirve como buena superficie en pavimentos en los que el ruido de rodadura no sea el condicionante básico. Las máquinas que ejecutan esta labor se denominan fresadoras y ejercen su acción mediante una especie de uñas acopladas a un eje de giro horizontal.

2. Cepillado. Lo realizan máquinas llamadas cepilladoras o más comúnmente rascadoras, las cuales únicamente pueden trabajar previo calentamiento del pavimento y desarrollan su labor por medio de unas cuchillas o útiles similares y sólo son utilizables para levantamientos de muy poco espesor.

3. Termo-reperfilado. Comprende un conjunto de operaciones que son realizadas por una sola máquina de forma secuencial a excepción de la compactación final. Estas operaciones son las siguientes:

Calentamiento previo del pavimento antiguo, generalmente mediante rayos infrarrojos.

- Escarificado o fresado del pavimento hasta la profundidad deseada, que generalmente no excede de 2.5 centímetros.
- Homogeneización del material escarificado y nivelación del mismo.
- Precompactación del material mediante una maestra adosada a la parte trasera de la máquina.
- Compactación definitiva hasta la densidad deseada, por medio de equipos normales de compactación.

La característica fundamental que distingue este sistema, es que no existe aporte de mezcla bituminosa nueva, lo cual impide que el material reciclado mejore sus características; esto limita su aplicación a la corrección de pequeñas irregularidades superficiales, a la corrección de excesos de deslizabilidad o cuando se quiere incrementar la densidad de la carpeta.

Consecuentemente, este tratamiento no resulta apropiado para corregir defectos de tipo estructural, por lo que no es aplicable en los casos en que existan elevadas deformaciones superficiales. Tampoco es viable cuando la mezcla asfáltica presente deficiencias de tipo granulométrico o exceso de ligante (caso de deformaciones plásticas), ya que, al no existir aporte de mezcla nueva, tales deficiencias no pueden corregirse.

4. Termo-regeneración. Esta técnica presenta una serie de características comunes con la anterior, con la diferencia de que existe un aporte de mezcla nueva que se coloca sobre la antigua escarificada (adicionada o no de un agente rejuvenecedor), compactándolas sin mezclarlas. El conjunto de operaciones a realizar es el siguiente:

- Calentamiento del pavimento mediante rayos infrarrojos.
- Escarificado y descompactación del pavimento, en una determinada profundidad.
- Retiro de parte del material escarificado, aunque a veces esta operación no se presenta, aprovechándose la totalidad.

- Adición, en caso necesario, de un agente rejuvenecedor.
- Distribución transversal del material escarificado mediante una hoja niveladora.
- Aporte de mezcla nueva, la cual es conducida mediante una banda transportadora, desde una tolva de recepción situada en la parte delantera de la máquina hasta su extremo final, donde es puesta en obra sobre la capa de material escarificado.
- Precompactación de las dos capas, sin mezcla de las mismas, mediante una maestra vibrante colocada en la parte posterior de la máquina.
- Compactación hasta la densidad deseada de las dos capas anteriores con un tren de compactación convencional.

Aunque es un proceso menos económico, a veces, la mezcla de aporte, puede colocarse en obra independientemente, mediante una terminadora convencional.

2.3.2.2 RECICLAJE EN EL LUGAR (IN SITU)

Consiste en la pulverización de la carpeta asfáltica existente y su mezcla con el material de base existente, añadiendo un aditivo que desarrolle en la capa reciclada una resistencia suficiente para soportar adecuadamente las cargas del tránsito futuro. La selección del aditivo apropiado depende de factores tales como el uso proyectado, la resistencia requerida y el costo del producto. Los aditivos más empleados para este tipo de reciclaje son el cemento asfáltico, los asfaltos líquidos y emulsionados, el cemento Portland y la cal cuando el material a reciclar tenga un contenido considerable de arcilla. En la mayoría de los procesos de estabilización, se requiere la colocación de una capa de rodadura para proteger la capa reciclada del efecto abrasivo del tránsito y de la acción de los agentes climáticos.

Selección del aditivo

Evaluadas las características de los materiales a reciclar, se elige el aditivo que proporcione el resultado final deseado. A menudo, con más de un aditivo se obtienen las características requeridas para la mezcla y en tales casos la elección se basa en consideraciones de costos y disponibilidad de los estabilizantes.

Así mismo, resulta conveniente estudiar la posibilidad de incorporar más de un aditivo. Es el caso, por ejemplo, de una base granular que se encuentre contaminada por el suelo arcilloso de la subrasante. En esta eventualidad, puede resultar conveniente un pre-tratamiento con cal que disminuya la plasticidad y haga más trabajable la mezcla a la cual se añadirá después otro aditivo que incremente la resistencia.

2.3.2.3 RECICLAJE EN PLANTA (EN CALIENTE)

Es un proceso por el cual se combinan materiales recuperados de un pavimento asfáltico y eventualmente de la base granular, con asfalto y agregados nuevos y/o agentes de reciclaje, según las necesidades, en una planta central, para producir mezclas para pavimentación en caliente. El producto terminado deberá cumplir todas las especificaciones y requisitos constructivos para el tipo de mezcla producida.

Agentes de reciclaje

Las alteraciones o cambios que sufren los asfaltos, ya sea durante el mezclado o en el transcurso del tiempo, conducen a un aumento de consistencia y por lo tanto a una pérdida del poder ligante y cohesivo del asfalto. Muchos investigadores consideran que un asfalto se encuentra en el límite de servicio, cuando presenta las siguientes características:

- Penetración (25°C, 5 seg. 100 g) < 20 (1/10 mm).
- Viscosidad absoluta a 60°C < 1400 Poises.

En el reciclaje de pavimentos, cuando lo que se busque sea reciclar asfaltos envejecidos (debe tenerse presente que el reciclaje se puede aplicar a pavimentos con mezclas de baja estabilidad donde el asfalto no es la causa del problema), lo que se intenta es volver las propiedades del asfalto a su estado original o lo más cerca posible de él. Para lograr este objetivo, se recurre a los "agentes de reciclaje", denominados también rejuvenecedores, ablandadores o modificadores, los cuales deben restaurar las características del asfalto original, no solamente en lo que se refiere a la consistencia, sino también a su estructura coloidal intrínseca.

El envejecimiento del asfalto de un pavimento es un proceso físico-químico complejo en el que están involucradas fundamentalmente reacciones de oxidación y evaporación. En última instancia, ese endurecimiento progresivo se pone de manifiesto a través de fenómenos visibles como el fisuramiento el desprendimiento de agregados, etc.

Los agentes de reciclaje deben cumplir las siguientes funciones:

1. Devolverle al asfalto envejecido su estructura físicoquímica para hacerlo nuevamente durable.
2. Restaurar en el asfalto un nivel de consistencia adecuado para una buena trabajabilidad de la nueva mezcla en sus etapas fundamentales de mezcla, compactación y servicio.
3. Contribuir a satisfacer la cantidad de ligante total requerido por el diseño de la nueva mezcla asfalto-agregado a reciclar.

Para cumplir estas funciones, los agentes de reciclaje, que en general son productos especiales derivados del petróleo, deben cumplir con las siguientes características:

- Alto contenido de hidrocarburos aromáticos.
- Alto punto de inflamación, por razones de seguridad.
- Alta viscosidad.

- Total compatibilidad y facilidad de difusión en el asfalto a reciclar.
- Resistencia al endurecimiento.

2.3.3 RECICLADO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON CEMENTO

El reciclado o recuperación es una técnica cuyo objetivo fundamental es transformar un pavimento degradado en una estructura homogénea y adaptada al tráfico que debe soportar.

La experiencia que se ha tenido en El Salvador demuestra que reciclar con cemento la capa base de una carretera deteriorada es una solución rápida, práctica, económica y duradera. ¿Se puede pedir algo más en nombre de la eficiencia?

La necesidad de mejorar las carreteras con asfalto deteriorado, sellado descascarado y con una base granular desnivelada, es una batalla constante.

El pavimento existente generalmente recibe mantenimiento con parches y delgados revestimientos, o simplemente emparejando y compactando el material de base desnivelado. Sin embargo, estos métodos no resuelven lo que con frecuencia es el problema principal en las carreteras deficientes, es decir, una capa base inadecuada o con fallas.

El uso de revestimientos gruesos sobre una nueva base es una estrategia que puede dar resultados, pero esta "reconstrucción" con frecuencia es muy costosa y no es un proceso típico estándar, a menos que la carretera sea de tránsito pesado y exija una estructura de pavimento de gran capacidad.

Sin embargo, la reconstrucción de este tipo no es una solución que pueda aplicarse a muchos kilómetros de carreteras rurales en el país.

Reciclar las viejas bases de la superficie con cemento es una solución rápida y práctica que crea una nueva base de adherencia (cuando se combina con una delgada capa superficial), y que ahorra dinero y proporciona muchos años de servicio con un bajo mantenimiento.

El cemento portland, combinado con los materiales pulverizados de las carreteras, amarra firmemente la vieja superficie con los materiales de la base. El resultado es una capa estabilizada, altamente resistente a cambios de humedad y a la degradación.

El Instituto Americano del Concreto informa que "el reciclado incrementa la resistencia de la base sin quitar los materiales de la antigua base o sub-base existentes, ni tener que reemplazarlos con grandes cantidades de material de base nuevo y costoso. Además, pueden mantenerse las líneas rasantes y de drenaje existentes.

Esto reduce los problemas con las guarniciones y cunetas o los pasos a desnivel. Otra ventaja de las carreteras recicladas con cemento es su capacidad para mejorar subrasantes débiles, reduciendo así los remiendos en baches y roderas.

Materiales

La aportación de materiales nuevos suele limitarse al cemento y al agua de mezclado. En algunos casos es preciso incorporar también agregados, bien como corrector granulométrico o bien con otros objetivos. En lo que se refiere a los cementos, los más adecuados son los que poseen las siguientes características:

- Un contenido elevado de adiciones activas
- Una resistencia media-baja
- Un desarrollo lento de resistencias a edades tempranas

La primera de ellas se traduce en un plazo de manejabilidad más elevado que en el caso de emplearse cementos sin adiciones; mientras que las otras dos dan lugar a un esquema de fisuración más favorable.

Estudios previos

Antes de efectuar un reciclado es preciso realizar una serie de estudios previos con objeto de:

- Verificar la factibilidad del reciclado
- Definir el tipo de reciclado
- Determinar las características del material reciclado mediante ensayos de laboratorio y obtener la fórmula de trabajo.

La factibilidad de un reciclado debe ser establecida mediante el conocimiento de la estructura del pavimento y de las características de los materiales que lo componen. Para ello se procederá al reconocimiento de la carretera, a la caracterización de los materiales de pavimento y a la obtención de los datos de tráfico y clima.

Además del pavimento en sí, hay que recoger datos sobre otros elementos que también pueden influir en el proyecto y ejecución del reciclado como:

- Drenaje
- Tráfico de proyecto
- Ensanches y arcenes
- Servicios existentes
- Toma de muestras representativas
- Caracterización de los materiales del pavimento

Una vez completada esta etapa, se tienen ya los datos suficientes para poder juzgar si se puede realizar o no un reciclado y, en caso afirmativo, definir con precisión este último.

Control de calidad

Como en cualquier tipo de obra, el control de calidad es imprescindible para garantizar la obtención de un resultado satisfactorio. Este control se desarrolla en dos etapas: una para controlar la ejecución de las obras mientras éstas se llevan a cabo, y otra para comprobar que el resultado final cumple con todas las exigencias.

En el caso de obras importantes, es necesario realizar previamente un tramo de prueba a fin de ajustar los parámetros de funcionamiento de los equipos de reciclado (sobre todo la velocidad de avance) y las condiciones de compactación (características de los compactadores y número de pasadas).

Costos de ejecución

En el caso del reciclado con cemento de un pavimento, su costo de ejecución depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- a. Volumen de material a reciclar, y en particular
- b. El espesor a reciclar (a mayor espesor, menor rendimiento y por tanto mayor costo)
- c. La superficie total (cuanto menor es la misma, más repercusión tienen algunos costos independientes del trabajo a realizar, como los de traslado de la maquinaria)

d. La forma de la superficie (los anchos proporcionales al de trabajo de la maquinaria reducen el número de operaciones, mientras que las formas irregulares, por ejemplo por la presencia de estacionamientos, disminuyen considerablemente el rendimiento)

A la vista de todos estos factores es fácil deducir que el costo de un reciclado puede variar de forma muy considerable de una obra a otra, en función sobre todo del volumen de material a reciclar y de las necesidades de cemento.

Comparación económica de la solución de reciclado con otras alternativas de rehabilitación

Es difícil responder de forma general a la cuestión de la economía que puede suponer la opción de un reciclado con cemento frente a otras alternativas de rehabilitación, porque deben considerarse las distintas circunstancias en cada país de coste de ligante bituminoso, conglomerantes hidráulicos, materiales granulares, mano de obra, características de tráfico (que pueden dar lugar a distintas soluciones de pavimento).

Consumo de cemento en las obras de reciclado

El consumo de cemento depende de la dosificación y espesor reciclado, pudiendo estar comprendido ente 16,3 kg/m² (4% de cemento y reciclado de 20 cm) a 30,6 (5% de cemento y 30 cm de espesor). Tomando un valor medio de 23,5 kg/m².

Una de las claves del desarrollo de esta técnica radica en la aparición en los últimos años de potentes equipos de reciclado que permiten reciclar con garantía hasta 35 cm de pavimento existente. Con ello los resultados son mucho más fiables que en las primeras experiencias, en las que se empleaba maquinaria agrícola.

En consecuencia, la longitud de km reciclada con cemento depende fundamentalmente del número de recicladoras existente y de la utilización que se dé a las mismas, pues pueden emplearse también para.

- Estabilización de explanadas con cemento y/o cal
- Reciclado de pavimentos con emulsión o betún espumado
- Reciclado de pavimentos con emulsión (o betún espumado) más cemento

En el caso de obras de reciclado con cemento, una cifra media de rendimiento puede ser 4000 m²/día, es decir, unos 500 - 600 m de calzada por día de trabajo.

Por tanto, aun suponiendo que un equipo de reciclado trabajase efectivamente 200 días/año, de los cuales un 50% se dedicasen a reciclado con cemento, la longitud de pavimento tratada sería del orden de 50 km/año por equipo.

Por tanto, para que el porcentaje de carreteras reciclado con cemento llegase a ser significativa, sería necesario contar con un número importante de equipos, y con un porcentaje amplio de su tiempo dedicado al reciclado.

El proceso básico

El procedimiento es simple y está bien establecido. Tanto las carreteras niveladas, como las que no lo están, pueden ser recicladas. Si la carretera contiene una superficie bituminosa, el asfalto debe ser relativamente quebradizo. Las superficies gruesas de asfalto que aún tienen elasticidad, podrían ser quitadas en vez de ser recicladas. Si se requiere un grosor incrementado de la base, se puede incorporar material de la subrasante, arcillas, limo o suelo granular, a la base reciclada.

Habitualmente se utilizan 15 cm de material reciclado, pero este grosor puede variar desde 10 hasta 30 cm, dependiendo de los requisitos.

La Asociación de Cemento Portland y el Consejo del Cemento y del Concreto de Texas, recomiendan que el material existente sea pulverizado en pedazos de menos de 5 cm, y que el 55 por ciento del material pase la malla núm. 4. Además, la capa bituminosa no debe componer más del 50 por ciento del material total.

Se puede permitir el tránsito local y de construcción sobre una base reciclada compactada, casi inmediatamente. Si llueve antes de la colocación de la superficie, la base reciclada se impermeabiliza de modo que no se requiera volver a trabajarla.

La carretera reciclada será más fuerte y durará más que una reemplazada. De hecho, la resistencia se incrementará durante la vida del pavimento, inclusive en la temporada de lluvia o en las condiciones de congelación de algunas regiones.

Si una carretera previamente nivelada se ha mejorado usando este método, se eliminará la necesidad de un mantenimiento continuo.

Reciclado con cemento – Esquema general

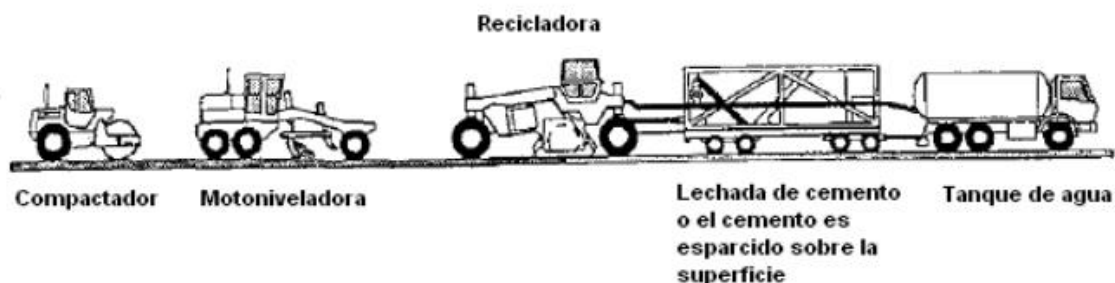


Figura 2.7 reciclado con cemento.

2.4 PERFILOMETRÍA LASER

La perfilometría es la técnica que mediante la utilización de perfilómetros inerciales laser permite realizar una investigación del estado funcional de las carreteras, midiendo variables que permiten conocer el nivel de funcionalidad que el pavimento actualmente posee, lo que permite establecer si la carretera se encuentra en condiciones para soportar y brindar las condiciones que los automovilistas necesitan para transportarse de manera cómoda y segura y para ello es necesario conocer su estado funcional representado mediante la regularidad que la vía presenta.

La regularidad de la superficie de una carretera es el parámetro que más incide en el viajero por influir en su comodidad y en su seguridad. Se puede definir como la suma de aceleraciones no deseadas que sufre un usuario al circular por una carretera.

Con el fin de aumentar los niveles de seguridad y confort del usuario de la carretera y de disminuir los costos de mantenimiento del binomio vehículo-carretera es necesario conseguir una buena regularidad superficial. Esta característica de la carretera depende de la calidad de ejecución de la obra nueva y del mantenimiento a lo largo de la explotación de la misma.

La evaluación funcional determina la capacidad de servicio que presta un pavimento al usuario y proporciona información que puede ser utilizada tanto en el diseño como en la gestión de la infraestructura, permitiendo priorizar las actividades de mantenimiento, rehabilitaciones y reconstrucciones. Permite también realizar inventarios del estado y la condición de la red vial, así como evaluar los costos adicionales en los cuales pueden incurrir los usuarios por el uso de la carretera. Se reconocen dos tipos de evaluaciones, la evaluación estructural (relacionada con la capacidad que tiene el pavimento para soportar las cargas de los vehículos) y la evaluación funcional (relacionada directamente con la percepción del usuario al utilizar una determinada vía).

En el caso de la evaluación funcional, la regularidad dada por la superficie de ruedo para la circulación de los vehículos, ofrece condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de las carreteras. Tiene incidencia en los costos de operación de los vehículos, puesto que dependiendo de la magnitud de las irregularidades superficiales, la velocidad de circulación puede verse afectada negativamente, lo cual puede reflejarse en un mayor desgaste en las llantas y el consumo de combustible. Adicionalmente, los efectos dinámicos producidos por las irregularidades de las carreteras pueden reflejarse no sólo en los vehículos, sino también en modificaciones de estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento, lo que puede incrementar los costos en las actividades de conservación y rehabilitación.

Existen diferentes tipos y modelos de perfilómetro, pero para efectos de esta investigación y con el cual se llevaron a cabo las mediciones se describirá el perfilómetro láser de Referencia Inercial (RSP) marca Dynatest, modelo 5051 mark III clase 1³

El Perfilómetro de Superficie de Dynatest (Road Surface Profiler, RSP) está cuidadosamente diseñado para proporcionar a los ingenieros de todo el mundo una solución avanzada, automatizada y de alta calidad para la medición de rugosidad del pavimento y medidas relacionadas. El RSP es capaz de medir, en forma continua, en tiempo real, y a velocidades de carretera, el perfil longitudinal (Índice de Rugosidad Internacional (IRI) y Ride Number (RN)) y el perfil transversal, la profundidad de ahuellamiento, la macro textura, y geometría.

El RSP Mark III puede ser instalado en una variedad de automóviles o camionetas utilizadas en todo el mundo. Se trata de un sistema de medición basado en PC. Procesadores de Señales Digitales (DSP) potentes se han colocado en placas de circuito impresas desarrolladas por Dynatest que se montan en ranuras ISA. Esto resulta en un sistema simplificado que consta de sólo dos componentes primarios:

- Una unidad de transductores (barra de ahuellamiento), que lleva hasta 21 sensores láser, 2 acelerómetros, y un sensor inercial de movimiento (Inertial Motion Sensor, IMS).
- Un computador personal PC con una pequeña unidad de procesamiento (Data Processor Unit, DPU).

La medición del perfil longitudinal se basa en el método de "South Dakota". Un acelerómetro se utiliza para obtener el movimiento vertical del cuerpo del vehículo, y un sensor láser se utiliza para medir el desplazamiento entre la carrocería del vehículo y el pavimento. El perfil de la superficie del pavimento se obtiene sumando el movimiento vertical del vehículo con la distancia al pavimento. El IRI es calculado de acuerdo con las especificaciones del Banco Mundial. El perfil longitudinal medido cumple la precisión y sesgo especificados para Clase 1 de

³ Según norma ASTM E950-98

acuerdo a la norma ASTM E-950, El perfil transversal y la profundidad de ahuellamiento se basan en un mínimo de 5 láseres, por las especificaciones AASHTO PP 38-00. Se pueden agregar un Sensor Inercial de movimiento (IMS), para medir las pendientes transversal y longitudinal y la curvatura.

2.4.1 INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)

En 1950, un grupo de expertos en pavimentos realizó una evaluación de la condición de la superficie de pavimentos de prueba. Esta evaluación se basó en: una inspección minuciosa, la experiencia de conducir sobre ellos y el uso de medidas tomadas con varios equipos de la época. La evaluación del grupo de expertos fue procesada para calificar al pavimento asignándole un solo número, el nombre que se le dio a ese número fue PSR -*Present Serviceability Rating*, Grado de Serviciabilidad Presente-. Este concepto fué utilizado para estudiar la variación del comportamiento del pavimento con el tiempo y para definir cuándo el pavimento estaba muy deteriorado y necesitaba rehabilitación. La estimación del PSR fue llamada PSI -*Present Serviceability Index*, Índice de Serviciabilidad Presente-, el cual está en función de la rugosidad y las fallas del pavimento.

Como parte del Ensayo de Carreteras de la AASHO (*American Association of State Highway and Officials*) (AASHO Road Test), realizado en los años cincuenta, fue desarrollado el concepto de funcionalidad, que se define como la capacidad que tiene un pavimento para cumplir su función principal que es servir al público que circula sobre él. De este ensayo surgió el término PSR (*Present Serviceability Index*, Grado de Serviciabilidad Presente), que fue el número promedio asignado a un pavimento de prueba en dicho ensayo, el cual se realizó por medio de una evaluación subjetiva, realizada por un grupo de expertos en pavimentos. La evaluación fue realizada conforme a la siguiente escala de calidad/comodidad al conducir sobre la superficie del pavimento:

Tabla ⁴ de evaluación del PSI	
PSR	Condición
0-1	Muy Malo
1-2	Malo
2-3	Regular
3-4	Bueno
4-5	Muy Bueno

Tabla. 2.5 valores de PSI para la evaluación funcional del pavimento.

El concepto de PSR fue utilizado para estudiar la variación del comportamiento del pavimento con el tiempo y para definir en qué momento el pavimento llega a un nivel de deterioro en donde es necesario realizar una rehabilitación. Sin embargo la evaluación hecha por el grupo de expertos fue simplificada y se estableció el Índice de Serviciabilidad Presente (PSI, *Present Serviceability Index*), el cual está en función de la rugosidad y los daños o fallas. El PSI fue originalmente definido a través de las siguientes expresiones

- Para pavimentos flexibles:

$$PSI = 5.03 - 1.91 * \log(1 + SV) - 1.38RD^2 - 0.01\sqrt{C + P}$$

- Para pavimentos Rígidos:

$$PSI = 5.03 - 1.78 * \log(1 + SV) - 0.09\sqrt{C + P}$$

⁴ Importancia de la regularidad superficial (iri) en la construcción de pavimentos asfálticos en caliente ing. Paul Lavaud Director Internacional para Latinoamérica y El Caribe ROADTEC, INC.

Dónde:

PSI = Índice de serviciabilidad presente.

SV = Promedio de la variación de la pendiente.

RD = Profundidad media del ahuellamiento.

C = Área con agrietamientos del tipo cuero de lagarto.

P = Baches.

Actualmente, la variable más representativa para determinar el estado de una carretera es la regularidad superficial o llamada también rugosidad superficial.

La regularidad de un pavimento está determinada por las ondulaciones longitudinales en las huellas de los neumáticos con respecto a una línea de referencia. Ver figura 2.8

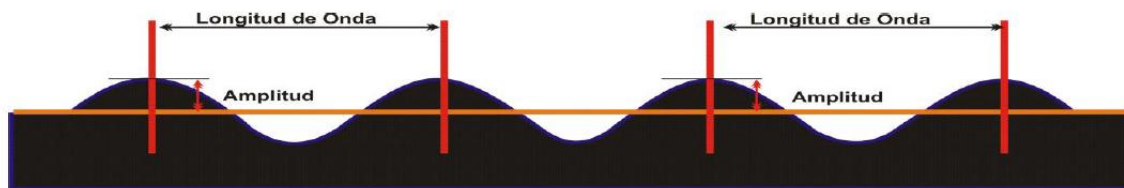


Figura 2.8 medición de la regularidad de un pavimento.

Debido al concepto del PSI, surgió una gran cantidad de aparatos y equipos para su medición y con la reproducción de equipos, también, surgieron muchas escalas de medición; esto hacía difícil la comparación de resultados, por lo que en 1982, por medio de un estudio realizado en Brasil y patrocinado por el Banco Mundial, se determinó el Índice de Rugosidad Internacional IRI -*International Roughness Index*- como una medida estándar de la rugosidad. Éste perseguía unificar los diferentes parámetros existentes utilizados en diferentes países para determinar la rugosidad.

Además del PSI también existe otra técnica para evaluar la capacidad funcional de un pavimento mediante el uso del concepto Índice de Condición del Pavimento (por sus siglas en inglés PCI).

Índice de condición del Pavimento. (PCI): índice numérico, desarrollado para obtener la irregularidad de la superficie del pavimento y la condición operacional de este. El PCI varía entre 0 para pavimentos fallidos y 100 para pavimentos en excelentes condiciones. Ver tabla⁵ 2.6

PCI	Condición
100 - 85	Excelente
85 - 70	Muy Bueno
70 - 55	Bueno
55 - 40	Regular
40 - 25	Malo
25 - 10	Muy Malo
10 - 0	Fallado

Tabla 2.6 de valores del PCI con su correspondiente descripción cualitativa de la condición del pavimento.

El Índice de Rugosidad Internacional se define como la acumulación del movimiento vertical no deseado que sufre la suspensión de una rueda -un cuarto de carro- cuando éste recorre la superficie a una velocidad de referencia de 80 km/h. Es pues, un índice de comodidad de rodadura, y constituye el parámetro de la vía que mejor percibe el usuario.

⁵ Importancia de la regularidad superficial (iri) en la construcción de pavimentos asfálticos en caliente ing. Paul Lavaud Director Internacional para Latinoamérica y El Caribe ROADTEC, INC.

La norma E 867 de la ASTM (*American Society of Testing and Materials*), define la rugosidad como las desviaciones entre una superficie de pavimento y una superficie plana con dimensiones características que afecten la dinámica del vehículo, calidad en el desplazamiento, cargas dinámicas y drenaje, tal como, perfil longitudinal y perfil transversal. La rugosidad del pavimento puede también ser definida como la distorsión de la superficie del pavimento que transmite aceleraciones verticales no deseadas en el vehículo que contribuyen a un desplazamiento incómodo y no deseable. Hay varios factores que contribuyen a la rugosidad del pavimento: cargas de tráfico, efectos ambientales, materiales y prácticas de construcción. La rugosidad del pavimento incrementa con un incremento en las cargas de tráfico.

La rugosidad del pavimento ha sido identificada como el factor más relevante en los análisis que toman en cuenta la calidad del camino versus costos de usuarios; en efecto, tiene directa influencia en la comodidad del usuario; costos de operación de los vehículos (consumo de combustible, desgaste); efectos sobre las mercancías transportadas y en las cargas dinámicas transmitidas por los vehículos pesados.

Últimamente la evaluación de la rugosidad del pavimento, a través del cálculo del IRI ha cobrado mucha importancia debido a que es uno de los indicadores exigidos a los concesionarios que postulan bajo bases de licitación. En la actualidad el valor del IRI es limitado al inicio y durante la operación de los tramos de carretera que son y serán administrados por concesionarios, esto a modo de asegurar un nivel de comodidad a los usuarios y establecer las sanciones que corresponda aplicar en el caso de incumplimiento.

Paterson en 1986, establece que “El IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie del camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino en un auto de pasajeros típico.

2.4.1.1 EL MODELO DEL CUARTO DE CARRO (QUARTER CAR)⁶

La definición del IRI se establece a partir de conceptos asociados a la mecánica vibratoria de sistemas dinámicos; en base a ella un vehículo se puede modelar, simplificada, por un conjunto de masas ligadas entre sí y con la superficie de la carretera, mediante resortes y amortiguadores.

El movimiento sobre el perfil de la carretera produce desplazamientos, velocidades y aceleraciones en las masas. Todo el sistema queda regido por la 1^a ley de Newton: fuerza = masa x aceleración.

Asumida esta forma de simular el comportamiento de los vehículos sobre la carretera, el vehículo se simplifica, por simetría, como un cuarto de carro, se modela por la magnitud de sus masas y constantes de resorte y de amortiguación. La masa del cuarto de carro se divide en dos partes, la superior, soportada por el sistema de suspensión (masa suspendida) y la parte inferior, independiente de la suspensión (masa no suspendida). La suspensión se esquematiza por un resorte (k_2) y por un amortiguador (c_2) y la parte no suspendida (prácticamente la rueda) se esquematiza, a su vez, por un resorte (k_1) que representa la deformabilidad o rigidez del neumático. La Figura 2.9 muestra el modelo de cuarto de carro, que sirve de base para la definición del IRI y otros muchos estudios relacionados con la dinámica de automóviles.

⁶ Según norma ASTM E-1170 -97, concepto del modelo de cuarto de carro.(proceso de cálculo del IRI)

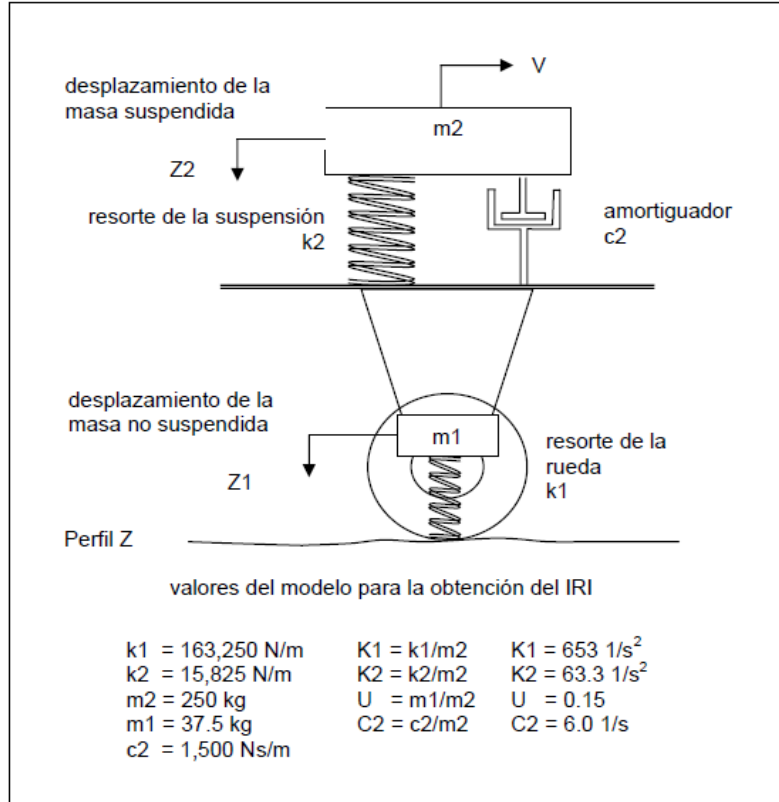


Figura 2.9 modelo del cuarto de carro (quarter car), fuente Benjamin Soto Nuñez, Control de Calidad en Pavimentos, Tesis.

Si a los valores de los parámetros m_1 , m_2 , k_1 , k_2 , y c_2 se les asignan los valores correspondientes al modelo denominado “Golden Quarter Car”, y se fija como velocidad de referencia 80 km/h, se tienen establecidas las bases para obtener el IRI. Cualquier modificación en los valores numéricos de los parámetros o de la velocidad de referencia desvirtuaría la definición del IRI.

Teniendo en cuenta lo anterior, el IRI en cada punto se define como el valor absoluto de la variable $|z'_2 - z'_1|$ de las masas suspendida y no suspendida. A la variable $|z'_2 - z'_1|$ se le denomina “pendiente rectificada de perfil filtrado”, porque en definitiva es la pendiente de un perfil (distinto, pero derivado del perfil de la carretera), filtrado por las características del modelo de cuarto de carro “Golden Quarter Car”.

Si además se tiene en cuenta que los datos del perfil son discretos, es decir, son adquiridos mediante muestreo (una cota cada determinado intervalo), el IRI es la media aritmética de la sumatoria de todos los valores de la variable $|z'_2 - z'_1|$ en la longitud de evaluación.

La expresión algebraica que permite obtener el IRI en forma discreta es:

$$IRI = \frac{\sum_1^n |z'_2 - z'_1|}{n}$$

Si por cualquier circunstancia se dispusiera de una función que definiera el perfil en forma continua, la expresión anterior se convierte en:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^L |z'_2 - z'_1| \cdot dx$$

Dónde:

n = Número de puntos.

L = Longitud de análisis.

$|z'_2 - z'_1|$ = Valor absoluto de la pendiente rectificadora.

Los valores de IRI se expresan como la variación acumulada del movimiento por unidad de longitud, es decir en mm/m (milímetros por metro), m/km (metros por kilómetro) o pulg/mi (pulgada por milla). La Figura 2.20 muestra los valores típicos de IRI para distintos tipos de estructuras de pavimento.

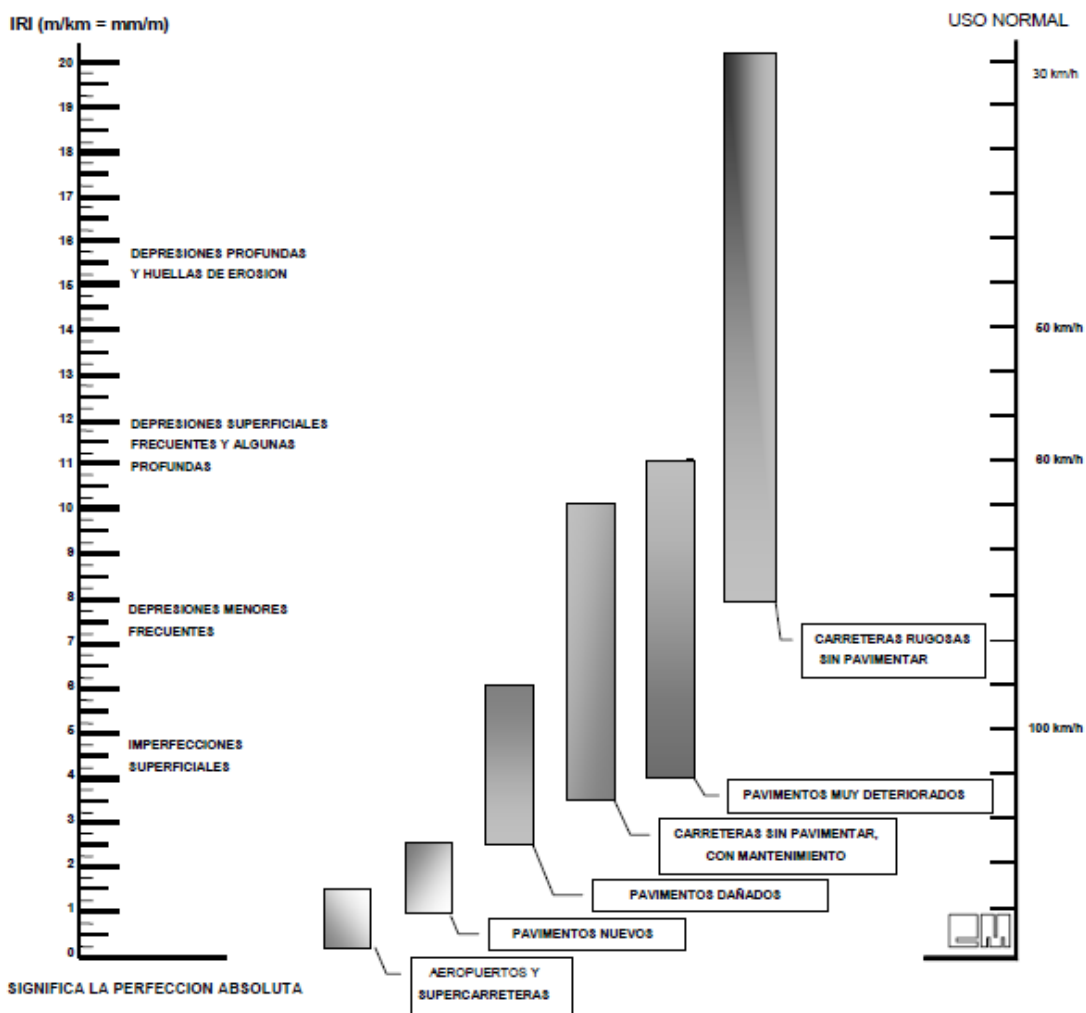


Figura 2.10 valores del Índice de Rugosidad Internacional (IRI). Fuente CM ingenieros.

Por lo tanto, se establece un índice de servicio similar al establecido por AASHO para evaluar la condición de un pavimento, pero considerando el Índice de Rugosidad Internacional (IRI). En la siguiente tabla⁷ se presentan valores para su clasificación funcional

⁷ Importancia de la regularidad superficial (iri) en la construcción de pavimentos asfálticos en caliente ing. Paul Lavaud Director Internacional para Latinoamérica y El Caribe ROADTEC, INC.

IRI	Condición
0 - 1	Muy Buena
1 - 1.9	Buena
1.9 - 3.5	Regular
3.5 - 6.4	Mala
6.4 - 16	Muy Mala

Tabla 2.7 Condiciones del pavimento según IRI.

El índice de serviciabilidad de un pavimento, es un valor de apreciación con el cual se valúan las condiciones de deterioro o confort de la superficie de rodadura de un pavimento; actualmente para medir este deterioro se utiliza el IRI, Índice Internacional de Rugosidad (International Roughness Index), para lo cual se utiliza un equipo sofisticado montado en un vehículo, el que al pasar sobre la superficie de una carretera, va midiendo los altibajos y los suma, por lo que al final se obtiene un valor acumulado en metros por kilómetro (m/km) o pulgada por milla (plg/milla). Para correlacionar el Índice de Serviciabilidad y el IRI, se utiliza la siguiente fórmula⁸.

$PSI = 5e^{-0.0041 \cdot IRI}$ nota: esta fórmula esta en pulgadas sobre millas, por lo que para ser coherente con las unidades del IRI se realizó la siguiente conversión:

1 m/km ----- plg /milla

1 m/km x (39.3700787 pulg/milla) x (1 km/0.621371192 milla)

1 m/km = 63.36 pulgadas / milla

Al multiplicar este valor por la $PSI = 5e^{-0.0041 \cdot IRI}$ de cómo resultado

$$PSI = 5e^{-0.26IRI}$$

⁸ Capítulo 3, del manual centroamericano para el diseño de pavimentos.SIECA.

Mediante la cual se puede realizar un análisis comparativo entre las dos variables, y comparar los valores que ambas variables arrojan mediante sus respectivos procedimientos de evaluación.

PSI⁹	IRI	Condición Del Pavimento
5-4	0-1	Muy Buena
4-3	1-1.9	Buena
3-2	1.9-3.5	Regular
2-1	3.5-6.4	Mala
1-0	6.4-16	Muy Mala

Tabla 2.8 cuadro comparativo PSI-IRI

El cálculo de IRI es muy importante debido a que es el parámetro que permite realizar la evaluación funcional de la carretera, conocer su estado, su necesidad de mantenimiento ya sea correctivo o preventivo, conocer su evolución de trabajo desde que se construyó hasta la realización de las pruebas. En síntesis conocer sobre no solo su estado sino la efectividad de los procesos constructivos de las diferentes técnicas para el diseño y ejecución de proyectos viales.

2.5 DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO

La evaluación estructural de pavimentos consiste, básicamente, en la determinación de la capacidad portante del sistema pavimento-subrasante en una estructura vial existente, en cualquier momento de su vida de servicio, para establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación, Ante la necesidad de realizar una evaluación estructural, tradicionalmente se ha recurrido a la perforación de calicatas, a la toma de muestras para su ensayo en el laboratorio, y

⁹ Importancia de la regularidad superficial (iri) en la construcción de pavimentos asfálticos en caliente ing. Paul Lavaud Director Internacional para Latinoamérica y El Caribe ROADTEC, INC.

al análisis de cada uno de sus componentes (materiales) por separado, para incorporarlos luego en el sistema (pavimento) y deducir acerca de las características estructurales del mismo. Esta metodología es cara, lenta, altera el equilibrio del sistema al perforar y es "destruktiva".

Una de las técnicas que se están utilizando principalmente en la evaluación estructural de pavimentos es la Deflectometría de impacto (FWD). La cual representa una respuesta total del sistema ante la aplicación de una carga externa. Debido a la aplicación de esta carga, tanto en las capas de la estructura como en la subrasante, se desarrollan esfuerzos y deformaciones, Su medición es simple, rápida, económica y "no destructiva", es decir, no se alteran el equilibrio ni la integridad del sistema.

Se conoce con el nombre de deflexión Los desplazamientos verticales que se generan debido a las cargas externas (el paso de los vehículos). La medición de deflexiones es usada para diversos fines. Con ellas se logra conocer la capacidad estructural de un pavimento, se determina la uniformidad estructural de un proyecto, facilita la identificación de zonas débiles y/o deterioradas, proporciona información para el cálculo de la vida residual del pavimento, contribuye al diseño de rehabilitaciones y en general, estas mediciones son utilizadas en las actividades asociadas a la gestión de pavimentos.

La deflexión es una característica de cada tipo y estado del pavimento que está relacionada con los valores de los módulos de las capas. Adicionalmente, vale la pena mencionar que cuando se aplica la carga en la superficie, no solo se desplaza el punto bajo la carga (deflexión máxima), sino que también se producen deflexiones a su alrededor; generando lo que se conoce como cuenco de deflexión. La interpretación del estado estructural de un pavimento se realiza midiendo el desplazamiento vertical (deflexión) que presente éste bajo una carga normalizada utilizando para ello equipos y técnicas de medida especializados denominados Deflectómetro o Deflectógrafos.

Otra característica de la metodología de evaluación no destructiva, es que por constituir la "muestra de ensayo" el pavimento mismo, esta representa el fiel reflejo de la compleja interacción entre sus componentes (capas de materiales y subrasante), y además esta "muestra" puede ser ensayada en cualquier momento de su vida sin alterar sus condiciones de servicio y estructurales.

2.5.1 EQUIPO REPRESENTATIVOS PARA MEDICIÓN DE DEFLECTOMETRÍA

2.5.1.1 VIGA BENKELMAN (carga estática)

Es un instrumento mecánico simple el cual permite conocer diferentes estados y propiedades del pavimento. Es el dispositivo más sencillo para trabajos de Deflectometría (Ver figura 2.10). La ventaja principal de trabajar con este instrumento es su bajo costo. Para su uso se deben tener en cuenta las siguientes hipótesis.

1. La estructura del pavimento se comporta elásticamente.
2. Durante el tiempo de ensayo, los tres apoyos de la estructura portante de la viga están fuera de la zona de influencia de la rueda de carga.
3. La posición final de la rueda de carga es tal, que el punto de contacto entre la punta del brazo de medida y la superficie, está fuera de la zona de influencia de la carga.

En la medición se utiliza un camión de dos ejes, con una capacidad aproximada de 5 toneladas y una carga en el eje trasero de 8.2 ton, igualmente distribuidas en las dos ruedas, cada una de las cuales debe tener dos llantas (de las mismas características). Las llantas deben ser de 10.00"x20" y doce lonas, infladas a una presión de 5.6 kg/cm² (80 libras/pulgada cuadrada).



Figura 2.11 Viga benkelman para medición de Deflectometría.

2.5.1.2 DEFECTÓGRAFO LACROIX

Es en términos simples la automatización de la viga Benkelman y mide las deflexiones del pavimento de manera casi continua bajo la carga del eje posterior de un camión. Consiste de básicamente dos vigas Benkelman de menor longitud una para la huella izquierda y otra para la huella derecha.

Las medidas de deflexión se realizan de manera automática entre las ruedas duales a ambos lados del eje trasero del vehículo y van quedando registradas en un papel mientras el vehículo se desplaza a una velocidad continua de unos 3 a 4 kilómetros por hora. Cuando el carro está quieto se realiza la medida, para después colocarlo en la siguiente posición, 5 metros más adelante. Se obtienen valores de gran interés como el radio de curvatura y la deflexión máxima.

El Deflectógrafo se encuentra acoplado a un chasis cuya distancia de 4.50 m entre ejes está adaptada a la longitud del trineo de medida que se encuentra bajo él. El chasis posee en su parte intermedia una cabina de mando donde se ubica el operador con los elementos electrónicos de registro y en su parte posterior tiene un tanque para almacenar agua con el cual es posible variar la carga del eje trasero en un rango de 6 a 13 toneladas (Ver Figura 2.12).



Figura 2.12 Deflectógrafo Lacroix.

2.5.1.3 DEFLECTOMETRO DE IMPACTO.

El Deflectómetro de Impacto (FWD) es un equipo que aplica una carga de impacto a la superficie del pavimento, determinando los desplazamientos verticales (cuenco de deflexiones) producidas en él. Se trata de un ensayo no destructivo, que simula el comportamiento del pavimento ante el paso de los vehículos pesados. Puede ser utilizado en pavimentos de asfalto, hormigón o una composición de ambos, o bien, sobre cualquier capa de un pavimento en construcción. A través del análisis de este cuenco se obtiene información de la rigidez de la estructura de pavimentos y su suelo de fundación, siendo ella muy importante para definir la condición de la estructura a lo largo de un proyecto.

Lo anterior es fundamental para evaluar actividades relacionadas con la rehabilitación, mantenimiento o control de calidad.

El equipo se encuentra constituido por cuatro sistemas principales; sistema de control, sistema de procesamiento, sistema de aplicación de cargas, y sistema de medición de cargas y deflexiones. Físicamente los dos primeros sistemas se encuentran instalados en un vehículo de arrastre y los otros dos en un remolque. La característica principal del Deflectómetro de Impacto radica en el sistema de aplicación de carga, ya que permite generar impulsos de carga que modelan en forma bastante aproximada tanto la magnitud como la duración de las cargas que imponen los vehículos al pavimento. En general, existen dos tipos de Deflectómetro de Impacto, que se distinguen principalmente por el rango de carga que son capaces de modelar, según los valores indicados en la siguiente tabla.

Rango de cargas que aplica el Deflectometro de Impacto		
Tipo de equipo	Rango de carga (KN)	Rango de Carga (LBF)
Falling weight deflectometer (FWD)	7 -120	1500 - 27000
Heavy Weigth Deflectometer (HWD)	30-240	6000-54000

Tabla 2.9, valores de carga de los diferentes tipos de deflectómetro.

El sistema de medición de carga consiste en una celda de carga, de precisión, la cual registra la fuerza máxima aplicada sobre el plato de carga producto del impulso de carga aplicado. El sistema de medición de las deflexiones se compone de un conjunto de sensores, los cuales se colocan en la superficie del pavimento a fin de determinar el cuenco de deflexiones máximas provocado por el impulso de carga aplicado. La distribución y número de los sensores depende del estudio a realizar.

El modelo de FWD que se utilizará en este estudio es capaz de generar cargas de hasta 120 kN (12 toneladas) y funciona con nueve sensores para medir deflexiones. El FWD es remolcado por un vehículo desde el cual se realiza toda la operación del equipo y la recolección de datos en forma automática. A continuación (figura 2.13) se muestra el equipo realizando mediciones del proyecto.

El equipo utilizado para la ejecución de los ensayos, consiste en un Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer (FWD)), marca Dynatest, modelo 8000, el cual posee nueve (9) sensores (geófonos) y un (1) plato de carga de 30 cm de diámetro. Los ensayos se realizaron aplicando una carga de 9000 lb. (Propiedad del Ministerio de Obras Públicas, Unidad de Investigación y Desarrollo Vial "UIDV")



Figura 2.13 Deflectómetro de impacto (FWD) DYNATEST MODELO 8000."MOP-UIDV"

A partir de la información proporcionada por el FWD es posible realizar diversos estudios sobre la capacidad estructural de los pavimentos, entre los que se encuentran: **evaluación de la capacidad estructural y vida remanente**, lo que permite efectuar un buen diseño de las rehabilitaciones. Por ejemplo, en diseño de rehabilitaciones se puede utilizar la información de las características de las capas para identificar tramos que requieran soluciones distintas y además utilizar dichos valores para diseñar las rehabilitaciones según el método AASHTO, el que reconoce y establece procedimientos con FWD.

La evaluación estructural de pavimentos está basada en la interpretación de curvas de deflexiones, decir; el cuenco de deflexiones generada a partir de la información recolectada mediante el Deflectómetro el cual está constituido por una masa que se deja caer por gravedad desde una altura determinada, sobre una placa circular provista de un sistema de distribución, que transmite la carga de manera uniforme a la superficie sobre la que se apoya. Esta carga de impulso dinámico simula el efecto de una rueda de vehículo en movimiento. Y la respuesta del pavimento es registrada mediante los geófonos ubicados a diferentes distancias del plato de carga (punto de referencia para la ubicación de los diferentes geófonos) y esta luego es procesada en el sistema computarizado del equipo. (Ver figura 2.14)

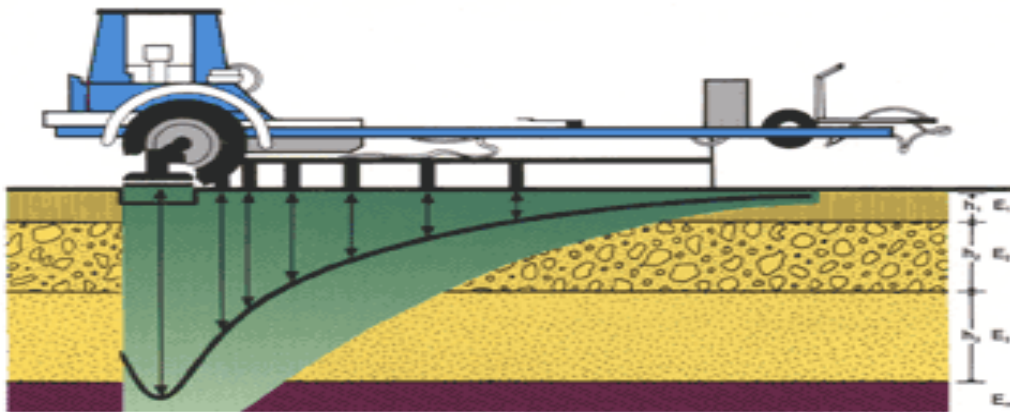


Figura 2.14 Aplicación de carga del deflectómetro de impacto fwd dynatest 8000.



Figura 2.15 Deflectómetro de impacto (FWD) marca dynatest 8000.

Mediante el uso de este dispositivo se puede determinar las siguientes características:

Caracterización de los materiales de las capas:

La caracterización de las capas según su rigidez es indispensable al momento de diseñar una medida de mantención. El FWD permite obtener los parámetros de rigidez de cada una de las capas del pavimento, por ejemplo:

- Deflexión máxima.
- Valores del módulo de reacción de la subrasante (k),
- Módulo de resiliente de la subrasante (MR),
- Valores de módulos elásticos de capas superiores: asfalto (E_{asf}) y hormigón (E_{hor}) y el número estructural efectivo de los pavimentos asfálticos.

El valor de la deflexión que sufre el pavimento bajo la acción de una carga cualquiera depende no solo de la magnitud de ésta, sino también de la relación esfuerzo – deformación característica de todos los materiales que constituyen la estructura del pavimento y la subrasante, en las condiciones de temperatura y humedad presentes en el instante de aplicación de la carga.

A continuación se describen algunos de los factores que afectan la medición de las deflexiones:

Factores asociados a la configuración del pavimento.

Espesores de capas: El espesor de las capas es un factor importante, ya que una diferencia del 10% en el espesor puede resultar en un cambio de más del 20% en el valor obtenido mediante el cálculo inverso. **Estado Superficial de la capa de rodadura:** Debido a que la teoría elástica no considera discontinuidades no es aconsejable realizar estos ensayos en zonas con fisuras y grietas; luego se aconseja que la carga aplicada y los sensores deben estar alejadas por lo menos 1.5 m de cualquier fisura.

Factores asociados a los equipos.

Magnitud y tiempo de duración de la carga: Como regla general la carga del ensayo no debe ser menor que la mitad de la carga de diseño. Aunque la magnitud de la carga aplicada en los diferentes dispositivos sea igual, la deflexión de una misma estructura de pavimento puede ser distinta debido a las diferencias inherentes en los pulsos de carga, que tienden a producir respuestas distintas del pavimento.

La duración de la aplicación de la carga (pulso de carga) afecta las deflexiones, de modo tal que entre menor sea el pulso de carga, menor es la deflexión que sufre la estructura. Así los dispositivos de carga estática tienden a producir deflexiones significativamente más altas que las generadas por cargas de ruedas en movimiento. Así mismo, la literatura menciona que el FWD es el que mejor representa el efecto de un vehículo en movimiento.

Precisión de los componentes de medición: La mayoría de los sensores que miden la deflexión tienen una precisión alrededor del 2%. Éste error puede ser mayor del 2% debido a las condiciones superficiales del pavimento o, por la forma que el sensor descansa sobre la superficie. La celda de carga montada en el plato de carga tiene su propio error. Estos errores son de carácter aleatorio. Un error en la celda de carga puede generar un error similar en el módulo retro calculado, mientras que errores en el sensor conllevan a errores inaceptables en el retro cálculo.

2.5.2 CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES DE LAS CAPAS

Mediante la caracterización de las capas se puede obtener diversa información estructural de los pavimentos. Se obtienen los parámetros de rigidez de cada una de las capas del pavimento lo que corresponde al proceso de retro-análisis mediante el cual se obtienen las características o parámetros que son representativos de la condición estructural de cada capa.

Además permite determinar cambios en la capacidad estructural del pavimento, los que se pueden deber a cambios en la estructuración, los deterioros o el suelo. Por ejemplo, se puede determinar que un tramo tiene en promedio mejores características de deflexión que otro, y, dentro de un mismo tramo, se puede establecer si este posee o no buena dispersión de esa variable.

Logrando así el establecimiento del llamado "Cuenco de Deflexiones" o línea de influencia de la deformada que permite estudiar el pavimento como una estructura multicapa (serie de capas de varios espesores y módulos). Ver figura 2.15

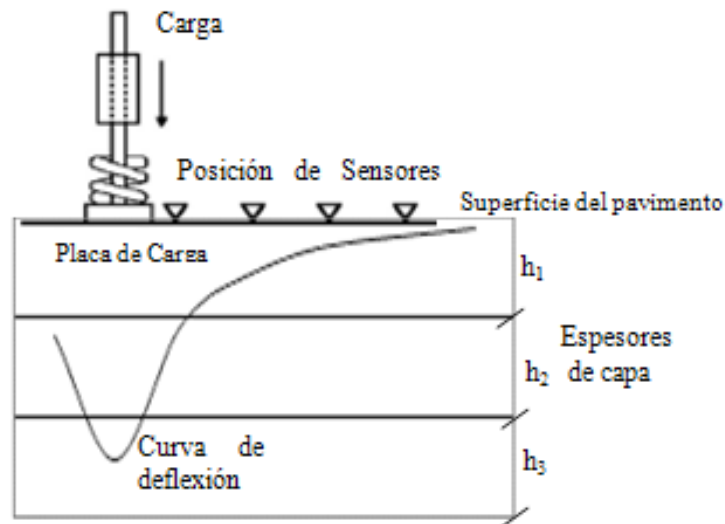


Figura 2.16 Prueba de deflexión por impacto.

2.5.2.1 DEFLEXIÓN MÁXIMA (d_0)

Deflexión máxima: representa la deflexión vertical de la superficie del pavimento, bajo el punto donde se aplica la carga. Este parámetro es un indicador general de la condición estructural de los pavimentos, cuyo principal uso es definir tramos que presenten diferentes características estructurales.

Esta variable se obtiene a partir de la medición directa de ensayo de carga realizado con el FWD. Esta variable es un indicador altamente confiable de la respuesta de todo el sistema de pavimento. Ver figura 2.17

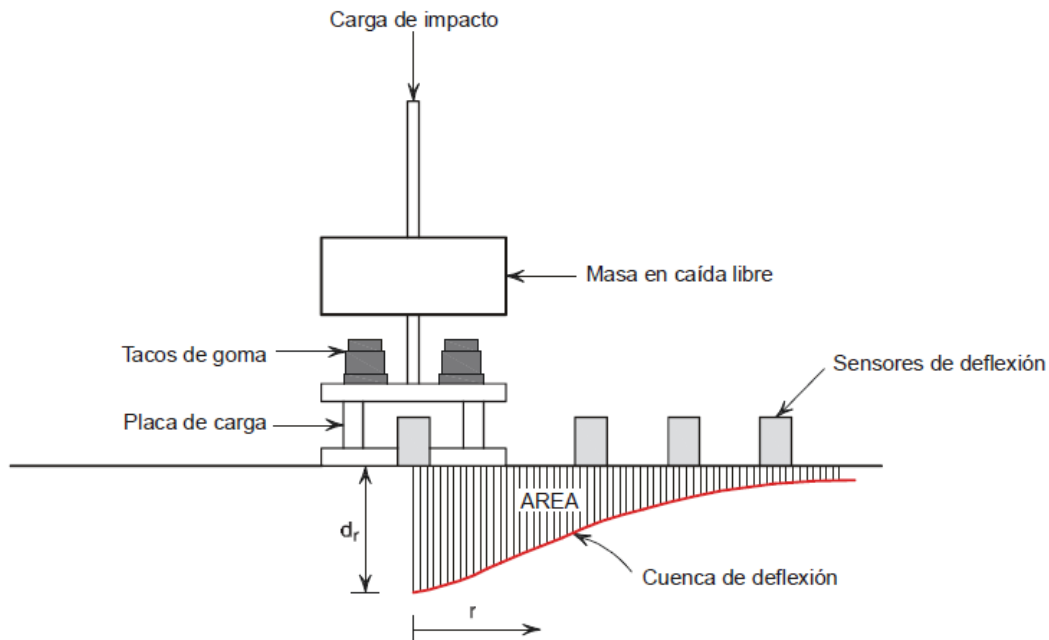


Figura 2.17 Deflexión máxima D_0 , valor registrado exactamente abajo el plato de carga.

2.5.2.2 MÓDULO RESILIENTE (MR)

La Subrasante es la capa en la que se apoya la estructura del pavimento y la característica especial que define la propiedad de los materiales que componen la subrasante, se conoce como Módulo de Resiliencia. (MR)

El módulo resiliente de la subrasante: Representa el módulo elástico del suelo luego de aplicar cargas cíclicas sobre él. Este parámetro se emplea para caracterizar el suelo de la subrasante en un pavimento asfáltico y se utiliza en los diseños de pavimentos asfálticos y de recarpeteado de asfalto sobre hormigón.

El cálculo del MR puede ser determinado por:

- 1.0 Laboratorio de pruebas.
- 2.0 El cálculo regresivo NDT (pruebas no destructivas.)
- 3.0 La estimación los estudios de correlación del módulo resiliente.(CBR-MR)
- 4.0 Diseño original y los datos de la construcción.

Independientemente del método utilizado, el valor del módulo resiliente tiene que ser consistente con el valor utilizado en la ecuación de rendimiento para el diseño de la sub-base de prueba AASTHO. Esto es especialmente importante cuando el módulo resiliente “MR” está determinado por el cálculo regresivo NDT.

Existen diferentes métodos para medir la resistencia de los suelos de la subrasante que han sido sometidos a cargas dinámicas de tránsito, entre los cuales están:

- Relación de Valor Soporte de California (CBR, California Bearing Ratio).
- Valor de resistencia Hveem (Valor R).
- Ensayo de plato de carga (Valor k).
- Penetración dinámica con cono.
- Módulo resiliente (MR) para pavimentos flexibles.
- Módulo de reacción (K) para pavimentos rígidos.

Mediante la Deflectometría se puede realizar el cálculo del módulo resiliente, que luego mediante análisis regresivo se puede conocer la caracterización de la subrasante, con el cual se puede recrear el comportamiento que el pavimento presenta cuando un vehículo circula sobre un pavimento sus ruedas transmiten cargas que generan, al interior de la estructura de ese pavimento y el suelo de fundación, un estado de esfuerzos que a su vez induce un estado de deformaciones. Si el material de la capa se supone linealmente elástico, isotrópico y homogéneo, ambos estados se consideran relacionados entre sí a través del Módulo de Elasticidad y la Razón de Poisson propios del material.

Sin embargo la respuesta real de los materiales utilizados en la construcción de pavimentos y suelo de fundación, muestra que bajo pulsos de carga dinámicos como los inducidos por las ruedas de los vehículos, solo parte de la deformación total generada se recupera al cesar la sollicitación aplicada. Esto implica que en estricto rigor este tipo de materiales no presenta un comportamiento elástico. En consideración a este hecho se introduce el concepto de Módulo Resiliente, que se

define como aquel que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables [AASHTO, 1993].

El método AASHTO, permite determinar el módulo resiliente de la subrasante (MR) y el módulo efectivo del pavimento (Ep), datos que pueden ser luego utilizados en la evaluación de la capacidad estructural del pavimento. En este método el pavimento se modela como un conjunto de dos capas, una correspondiente a todas las capas sobre la subrasante y otra correspondiente a la subrasante.

La siguiente figura esquematiza el proceso que se lleva a cabo mediante la utilización de deflectómetro de impacto y como el pavimento responde a la acción que este le genera mediante la aplicación de la carga y que con esto se logra mediante información de deflexiones calculadas en diferentes puntos, obtener el parámetro del módulo resiliente.

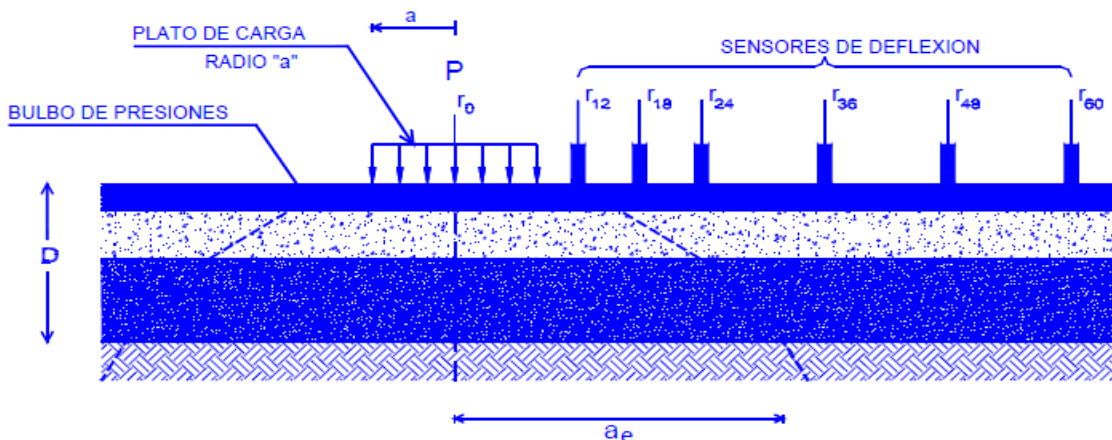


Figura 2.18 Esquema de medición de deflexiones con Deflectómetro de Impactos.

El módulo resiliente se calcula utilizando la siguiente ecuación¹⁰:

$$MR = \frac{0.24P}{d_r * r} \quad \text{Ecuación A.1}$$

¹⁰ La ecuación del módulo resiliente y el proceso de cálculo es el recomendado por la Guía AASTHO 1993.

Dónde:

MR= Módulo Resiliente. (Retrocalculado.)

P = Carga Aplicada.

d_r = Deflexión a una distancia “r” desde el centro de la carga.

r = Distancia desde el Centro de la Carga.

El uso de la ecuación anterior su uso debe considerar las siguientes dos condiciones:

En primer lugar, la deflexión debe ser medida a una distancia suficientemente alejada del plato de carga como para que esta deflexión se deba sólo a la deformación en la subrasante y sea independiente del efecto de las capas superiores, y además se pueda considerar la carga aplicada sobre el plato como una carga puntual que valide el uso de la ecuación anterior.

Por otro lado, y en sentido contrario, la distancia no debe ser muy grande ya que las deflexiones podrían ser muy pequeñas y por lo tanto muy difíciles de medir con la exactitud necesaria.

La distancia mínima a utilizar en la ecuación, debe cumplir con la siguiente condición:

$$r \geq 0.7ae \quad \text{Ecuación A.2}$$

Dónde:

$$ae = \sqrt{a^2 + \left(D * \sqrt[3]{\frac{EP}{MR}}\right)^2} \quad \text{Ecuación A.3}$$

ae = Radio del bulbo de presiones a nivel de subrasante.

a = Radio del plato de carga.

D = Espesor total del pavimento sobre la subrasante.

Ep = Módulo efectivo del pavimento.

Como se puede apreciar, para verificar si la deflexión utilizada cumple con la distancia mínima se debe primero conocer el módulo efectivo del pavimento (Ep), el cual se debe determinar mediante la siguiente ecuación A.4:

$$d_o = 1.5 * P a \left(\left(\frac{1}{MR * \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} * \sqrt[3]{\frac{EP}{MR}}\right)^2}} \right) + \left(\frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a}\right)^2}}}{EP} \right) \right)$$

Ecuación A.4

Dónde:

do= Deflexión Máxima en el Centro del Plato de Carga.

P= Presión del Plato de Carga.

D= Espesor Total del Pavimento sobre la Subrasante.

EP= Módulo Efectivo del Pavimento.

MR= Módulo Resiliente.

El método recomendado para la determinación de la MR de diseño del cálculo regresivo NDT requiere un factor de ajuste (C) para hacer que el valor calculado en consonancia con el valor utilizado para representar a la sub-base AASHTO. Un valor para C que se recomienda para el ajuste de al diseño módulo resiliente por lo tanto la ecuación resultante es:

$$MR = C \frac{0.24P}{d_r * r}$$

Ecuación A.5

Para el ajuste del valor del MR, se recomienda Un valor para C de no más de 0.33, pero se recomienda el uso de un valor de C=0.25 para realizar un mejor ajuste del valor del módulo resiliente¹¹.

¹¹ Según capítulo 5 parte III de la guía para el diseño de estructuras de pavimentos AASTHO 1993.

Además de la evaluación estructural, NDT puede proporcionar otros datos útiles para el proceso de diseño. Datos de deflexión puede ser utilizado para cuantificar la variabilidad a lo largo del proyecto y para subdividir el proyecto en segmentos de resistencia estructural similar Los datos de NDT. Inclusive puede servir para determinar espesores de recubrimiento con fines funcionales y/o estructurales.

2.5.2.3 NÚMERO ESTRUCTURAL. (SN)

El método AASHTO emplea el concepto de Número Estructural (SN) que representa la capacidad de un firme para soportar las sollicitaciones del tráfico. Tiene unidades de longitud y se expresa en milímetros, pulgadas.

Representa la capacidad estructural de un modelo de pavimento flexible, calculado a partir de la información del cuenco de deflexión, del módulo equivalente y del espesor total del modelo estructural, y se determina por medio de la ecuación.

Cuando se dispone de ensayos de deflexión realizados con deflectómetro de impacto los datos sirven para determinar las propiedades (módulos) de los materiales necesarios para determinar la capacidad estructural efectiva, actual y futura.

Mediante las ecuaciones que se indican en los apartados siguientes se determina:

- Módulo Resiliente.
- Módulo Efectivo del Pavimento.

El valor del Número Estructural efectivo (SN_{eff}) se determina a partir de la ecuación:

$$SN_{eff} = 0.0024D\sqrt[3]{EP}$$

Ecuación A.6

Dónde:

SN_{eff} = Número Estructural Efectivo.

D= Espesor Total del pavimento.

EP= Módulo Efectivo del Pavimento.

El módulo efectivo es una medida de la contribución estructural del firme existente, su cálculo requiere un valor del módulo resiliente (que también ser determinado

mediante cálculo inverso) y los valores de deflexión bajo carga obtenidos con deflectómetro de impacto.

2.6 AHUELLAMIENTO

La mezcla asfáltica en el pavimento flexible está sujeta a múltiples acciones que disminuyen su vida útil a lo largo del tiempo. Estas acciones son entre otros el tráfico y el clima. Los daños producidos en las carpetas asfálticas que han sido identificados, son conocidos como deformaciones permanentes (ahuellamiento), grietas por fatiga y grietas por temperatura. Todos estos daños están *comúnmente* asociados en mayor escala a las características finales de la mezcla asfáltica y a las características constitutivas de la misma.

Ahuellamiento: El ahuellamiento es un tipo de defecto o falla que se produce en pavimentos asfálticos, cual consiste en una depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos. Se produce en pavimentos asfálticos sometidos a una combinación de elevados niveles de tránsito, tráfico pesado y/o lento y altas temperaturas de servicio.¹²

Se desarrolla gradualmente y aparece como una depresión continua en las bandas de circulación de los neumáticos, dificultando la maniobrabilidad de los vehículos y ocasionando una disminución en la seguridad¹³.

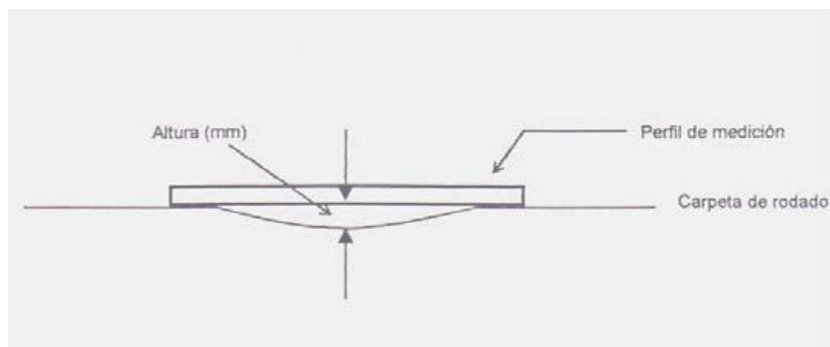


Figura 2.19 ahuellamiento.

¹² Thenoux Z., Guillermo; Carrillo O., Héctor. Análisis de casos de Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas chilenas. Santiago, Chile. 2002

¹³ Páez, Diego; Pereira, Henry. Estudio de Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas. Universidad. De los Andes. Bogotá, Colombia 2001.

2.6.1 TIPOS DE AHUELLAMIENTO.

El ahuellamiento se puede clasificar de acuerdo al origen de las deformaciones producidas: deformaciones de la mezcla asfáltica de superficie o deformaciones en capas subyacentes.

2.6.1.1 AHUELLAMIENTO EN LA CAPA ASFÁLTICA

El efecto se presenta en los primeros 7 a 10 cm de mezcla más cercanos a la superficie (Brown, Cross, 1992). La mezcla asfáltica bajo esta profundidad se encuentra aislada térmicamente y además está sometida a esfuerzos menores que las capas superiores. Este tipo de ahuellamiento es independiente del diseño estructural del pavimento. Ver figura 2.20



Figura 2.20 ahuellamiento superficial presente en la capa asfáltica.

2.6.1.2 AHUELLAMIENTO PRODUCIDO EN CAPAS SUBYACENTES.

En este caso las causas pueden ser, principalmente, una mala compactación de las bases granulares o tensiones de trabajo mayores a las tensiones admisibles en la subrasante. Es decir, las causas en este caso son de tipo constructivo o de diseño estructural del pavimento.

El perfil transversal de la deformación es diferente en cada caso (ahuellamiento de la mezcla o de capas inferiores) y es relativamente fácil de distinguir para un profesional con experiencia. En cierta bibliografía se suele utilizar la palabra “ahuellamiento” (*rutting* en inglés) para referirse a la deformación plástica de la

mezcla asfáltica y la palabra “deformación” para referirse a las deformaciones por tensiones de las capas subyacentes. Ver figura 2.19



Figura 2.21 ahuellamiento en capas subyacentes.

El ahuellamiento de la capa asfáltica ocurre por la acumulación de pequeñas deformaciones plásticas de la mezcla que ocurren cada vez que se aplica una carga sobre el pavimento. El asfalto (y por ende la mezcla) exhibe un comportamiento viscoelástico a temperaturas de servicio, es decir, las deformaciones que presenta ante cargas corresponden a una combinación entre deformación plástica (o viscosa) y elástica.

La componente elástica de la deformación se recupera, mientras que la componente plástica se acumula. Este efecto se muestra en la Figura 2.20, que muestra el modelo reológico (de un material viscoelástico desarrollado por Maxwell¹⁴ y las componentes de deformación ante un ciclo carga - descarga.

¹⁴ El modelo de Maxwell representa el comportamiento de las sustancias viscoelásticas como una combinación en serie de

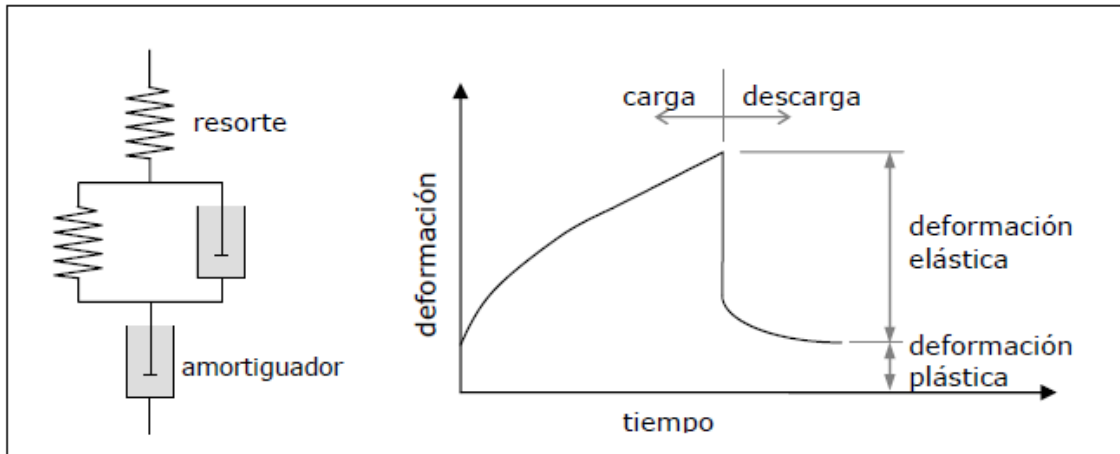


Figura 2.22 Modelo reológico del comportamiento de materiales viscoelásticos.

En la metodología del diseño racional, el análisis se enfoca al deterioro que sufre la estructura de pavimento a causa de la fatiga, dejando de lado la deformación vertical permanente que se produce en las capas asfálticas. Por esta razón, es importante investigar los parámetros que generan el ahuellamiento, estableciendo una tendencia de deformación irrecuperable para los materiales que componen el pavimento y en especial para la capa de rodadura.

2.6.2 CAUSAS DEL AHUELLAMIENTO

En condiciones normales de operación, las deformaciones producidas por el tránsito son reducidas; ninguna deformación es despreciable, por más pequeñas que sean siempre se van acumulando y al final se traduce en deformaciones observables. Sin embargo existen factores que tienden a aumentar la magnitud de deformación de la mezcla asfáltica y eventualmente producen ahuellamiento. Estos factores, que normalmente actúan en conjunto, están relacionados al clima (altas temperaturas), al tráfico (cargas pesadas y velocidades de circulación bajas), la susceptibilidad térmica del asfalto, entre otros.



Figura 2.23 medición de ahuellamiento manual.

2.6.2.1 ALTAS TEMPERATURAS

El ahuellamiento generalmente se produce en verano, dado que las temperaturas altas aumentan el componente plástico de deformación de la mezcla asfáltica, por lo tanto aumentan las deformaciones remanentes. En ocasiones el ahuellamiento se puede producir en forma parcial en dos o tres estaciones de verano consecutivos (definir claramente los intervalos de tiempo que se consideran para dicha estación).

2.6.2.2 CARGAS PESADAS

Las cargas pesadas aumentan la magnitud de las deformaciones y por lo tanto aumentan la velocidad de deformación de la mezcla.



Figura 2.24 vehículo cargado excesivamente.

2.6.2.3 CIRCULACIÓN A BAJAS VELOCIDADES

El tráfico lento disminuye la rigidez del asfalto, por lo que aumenta la componente plástica de deformaciones, es decir, se produce un efecto equivalente a un aumento de la temperatura de servicio. Por otro lado, la circulación a bajas velocidades incrementa el tiempo de aplicación de la carga, haciendo con que el pavimento asfáltico trabaje bajo condiciones de operación extremas. Por otra parte una mezcla asfáltica puede ser más o menos resistente a las deformaciones, en función de una serie de factores de diseño, como tipo de asfalto, propiedades del agregado y parámetros de dosificación. A continuación también se explican brevemente cada uno de estos factores.

2.6.2.4 EFECTO DEL TIPO DE ASFALTO

La selección del ligante asfáltico debe hacerse principalmente en base al clima, sin embargo también influyen factores de proyecto, como el nivel de tránsito y las velocidades de circulación. Es por ello que en la actualidad se considera que las especificaciones de los cementos asfálticos por penetración no son suficientes para garantizar un buen desempeño del asfalto.

2.6.2.5 EFECTO DEL AGREGADO

Granulometría.

Las mezclas tradicionales se producen en base a granulometrías continuas o densas. Estas mezclas, en condiciones extremas de servicio, pueden ser susceptibles de ahuellarse o deformarse. Recientes investigaciones indican que para que una mezcla sea resistente al ahuellamiento, debe existir un contacto íntimo entre las partículas gruesas, más resistentes y de mayor fricción interna. El mismo concepto es aplicado en las Mezclas SMA¹⁵ (*Stone Mastic Asphalt* o *Stone Matrix Asphalt*). La cantidad de agregado de menor tamaño debe ser tal que pueda ser colocado en el espacio que dejan los agregados más gruesos, sin interferir en su contacto interpartícula y así sucesivamente con los tamaños más finos.

La Figura 2.23 muestra la banda SUPERPAVE TM 19 (tamaño máximo 19 mm, en formato SUPERPAVE). La recomendación de diseño es que a medida que el tráfico aumenta, la granulometría se acerque al límite inferior de la banda en los tamaños finos (partículas pasantes a partir de la malla 4,75 o 2,36 mm). Cuando hay un exceso de arenas de tamaño medio, la mezcla puede ser inestable en condiciones extremas de servicio. Esto produce una deformación paulatina de la mezcla y un reacomodo interno de las partículas, acercándose unas a otras. Cuando las partículas gruesas quedan en contacto, de modo que proveen

¹⁵ *Stone Mastic Asphalt* (SMA): mezcla de asfalto en caliente que consiste de dos partes: un esqueleto de árido grueso y un mortero aglutinante. Se compone de una mezcla de agregados triturados grueso y fino, relleno mineral, cemento asfáltico y un estabilizador de la carpeta, como los polímeros y fibras.

suficiente fricción interna, las deformaciones unitarias de compresión se hacen muy pequeñas.

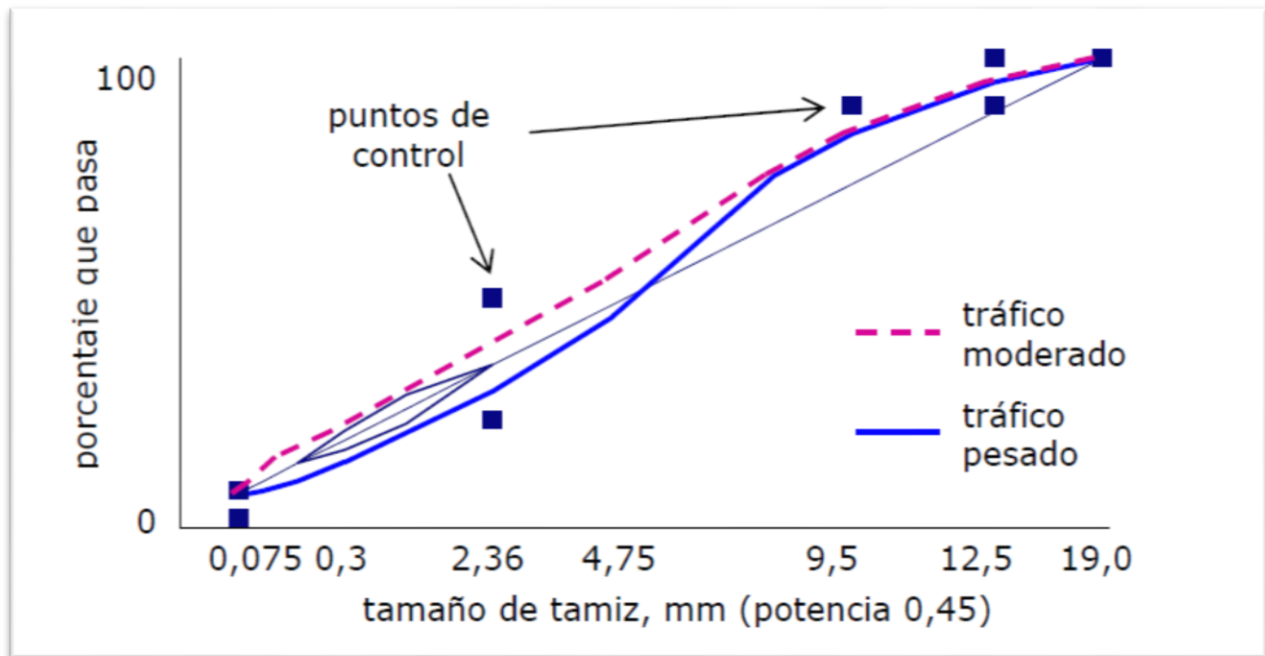


Figura 2.25 Granulometría para tráfico pesado y moderado. Banda Superpave TM 19 Fuente: Análisis de casos de Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas Chilenas. Santiago, Chile. 2002

Forma y Textura

Tanto la forma como la textura son propiedades que tienen que ver con el origen del agregado. Las partículas rodadas obtenidas de depósitos fluviales normalmente tienen una textura lisa y una forma redondeada, por lo que no son adecuadas para producir mezclas asfálticas, puesto que no proveen suficiente fricción interna para resistir las cargas. Las partículas que se obtienen en plantas de chancado tienen forma angulosa y textura rugosa, producto de la trituración mecánica. Estas partículas proveen grandes fricciones internas que las hacen adecuadas para producir mezclas asfálticas resistentes al ahuellamiento.

Propiedades Volumétricas de la mezcla

Numerosos informes de investigación, así como textos de estudio, concuerdan que el contenido de vacíos es, por sí solo, uno de los parámetros de desempeño más importante de una mezcla asfáltica.

Existe acuerdo en que el rango adecuado de desempeño de una mezcla se consigue para contenidos de vacíos de 3 a 8 %¹⁶ Para contenidos de vacíos bajo 3 %, la mezcla es muy propensa a exudar y/o ahuellarse. Por otro lado, para contenidos de vacíos superiores al 8 %, la mezcla puede sufrir excesiva oxidación, agrietamiento prematuro y desintegración. Para determinar el contenido asfáltico óptimo, el criterio de diseño del método Marshall especifica un contenido de vacíos de 3 a 5 %, mientras que el método SUPERPAVE especifica un 4 %. Estos valores se refieren a la condición de la mezcla tras dos a tres años de servicio, una vez que ha sido compactada por el tráfico, como se aprecia a continuación

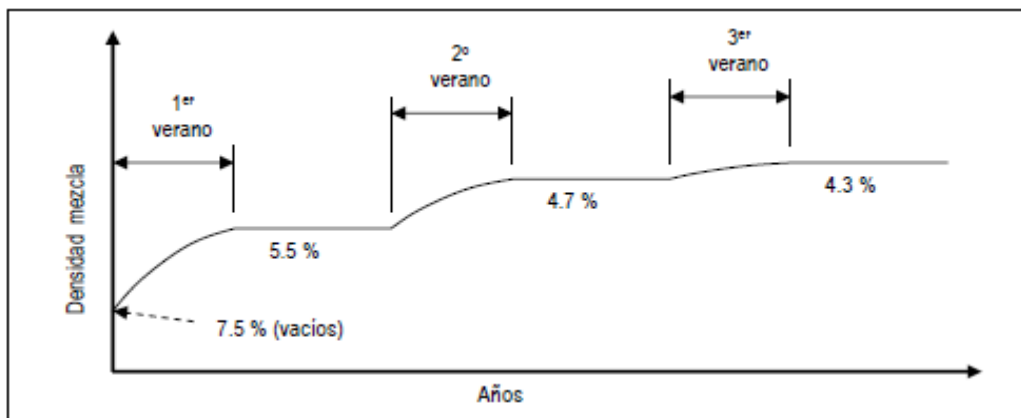


Figura 2.26 Variación de densidad y contenido de vacíos en la mezcla asfáltica Fuente: Análisis de casos de Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas Chilenas. Santiago, Chile. 2002

En cuanto al efecto del contenido asfáltico sobre la resistencia al ahuellamiento, los estudios realizados en USA indican que el “contenido asfáltico es más incidente en la susceptibilidad al ahuellamiento que el grado asfáltico”, aunque es menos importante que el contenido de vacíos (Brown, Cross, 1992).

¹⁶ 5 Brown, E. R., Cross, S. *A Study of In-Place Rutting of Asphalt Pavements*. Alabama, EE.UU.1989

CAPITULO III MARCO METODOLOGICO.

3.1 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE LA PERFILOMETRÍA LASSER

El análisis de funcional de un pavimento puede ser llevado a cabo por diferentes métodos, y cada uno de ellos se encuentra regido por sus respectivas normas, las cuales determinan sus diferentes procedimientos y parámetros a seguir, lo cual es el caso para la evaluación mediante el INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL “IRI” la cual para su respectivo cálculo y posterior análisis se encuentra regida por las siguientes normas:

- ❖ ASTM -E1170
- ❖ ASTM E-950-98
- ❖ AASTHO PP-37

Norma ASTM E-1170 Prácticas estándar para simular la respuesta vehicular a los perfiles longitudinales de las superficies de rodamiento.

Esta norma contempla el cálculo de la respuesta vehicular a las regularidades superficiales de la carretera, utilizando un determinado programa de simulación vehicular.

El IRI es la medición del desplazamiento de la masa suspendida respecto a la no suspendida en el modelo del cuarto de carro y es reportado en unidades de desplazamiento por longitud. El método del cálculo del IRI utiliza el modelo estándar de respuesta de un cuarto de carro.

Para el cálculo del IRI es necesario considerar los siguientes puntos citados en la Norma ASTM E 1170:

- El perfil debe ser obtenido con base en la Norma ASTM E 950.
- Para alcanzar la velocidad de arribo, se recomienda iniciar el ensayo al menos 160 m antes del tramo por evaluar.

- El equipo debe tener un filtro (dispositivo de selección de datos) que permita el cálculo, sin atenuación de, frecuencias tan pequeñas como 0.1 Hz a velocidades de 15 a 90 km/h.

Norma ASTM E-950-98 Método de prueba estándar para La medición del perfil longitudinal de las superficies Viajé Establecido con un acelerómetro de perfiles de inercia referencia.

En esta norma se define la medición y almacenamiento de datos de perfil medidos con base en una referencia inercial establecida por acelerómetros. Los equipos que se utilizan para medir el perfil se dividen en clases, según ciertas especificaciones de exactitud.

En la norma se destacan los siguientes puntos:

El rango de los acelerómetros debe ser suficiente para los niveles de aceleración esperados, debidos al movimiento del vehículo, típicamente ± 1 g.

Los dispositivos láser tienen que medir la distancia vertical a la superficie continuamente, o tomar datos a intervalos no mayores que los permitidos para cada clase, como se muestra en la Tabla 3.1¹⁷. La resolución vertical debe reunir los requerimientos de la Tabla 3.2¹⁸.

Clase	Requerimiento
Clase I	Menor o igual a 25 mm (1pulg.)
Clase II	Mayor que 25 mm (1 pulg.) hasta 150 mm (6 pulg.)
Clase III	Mayor que 150 mm (6 pulg) hasta 300 mm (12 pulg.)
Clase IV	Mayor que 300 mm (12 pulg.)

Tabla 3.1. Intervalos longitudinales de almacenamiento de datos.

¹⁷ Según tabla I de la norma ASTM E 950 -98, donde se establece que el RSP promedia valores de perfil cada 25 mm y los almacena, por lo cual pertenecen a la clase I.

¹⁸ Tabla II de ASTM E 950-98, en la cual el RSP también promedia valores de 0.1 mm siendo caracterizado como clase I.

Clase	Requerimiento
Clase I	Menor o igual a 0.1 mm (0.005 pulg.)
Clase II	Mayor que 0.1 mm (0.005 pulg.) hasta 0.2 mm (0.01 pulg.)
Clase III	Mayor que 0.2 mm (0.01 pulg.) hasta 0.5 mm (0.02 pulg.)
Clase IV	Mayor que 0.5 mm (0.02 pulg.)

Tabla 3.2 Resolución en mediciones verticales.

La exactitud del medidor de distancia (DMI) se establece por calibración, donde un error mayor al 0.1% de la distancia que actualmente tiene como referencia, no es permitido.

Los filtros utilizados deben permitir el cálculo de las elevaciones de perfil sin atenuación o amplificación para longitudes de onda de al menos 60 m a velocidades de ensayo de 25 a 95 km/h.

Requerimientos de precisión según Norma ASTM E 950

La precisión en la medición de elevaciones de perfil, se refiere a la variación entre mediciones repetidas de un mismo perfil. La precisión se expresa como el promedio de múltiples desviaciones estándar de valores observados en un punto específico, a lo largo del perfil evaluado.

Para verificar la precisión del equipo, se debe mantener fijo: la longitud del tramo evaluado, la ubicación de los puntos donde se evalúa y el número de mediciones.

La longitud del tramo de ensayo para calcular la precisión del equipo debe ser 322 m (1,056 pies). A lo largo de este tramo deben tomarse 1,057 mediciones de perfil, separadas cada 0.305 m (1 pie). Deben ser usadas por lo menos 10 repeticiones de medición de perfil, para calcular la precisión.

Cuando se realiza este ensayo, las variables independientes que afectan el proceso de medición deben ser estrictamente controladas, por ejemplo el pasar las 10 veces sobre los mismos puntos, siguiendo las huellas de los vehículos. Para asegurarse de que las mediciones se tomen en los mismos puntos, el inicio puede ser marcado con cinta o marcas de localización automática¹⁹.

La Tabla III muestra los requerimientos de precisión para los equipos que miden perfil. Los valores mostrados en la tabla no deben excederse, según sea la clasificación del equipo.

Clasificación de Equipo	Precisión (σ)
1	0.38 mm (0.015 pulg.)
2	0.76 mm (0.03 pulg.)
3	2.50 mm (0.1 pulg.)

Tabla 3.3 requerimientos de precisión

Requerimientos de exactitud según Norma ASTM E 950.

Exactitud en la medición del perfil de un pavimento, se refiere a la diferencia entre el valor promedio de repetidas mediciones de perfil en puntos específicos del tramo evaluado y un valor de referencia (asumido como real) calculado para esos puntos. De esta manera la exactitud para un punto específico, corresponde al valor promedio medido en ese punto menos el valor de referencia. Un valor de referencia debe ser derivado de un método de medición de perfil aceptado.

Para calcular la desviación en las mediciones de perfil longitudinal, deben ser controladas ciertas variables: la longitud del tramo de ensayo debe ser de 322 m (1,056 pies), se realizan 1,057 mediciones a lo largo del tramo, las cuales deben estar separadas cada 305 mm (1 pie).

¹⁹ El RSP cuenta con una fotocelda para iniciar la toma de datos, la cual se activa con la colocación de cinta reflectiva en el pavimento, con lo que se asegura un mismo punto de inicio en las mediciones.

NORMA AASTHO PP-37 Método para la cuantificación del Índice de Rugosidad Internacional en pavimentos.

Esta práctica estándar describe un método para estimar la rugosidad de una sección de pavimento. Un índice internacional de rugosidad (IRI) estadística se calcula a partir de un único perfil longitudinal medido con un analizador de camino en el interior y en las roderas fuera del pavimento. El promedio de estas dos estadísticas del IRI se reporta como la rugosidad de la sección de pavimento.

La práctica estándar reconoce la necesidad de un control de calidad (QA) plan y propone directrices para el desarrollo de un plan de control de calidad.

Esta práctica habitual es una combinación de dos ex prácticas estándar provisionales - PP 37 Práctica estándar para la determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI) para cuantificar la rugosidad de los firmes y PP 37M Práctica estándar para cuantificar la rugosidad de los pavimentos

Esta práctica se describe un método para estimar la rugosidad de una sección de pavimento. Un índice internacional de rugosidad (IRI) estadística se calcula a partir de un único perfil longitudinal medido con un analizador de camino en el interior y fuera de los caminos de rueda del pavimento. El promedio de estas dos estadísticas IRI se reporta como la rugosidad de la sección de pavimento.

3.1.1 METODOLOGÍA DEL PROCESO DEL LEVANTAMIENTO DE CAMPO

Para la recolección de la información en campo, se siguieron los siguientes lineamientos extraídos de las normas ASTM y AASHTO antes descritas.

- A. La medición de la regularidad se realizó en el sentido del tráfico, utilizando un equipo Perfilómetro de Referencia Inercial (RSP) marca Dynatest. modelo 5051 Mark III, clasificado como clase I de acuerdo con ASTM E 950-98 Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference.

- B. El valor de IRI fue calculado en tramos de 100 m (0.1 km) para ambas roderas (izquierda y derecha). El valor de IRI reportado para cada tramo evaluado en m/km, corresponde al promedio de los valores de IRI de las roderas izquierda y derecha.
- C. Antes de iniciar el tramo de análisis por lo menos 150 metros del punto inicial de prueba ya tiene una velocidad de 60 km/hora, para así asegurar que se está cumpliendo con lo especificado para la confiabilidad de los datos.

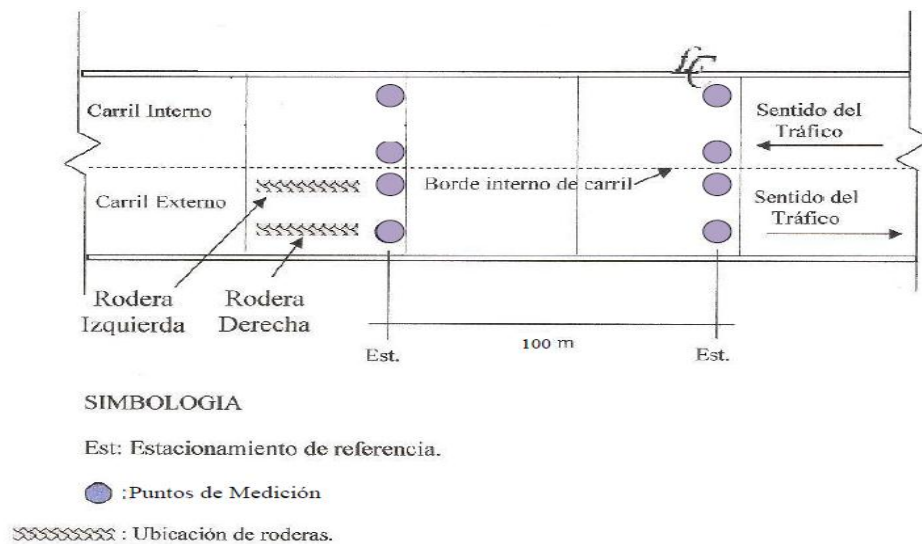


Figura 3.1 detalle de toma de medidas con perfilómetro laser.

3.1.2 METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

1. Se obtendrá un valor promedio por sentido de tráfico, en el cual se incluye el cálculo de un valor correspondiente a cada rodera (inter y externa) para modelar en cada zona su respectiva funcionalidad para generar un análisis completo no solo por sentido sino también por el proyecto que permita obtener un valor de IRI representativo del proyecto completo permitiéndose así generar información fidedigna y de calidad.

2. Con esto se realizara un análisis de la condición actual de la carretera por sentido (Comalapa –Zacatecoluca y viceversa).
3. Realizar un análisis que muestre como el nivel de funcionalidad ha evolucionado en el tiempo, mediante el análisis de las variables de PCI (recolectada en la primera etapa) e IRI (recolectado en esta investigación).
4. Luego con los valores promedio por roderas, carriles (laterales), y del proyecto completo generar graficas que representen la variación del IRI a lo largo del proyecto y por zonas específicas para representar gráficamente el nivel de funcionalidad presente en cada punto evaluado en el tramo de carretera en estudio “Comalapa – Zacatecoluca”.

3.2 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO

El deflectómetro de impacto es un equipo utilizado para la evaluación del estado estructural de firmes flexibles, semirrígidos y rígidos. El operador controla todas las funciones del deflectómetro desde el ordenador que se instala en el vehículo remolcador (en caso de ser con remolque). Este proceso permite a un solo operador realizar el trabajo de medición de manera fácil y sencilla.

Estos equipos están dotados de la tecnología más avanzada. Poseen programas que incorporan alarmas que aparecen en la pantalla del ordenador. Si el operador ignora advertencias vitales, no puede efectuar algunas funciones con el FWD, por ejemplo, en conexión con la medición de la temperatura del pavimento: Después de introducir el sensor de temperatura del asfalto, el sensor detecta cuando la temperatura es estable.

Se mide la temperatura mientras la placa de carga está apoyada sobre el pavimento y no se puede elevar antes de que el sensor de temperatura se haya colocado en su receptáculo. El equipo no se puede conducir a otra ubicación cuando la placa de carga está abajo y los interruptores de emergencia, colocados estratégicamente, permiten al operador detener el equipo en cualquier momento por medio del accionamiento manual.

La principal aportación del deflectómetro de impacto frente a los equipos clásicos de deflectometría, es el análisis de la capacidad de soporte mediante el cálculo inverso de los módulos de rigidez de las capas de firme a partir de los cuencos de deflexión registrados. Todo este procedimiento está regido por su respectiva normativa:

- ❖ ASTM-D4694
- ❖ ASTM-D4695
- ❖ Guía para el diseño de pavimentos AASTHO EDICION 1993.

ASTM-D4694 Método de prueba estándar para Deflexiones con Deflectómetro de impacto²⁰

Este método de ensayo cubre la medición de deformaciones de superficies pavimentadas y sin pavimentar con un dispositivo de impulsión de caída de peso, tipo de carga, además describe la medición de la respuesta a la desviación vertical de la superficie a una carga de impulso aplicada a la superficie del pavimento.

Estos dispositivos se conocen comúnmente como Deflectómetro de impacto o FWDs.

Como puntos más importantes de esta norma tenemos:

20 1 Este método de prueba bajo la jurisdicción del Comité E17 de ASTM sobre Sistemas de pavimento de vehículos, y es responsabilidad directa del Subcomité E17.41 sobre la Gestión de Pavimentos. Edición actualizada y aprobada, 01 de diciembre 2003. Publicado en diciembre de 2003. Originalmente aprobado en 1987. Última edición anterior aprobado en 1996 como D 4694-96.

Equipo

- Los instrumentos expuestos a los elementos (fuera del vehículo), se podrán accionar en el rango de temperatura de -10 a 50 ° C (10 a 120° F) y se tolera la humedad relativamente alta, la lluvia o rocío, y todas las reacciones adversas otras condiciones tales como polvo, los golpes o vibraciones que normalmente se pueden encontrar.
- Los instrumentos no expuestos a los elementos (dentro del vehículo), se podrán accionar en el rango de temperatura de 5 a 40 ° C (40 a 105 ° F).
- De generación de fuerza del dispositivo (la caída "de peso"), con un sistema de guía. El dispositivo de generación de fuerza será capaz de ser elevado a una o más alturas predeterminadas y dejarse caer.
- La Guía del sistema, ha sido diseñada para funcionar con la fricción o resistencia despreciable y diseñada de modo que el peso caiga perpendicular a la superficie del pavimento.
- Carga de la placa, debe ser capaz de proveer una distribución aproximada y uniforme de la carga sobre la superficie del pavimento. Los Platos típicos de carga son 300 y 450 mm (12 y 18 pulgadas) de diámetro para las mediciones en las carreteras convencionales y pistas de aterrizaje o similares en pavimentos rígidos.
- Desviación del sensor, capaz de medir el movimiento vertical máximo del pavimento y montado de tal manera que se minimice la rotación angular con respecto a su plano de medición en el movimiento máximo esperado. El número y el espaciamiento de los sensores son opcionales y dependerá del propósito de la prueba y las características de la capa de pavimento. Un sensor de separación de 300 mm (12 pulgadas) es utilizado con más frecuencia.

- En el Procesamiento de datos, en el sistema de almacenamiento de carga y en los datos de desviación se hará constar en una o ambas de un dispositivo de almacenamiento magnético o una grabadora de cinta de papel. La información de apoyo, tal como la temperatura del aire, la temperatura de la superficie del pavimento, las mediciones de distancia, y los datos de identificación para cada punto de prueba se puede grabar de forma automática o manualmente.

Calibración.

Para calibrar el equipo se debe dejar caer el peso por lo menos cinco veces y luego se comprueba la diferencia relativa de cada carga. Las Cargas no deben variar en más del 3% en sus respectivos valores.

Acondicionamiento de la Señal y el Sistema de guardado.

Todo lo de acondicionamiento de señal y del aparato de control permitirá la lectura de datos de resolución para cumplir con los siguientes requisitos:

- Las mediciones de carga se muestran y almacenan con una resolución de 200 N (50lb) o menos.
- Las mediciones de deformación se muestran y almacenan con una resolución de 61 micras (0,04 milésimas de pulgada) o menos.
- Las mediciones de carga y la deflexión se registran como se especifica en 8.1.1 y 8.1.2, respectivamente, dentro de un período de tiempo o ventana de medida de al menos 60 ms, con una precisión en el momento de carga máxima y
- La deflexión de + ó - 2% y una precisión de + ó - 2 μm (0,08 milésimas de pulgada).

Procedimiento.

El lugar de la prueba será de lo más limpio posible de rocas y escombros para asegurarse de que la placa de carga deba estar correctamente asentada. Las superficies con grava o tierra y todo el material suelto serán removidas.

- Bajar la placa de carga y los sensores para asegurarse de que reposen en una superficie firme y estable.
- Levantar el generador de fuerza a la altura deseada y soltar el "peso". Registre las deflexiones máximas resultantes de la superficie y la carga pico.
- Se deben realizar al menos dos secuencias de carga y comparar los resultados. Si la diferencia es mayor que 3% para cualquier sensor, tenga en cuenta la variabilidad en el informe. Las pruebas adicionales pueden hacerse funcionar a las mismas cargas o diferentes.

9. Precisión y Exactitud.

Precisiones: En este momento, no hay precisión de una serie de pruebas estadísticamente diseñadas con diferentes dispositivos. Los resultados del ensayo del mismo dispositivo o desde diferentes dispositivos pueden variar debido a variaciones en la rigidez amortiguada o rigidez del pavimento.

Cada dispositivo, sin embargo, debe ser capaz de satisfacer los requisitos de precisión y los requisitos de calibración establecidos por el fabricante y SHRP.

Exactitud: Ninguna declaración se está haciendo en cuanto a la tendencia de este Método de ensayo en el momento actual.

ASTM-D4695 Guía estándar para mediciones generales de deflexión del pavimento²¹

Esta guía proporciona información sobre el procedimiento para la medición de deformaciones de la superficie del pavimento, describe procedimientos para la medición de deflexión utilizando diversos dispositivos de ensayo de deflexión y proporciona la información general que debe obtenerse con independencia del tipo de dispositivo de ensayo utilizado.

²¹ Esta guía se encuentra bajo la jurisdicción del Comité E17 sobre Sistemas de pavimento de vehículos, y es responsabilidad directa del Subcomité E17.41 sobre la Gestión de Pavimentos. Edición actualizada y aprobada, 01 de diciembre 2003. Publicado en enero de 2004. Originalmente aprobada en 1987. Última edición anterior aprobado en 1996 como D 4695-96.

Esta Guía es aplicable a las mediciones de deformación realizadas en concreto asfáltico flexible (AC), en pavimentos rígido de cemento portland (PCC), o pavimentos compuestos (AC / PCC).

Los Pavimentos rígidos pueden ser simples, articulado, articulado reforzado, o de refuerzo continuo. Los valores indicados en unidades SI deben ser considerados como los estándares.

Significado y uso

Medición de deflexiones NDT en la superficie del pavimento proporciona información que puede ser utilizado para la evaluación estructural de pavimentos nuevos o en servicio. Estas mediciones de deflexión pueden ser utilizadas para determinar las características siguientes del pavimento:

- Módulo de cada capa.
- Rigidez global del sistema de pavimento.
- Carga de la eficiencia de transferencia de las juntas de pavimento PCC.
- Módulo de reacción de la subrasante.
- Espesor efectivo, el número estructural, o el valor de soporte del suelo.
- Teniendo la capacidad o la capacidad de carga de un pavimento.

Equipo

El aparato utilizado en esta guía será uno de los dispositivos de desviación de medición descrito en el apartado 6,2 y consistirá en algún tipo de sensor de contacto de la sonda o de la superficie (s) para medir los movimientos verticales del pavimento o deformaciones cuando se somete a una carga dada

Dispositivos de Impulso²², que crea una carga de impulso en el pavimento dejando caer una masa a partir de una altura variable en un sistema de amortiguación de goma o de primavera. Genéricamente se conoce como un peso que cae Deflectómetro (FWD), el dispositivo de generación de la fuerza será capaz de ser elevado a una o más alturas predeterminadas y se dejó caer. La fuerza resultante, transmitida al pavimento a través de una placa de carga circular, no deberá variar entre caídas repetidas en más de + - 3%. Que la fuerza del pulso se aproxime la forma de una onda senoidal Haversine o medio-y una fuerza máxima en el intervalo de 7 a 105 kN (1.500 a 24.000 lb) será alcanzable. El dispositivo de carga de impulso será de deflexiones superficie del pavimento utilizando siete o más sensores con una resolución de 0,002 mm (0,0001 pulgadas) o mejor.

Calibración de la frecuencia de la celda de carga.	
Tipo de dispositivo	Frecuencia de calibración
No continuo y semicontinuo	Antes de la prueba
Tipos de carga estática	
Tipos de cargas estables (para dispositivos que no tienen una celda de carga)	Por lo menos una vez al año con las instrucciones del fabricante sobre el uso del procedimiento en el Apéndice A del Informe SHRP SHRP-P-661
Tipos de impulsos de carga (Deflectómetro caída de peso)	Por lo menos una vez al año utilizando el procedimiento descrito en el Apéndice A del Informe SHRP SHRP-P-661

Tabla 3.4 calibración de celda de carga.

²² Ejemplos de este instrumento son el Deflectómetro Dynatest la caída de peso (FWD), el KUAB 2m-FWD, la Carl Bro FWD, y el FWD JILS.

Desviación de frecuencia de calibración del sensor		
Tipo de dispositivo	Frecuencia de calibración	Frecuencia mínima de Comprobación de la calibración
No continuo y semicontinuo	Todos los días durante la operación	Todos los días durante la operación
Tipos de carga estática		
Tipos de cargas estables	Por lo menos una vez al año	Una vez al mes durante la operación
Tipos de impulsos de carga (Deflectómetro caída de peso)	Referencia de calibración por lo menos una vez al año utilizando el procedimiento descrito en el Apéndice A del Informe SHRP SHRP-P-661	Calibración con respecto una vez al mes durante la operación utilizando el procedimiento descrito en el Apéndice A del Informe SHRP SHRP-P-661

Tabla 3.5 desviación de frecuencia.

La calibración de los dispositivos de medición de deflexión

El dispositivo de carga de impulso-- Carga de referencia de calibración de la celda debe llevarse a cabo al menos una vez al año. Apéndice A del Informe SHRP SHRP-P-661 contiene un esquema de ejemplo para esa tarea.

Verificación de los procedimientos de extracción de datos de campo

Generalidades: El procedimiento a seguir es, en cierta medida, dependiendo de qué tipo de dispositivo se utiliza. La siguiente información general se sugiere como el mínimo de datos que debe ser recogido, independientemente del tipo de dispositivo que se utiliza.

Carga: Para los dispositivos de carga de impulso, registrar la carga máxima aplicada a la superficie del pavimento por el dispositivo de desviación

Frecuencia de la carga: En su caso, registrar la frecuencia de carga calculada oscilatorio para los dispositivos de carga vibratorios

Geometría de la zona de carga y ubicaciones de sensores de deflexión: Para el modelado adecuado de la estructura del pavimento y/o el retro-cálculo de parámetros de la capa, etc., es necesario que se conozcan y se registren. Las localizaciones de la carga, sensores de desviación, grietas superficie del pavimento

Si no se toma en cuenta la presencia de juntas y grietas en la zona de influencia de la carga podría dar lugar a errores en el posterior análisis de las desviaciones registradas. De manera similar, si no se cuenta correctamente la posición real de los sensores de desviación podría dar lugar a errores de análisis serios.

Tiempo de la prueba: Registrar el tiempo para cada punto de medición.

Cadenamiento de las estaciones: Registre el número de la estación o la ubicación del punto de prueba para cada prueba de desviación a cabo.

Temperaturas del aire y del pavimento: Como mínimo, registrar la temperatura del aire ambiente y temperatura de la superficie del pavimento en los intervalos especificados a lo recomendado por el ingeniero.

Intervalo de las pruebas: La distancia o intervalo de puntos de prueba sobre el terreno depende de la prueba de nivel de seleccionado.

Procedimiento para las mediciones de deflexión:

Generalidades: Los procedimientos para la realización de las pruebas de deflexión específica deben ser los suministrados por el fabricante del dispositivo, tal como fue para reflejar las directrices generales establecidas en esta norma. Los pasos siguientes se llevarán a cabo independientemente del dispositivo utilizado.

Calibrar los sensores de desviación y de células de carga (si procede) del dispositivo.

Transporte el dispositivo a la ubicación de la prueba sobre el punto de ensayo deseado.

Mida la temperatura ambiente y la temperatura del pavimento, de acuerdo con las directrices.

Registre la siguiente información para cada prueba en el pavimento: ubicación del proyecto, nombre del operador, fecha y hora, los factores de calibración, el inicio y final estación o ubicación física, como la JCT". IH-635 y el camino de la línea de circunvalación " ubicación de corte y relleno, las ubicaciones de alcantarillas, puentes y otros elementos de control verticales, y los límites y alcances de las angustias de la superficie, las condiciones meteorológicas, y una descripción del tipo de pavimento.

El lugar de la prueba deberán estar libres de todas las rocas y los escombros para asegurarse de que la placa de carga (si aplica) debe estar correctamente sentado. Superficies de grava o tierra será tan suave como sea posible y todo el material suelto deberá ser evitado o eliminado.

Dispositivo de carga de Impulso:

Configure el software para la recopilación de datos.

Entrada de la información que identifica la configuración exacta del dispositivo de deflexión en el momento de la prueba que los datos de configuración del dispositivo se almacenan en el archivo de salida de datos y constituyen una

contribución directa al análisis de datos. Esta información generalmente incluye el tamaño de la placa de carga, el número y posición de los sensores de desviación, y la orientación de sensores de desviación con respecto a la placa de carga.

Seleccione el formato de archivo de datos apropiado. Varios formatos de archivo están disponibles, por ejemplo, unidades de EE.UU. habituales, las unidades del SI, y otras opciones.

Baje la placa de carga y sensores para asegurarse de que están descansando sobre una superficie firme y estable.

Levante el generador de fuerza a la altura deseada y suelte el "peso". Lleve a cabo una o más baja de prueba (s) en cualquier nivel de carga. O más "asiento" caídas también se pueden utilizar, sin embargo registrar los datos de las gotas de asiento, que posteriormente pueden ser utilizados en el análisis para determinar la cantidad de "acondicionamiento" que el propio pavimento experimenta, en su caso. Registre las deflexiones de la superficie de pico y de máxima carga (teniendo en cuenta las caídas de asientos), o grabar la respuesta a plena carga y de la historia de deformación del tiempo, según lo recomendado por el ingeniero.

Para permitir que el ingeniero pueda determinar la no linealidad del sistema de pavimentos, las pruebas en múltiples niveles de carga puede llevarse a cabo. El analista puede utilizar un promedio de la cuenca, si el error aleatorio es motivo suficiente de preocupación.

Localización y frecuencia de muestreo. La ubicación de ensayo variará con la aplicación prevista de los datos. En su mayor parte, el enfoque común es poner a prueba principalmente en las rutas de la rueda, ya que la respuesta del pavimento en estos lugares, en cierta medida refleja el efecto de daño que se ha acumulado. Pruebas de deflexión entre las trayectorias de las ruedas en el pavimento de AC puede ser realizado para comparar las pruebas en las trayectorias de las ruedas para indicar las diferencias que pueden estar presentes, por ejemplo, debido al agrietamiento en la ruta de la rueda.

Prueba general de nivel de proyecto: Este nivel de pruebas proporciona un análisis más detallado del pavimento, por ejemplo con el fin de recubrimiento o de diseño de rehabilitación. Los ensayos se realizaron en intervalos de 50 m hasta 200 m (100 pies o 500 pies), dependiendo de las condiciones específicas del pavimento y la longitud de la sección de pavimento.

En carreteras, calles y carreteras, las pruebas conjuntas a menudo se realizan a lo largo del recorrido de la rueda exterior.

Pruebas detallados de nivel de proyecto: Este nivel de prueba proporciona un análisis muy detallado y específico de la acera, para fines tales como la identificación de áreas localizadas de alta desviación o la detección de huecos bajo la superficie de los pavimentos

Otros datos necesarios para el análisis de la deflexión.

Los datos del sistema de pavimento siguientes pueden ser necesarios para facilitar el análisis de carga-deformación:

Tipos de capas de materiales y espesores del pavimento.

La profundidad al lecho de roca o una capa dura.

Reporte de las pruebas de deflexión:

Los informes de campo en soporte electrónico e impreso) para cada proyecto de evaluación de pruebas de deflexión debe contener información sobre los siguientes puntos como mínimo.

- Fecha y hora de la prueba.
- Identificación del operador
- Información sobre el vehículo.
- Temperaturas del aire y del pavimento.

Información de esta sección es por lo general la agencia la que especifica, pero la sección de información general incluye lo siguiente:

- Carreteras y el condado o distrito en el que se encuentra.
- Tipo de pavimento que se está evaluando.
- Dirección de la marcha.
- Carriles que están siendo evaluados (por ejemplo, conducir o pasar carril), y la posición dentro del carril (trayectoria de la rueda interior, mediados de carril, trayectoria de la rueda exterior, y así sucesivamente).

Carga y datos de deflexión.

- Tipo de equipo de deflexión.
- Tipo de prueba de deflexión, tal como cuenca deflexión o transferencia de carga.
- Localización de los sensores.
- Carga aplicada y la frecuencia de carga.
- deflexiones medidas bajo la carga.

Software de Obtención de Datos.

Algunos dispositivos de prueba deflexión utilizar su programa de campo propia para adquirir los datos de carga y la deformación. Tradicionalmente, la superficie del pavimento archivos de datos deflexión se han estructurado el uso de formatos ASCII que son muy dependientes del dispositivo. Aunque el formato ASCII permite a los usuarios y las agencias de acceder fácilmente a los archivos de salida de datos, un programa independiente que se necesita para acceder al archivo de salida para cada tipo de dispositivo de prueba.

Procesamiento de los datos (para referencia).

Varios programas de software para el retro-cálculo se han desarrollado para el procesamiento y análisis de datos de deflexión

Si las técnicas de retro-cálculo se emplean, utilice la última versión del programa para el retro-cálculo de módulos de capa de pavimento.

Precisión y Exactitud.

Dado que esta guía estándar cubre el uso de diversos dispositivos de NDT utilizados en cualquier tipo de superficie del pavimento enlazado, la precisión y el sesgo de la carga medida y los datos deflexión será una función tanto de las características del pavimento y el dispositivo de prueba utilizado. La información sobre la fiabilidad, la precisión y la repetitividad de vibración diferentes y los dispositivos de carga de impulsos se pueden encontrar en un informe que describe el experimento llevado a cabo en la Estación Experimental Canales (WES)²³ en Vicksburg, Mississippi.

Guía para el diseño de pavimentos AASTHO EDICION 1993

Pruebas de deflexión

Medir las desviaciones en la trayectoria de la rueda exterior en un intervalo de tiempo suficiente para evaluar adecuadamente las condiciones de intervalos de 100 a 1.000 pies son las zonas típicas que se deterioraron y se repararán no deben ser probados.

Un dispositivo de carga deflexión pesados (por ejemplo, Deflectómetro caída de peso) y una magnitud de carga de aproximadamente 9.000 libras se recomienda la norma ASTM D 4694 y D 4695 proporcionar orientación adicional sobre deflexiones de pruebas de desviación debe ser medida en el centro de la carga y al menos una distancia otra a partir de la carga, como se describe a continuación:

²³ Bentsen, Nazarian, y Harrison, "Pruebas de Confiabilidad de siete dispositivos de ensayo no destructivos del pavimento," pruebas no destructivas de Pavimentos y retro-cálculo de módulos, ASTM STP 1026, Bush AJ, III y GY Baladi, EDS, la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales, Filadelfia, 1989, pp 41-58.

(1) Módulo Resiliente de la Subrasante (MR) A distancias suficientemente grandes de la carga, las deflexiones medido en la superficie del pavimento se deben a la deformación subrasante solamente, y son también independiente del tamaño de la placa de carga Esto permite que el cálculo regresivo del módulo resiliente subrasante a partir de una medición simple deflexión y la magnitud de carga, utilizando la siguiente ecuación A.1

$$MR = \frac{0.24P}{d_r * r}$$

Dónde:

M_R = retro calculada subrasante módulo resiliente psi,

P = Carga aplicada, libras

d_r = deflexión a una distancia r desde el centro de la carga, pulgadas

r = distancia desde el centro de carga, pulgadas

Cabe señalar que ningún ajuste de la temperatura es necesaria en la determinación de MR desde la deflexión utilizado es debido solamente a la deformación subrasante

La deflexión utilizado para retrocalcular el coeficiente de subrasante se debe medir lo suficientemente lejos que proporciona una buena estimación de los coeficiente de subrasante, independientes de los efectos de cualquier capas anteriores, pero también lo suficientemente cerca que no demasiado pequeño para medir con precisión

La distancia mínima puede determinarse a partir de la ecuación A.2:

$$r \geq 0.7ae$$

Dónde: la ecuación A.3

$$ae = \sqrt{a^2 + \left(D * \sqrt[3]{\frac{EP}{MR}}\right)^2}$$

a_e = radio de la bombilla de la tensión en la interfaz de sub-base de pavimento, pulgadas

a = carga NDT radio de la placa, pulgadas

D = espesor total de las capas del pavimento por encima de la subrasante, pulgadas

E_p = módulo eficaces de todas las capas de pavimento sobre la subrasante, psi (descrito más adelante)

Antes de que el valor de retrocálculo de MR sea utilizado en el diseño, debe ser ajustado para que sea coherente con el valor utilizado en la ecuación de diseño de pavimento flexible AASHTO. El ajuste también puede ser necesario para tener en cuenta los efectos estacionales.

(2) Temperatura de AC mezcla. La temperatura de la mezcla AC durante las pruebas de deflexión debe ser determinado. La temperatura de la mezcla de AC puede ser medido directamente, o puede ser estimada a partir de temperaturas de la superficie o el aire

(3) Módulo Efectivo del Pavimento (E_p) Si el coeficiente de subrasante resiliente y el espesor total de todas las capas por encima de la subrasante se conocen o se supone, el módulo efectivo de toda la estructura del pavimento (todas las capas de pavimento sobre la subrasante) puede determinarse a partir la deformación medida en el centro de la placa de carga mediante la siguiente ecuación A.4:

$$d_o = 1.5 * Pa \left(\left(\frac{1}{MR * \sqrt{\left(1 + \left(\frac{D}{a} * \sqrt[3]{\frac{EP}{MR}}\right)^2\right)}} \right) + \left(\frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a}\right)^2}}}{EP} \right) \right)$$

Dónde:

d_o =Deflexión medida en el centro de la placa de carga (y ajustada a una temperatura estándar de 68 ° F), pulgadas

p = presión del plato de carga NDT, PSI

a = radio del plato de carga NDT, pulgadas

D = espesor total de las capas del pavimento por encima de la subrasante, pulgadas

M_R = módulo de subrasante resiliente, PSI

E_p = módulo eficaz de todas las capas del pavimento por encima de la subrasante PSI

Para un radio de placa de carga de 5.9 pulgadas, la Figura 3.1 puede ser utilizado para determinar la relación E_p / MR , y E , entonces puede ser determinada por un valor conocido o asumido de MR .

Para fines de comparación de E_p a lo largo de la longitud de un proyecto, los valores d_o utilizados para determinar E_p debe ser ajustada a una temperatura de referencia clave. Además, si el número efectivo estructural del pavimento existente utilizando los valores de E_p retrocalculada partir de los datos de desviación, la temperatura de referencia para el ajuste de d_o debe ser 68 °.

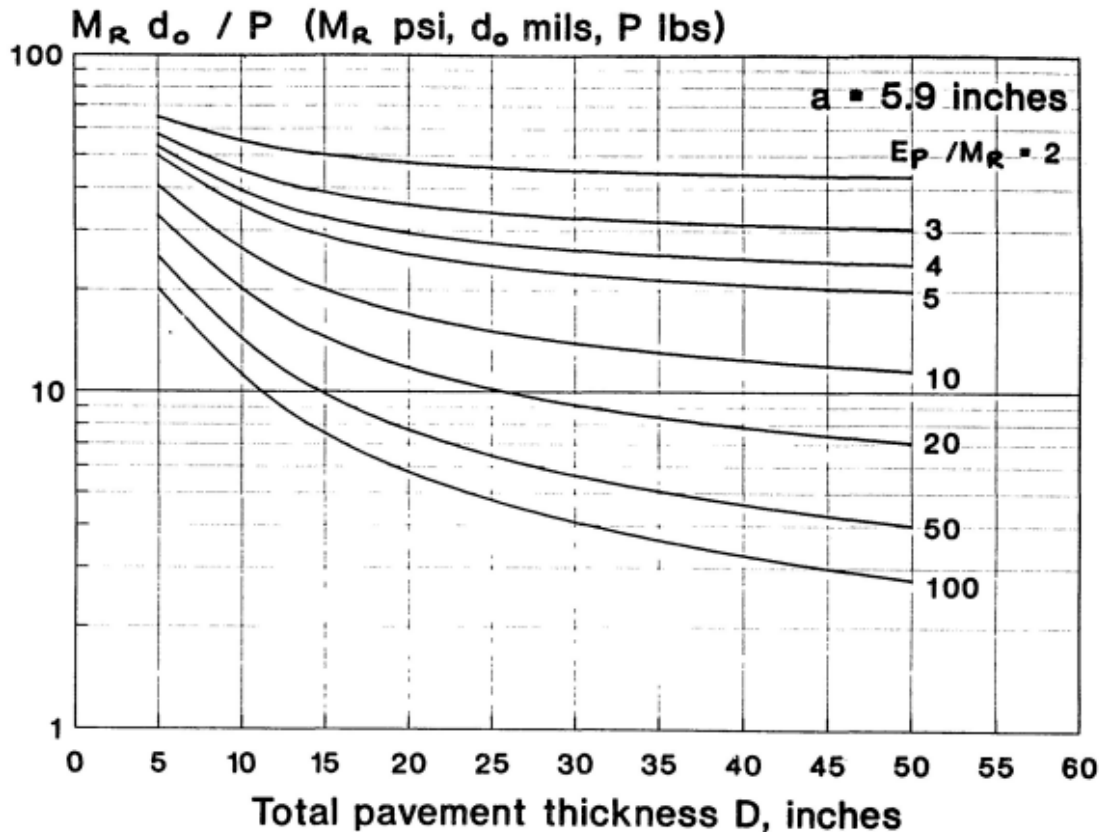


Figura 3.2 Determinación de E_p / M_R

Determinación del número estructural efectivo (SNEff) del pavimento existente

Tres métodos se presentan para determinar el número efectivo estructural de un pavimento convencional de CA: un método no destructivo, un método condición estudio, y un método restante vida de fatiga. Se sugiere que el diseñador utilice estos tres para evaluar el pavimento, a continuación, seleccione un valor para SNEff basada en los resultados, basándose en criterios técnicos y la experiencia pasada del organismo.

SNEff de NDT para AC Pavimentos

El método NDT de determinación SNEff sigue una suposición de que la capacidad estructural del pavimento es una función de su espesor total y la rigidez global de la relación entre SNEff, el grosor y la rigidez es:

TRÁFICO:

Futuro 18-kip ESALs en el carril de diseño durante

Período de diseño, Nf= _____

MÓDULO RESILIENTES EFECTIVOS DEL SUELO FIRME DEL CAMINO

Diseño resistente módulo, MR = ----- Psi

(Ajustado a la consistencia con el modelo de pavimento flexible y las variaciones estacionales. Diseño típico MR es de 2,000 a 10,000 psi para suelos de grano fino, de 10.000 a 20.000 para suelos de grano grueso. El camino de prueba AASHO, valor del suelo utilizado en la ecuación de diseño de pavimentos flexibles fue de 3.000 psi)

PÉRDIDA SERVICIBILIDAD:

Diseño pérdida PSI (P1 - P2) (1.2-2.5) = _____

DISEÑO FIABILIDAD:

Superposición de diseño fiabilidad, R (80 a 99 por ciento) = -----

Desviación típica general, So (normalmente 0.49) = _____ porcentaje

CAPACIDAD ESTRUCTURAL FUTURA:

Cantidad necesaria estructural para el tráfico futuro se determina a partir de la ecuación flexible de diseño de pavimento o nomograma en la Parte II, Figura 3.1

SNF = _____

$$SN_{eff} = 0.0024D^3\sqrt{EP}$$

Ecuación A.6

D = espesor total de las capas del pavimento sobre la subrasante, pulgadas

Ep = módulo de efectivos de las capas del pavimento sobre la subrasante, psi Ep puede ser retrocalculado de datos de la deflexión que también puede utilizarse para determinar S_{Neff} de acuerdo con la ecuación anterior.

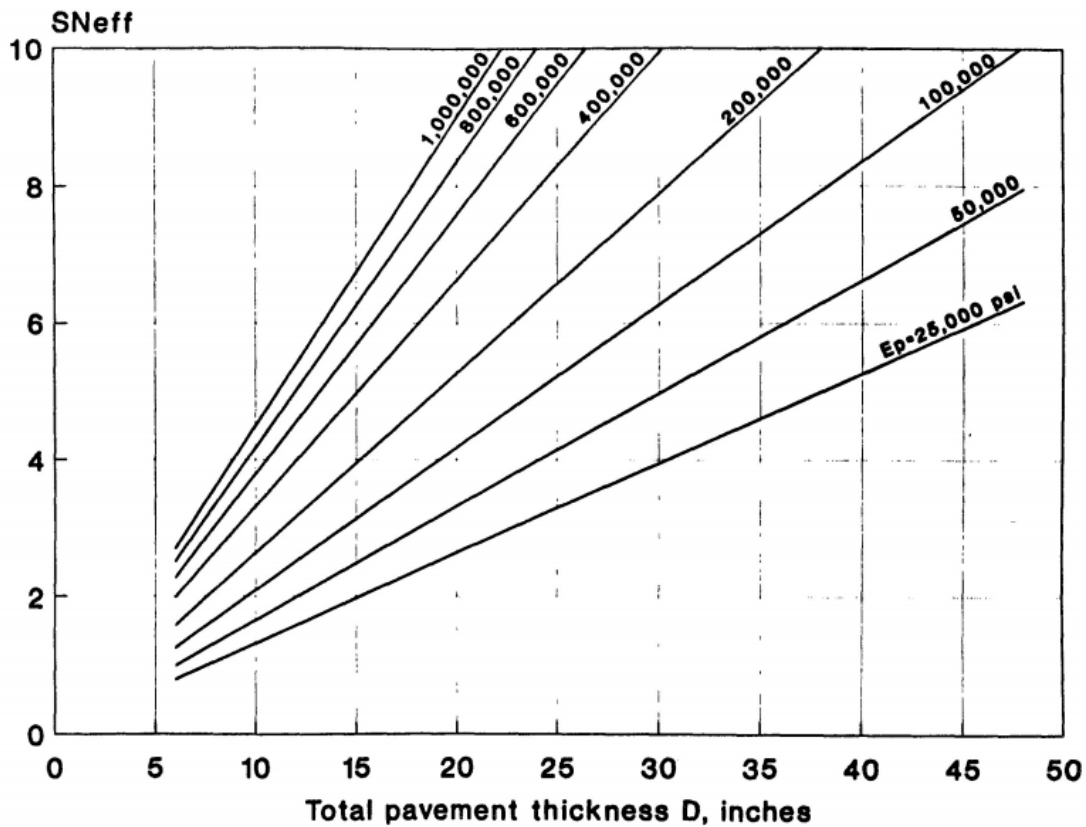
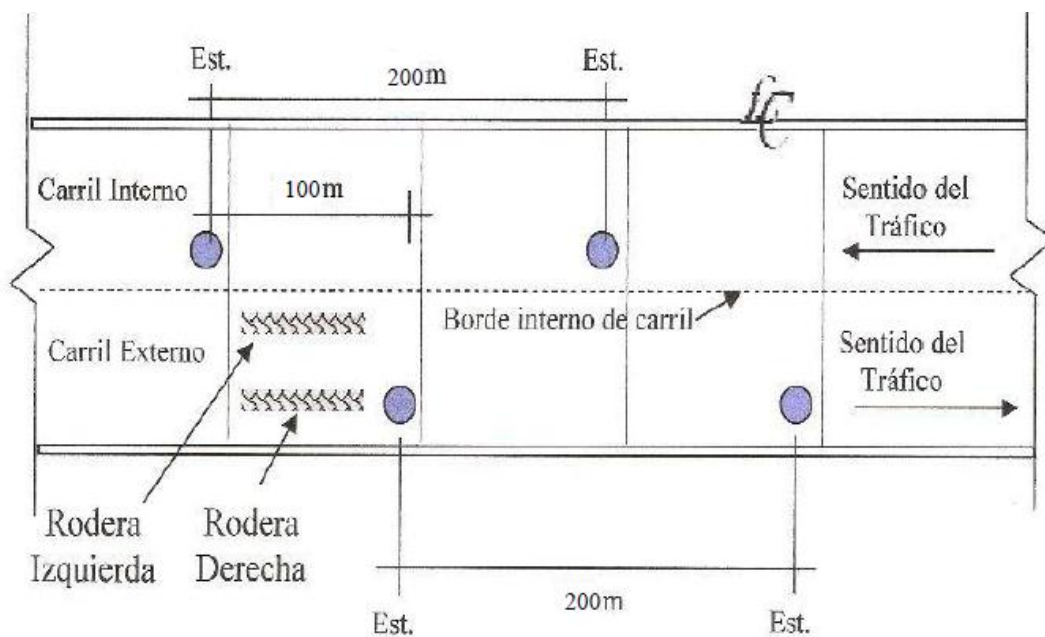


Figura 3.3 SNeff método NDT.

3.2.1 METODOLOGÍA DE RECOLECCIÓN DEL LEVANTAMIENTO DE CAMPO

- A. Los ensayos de deflectometría en la estructura de pavimento fueron realizados en el sentido del tráfico, aproximadamente en la zona donde se ubica la rodera externa, con una separación aproximada de 200 m en cada carril.
- B. El equipo utilizado para la ejecución de los ensayos, consiste en un Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer (FWD)), marca Dynatest, modelo 8000, el cual posee nueve (9) sensores (geófonos) y un (1) plato de carga de 30 cm de diámetro. Los ensayos se realizaron aplicando una carga de 9000 lb.

C. Debido a la naturaleza de los ensayos, las mediciones se realizaron en horas de la noche, en el período comprendido aproximadamente entre las 10:40 p.m. y las 11:15 p.m. del día 12 de septiembre de 2012 y entre las 12:00 a.m. y las 12:30 a.m. del día 14 de septiembre 2012. Lo anterior con el objeto de cumplir el requerimiento de temperatura superficial del pavimento, la cual debe ser inferior a 50 °C, que corresponde a la temperatura máxima permisible indicada por la AASHTO en la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento, edición 1993, para que se lleve a cabo el ajuste de las deflexiones registradas en cada punto, por el efecto de la temperatura en la mezcla asfáltica que conforma la capa de rodadura para este tipo de pavimento.



SIMBOLOGIA

Est: Estacionamiento de referencia.

● : Ubicación de plato de carga del Equipo Deflectómetro de Impacto.

XXXXXXXXXX : Ubicación de rodaderas.

Figura 3.4 detalle de toma de medidas con deflectómetro de impacto.

3.2.2 METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El análisis es llevado a cabo mediante la aplicación de los lineamientos de la guía de diseño de estructuras de pavimento AASHTO 1993. Que determina los siguientes pasos a realizar.

1. Cálculo del módulo resiliente (MR) en cada punto en el que se registró la deflexión en cada uno de los sensores que se utilizaron para el registro de los datos en campo. Siendo estos los sensores ubicados en 30, 60, 90, 120, 150 y 180 cms con respecto al plato de carga ubicado en el punto de muestra.

Para el cálculo del módulo resiliente se debe cumplir con la condición que el radio que va desde el centro del plato hasta el punto donde se registra la deflexión sea $R \geq 0.7ae$ m excluyendo inicialmente al valor de la deflexión máxima (d_o) y a aquel que no cumpla con este criterio debido a que no es un valor representativo según la recomendación de las guías AASHTO 1993.

Donde ae se calcula por medio de la ecuación A.3 y el procedimiento a seguir es el siguiente.

1. Se calcula el valor de EP/MR mediante la utilización de la figura 3.2, en el cual se necesitan las variables $((MR*d_o)/P)$ y D .

Dado que las variables d_o (deflexión máxima), D (espesor del pavimento) y P (carga aplicada) se conocen la única variable a calcular es el módulo resiliente. Para el cálculo del módulo resiliente se llevó a cabo con todos los valores excepto el valor correspondiente a la deflexión máxima.

Obtenido los valores de $((MR*do)/P)$ “eje vertical” y D (eje horizontal), se obtiene gráficamente el EP/MR . Que se utiliza en la siguiente ecuación A.3:

$$ae = \sqrt{a^2 + (D * \sqrt[3]{\frac{EP}{MR}})^2}$$

Que mediante simple sustitución de valores se puede conocer los valores respectivos de ae para cada punto de análisis, con esto completo se procede a identificar cuales valores cumple con la condición $r \geq 0.7 ae$ por lo que son representativas y corresponde a información confiable, para poder completar el análisis estructural y el cálculo de las otras variables, por lo que aquellas que no cumplen no se pueden tomar en cuenta debido a que no representa información que permita realizar un análisis confiable.

Posterior se realizara el cálculo del módulo resiliente de diseño que se satisface con la utilización de la siguiente ecuación:

$$MR = \frac{0.24P}{d_r * r} \text{ Multiplicada por un factor de corrección.}$$

Luego se corrige con un valor C que la guía aashto recomienda no sea mayor a 0.33

Quedando MR_c (diseño)

$$MR = C \frac{0.24P}{d_r * r} \text{ Ecuación A.5}$$

2. Modulo efectivo del pavimento (EP).

Mediante el cálculo del módulo resiliente se obtuvieron todos los valores necesarios para el cálculo del módulo efectivo del pavimento que se realizara mediante el despeje de la ecuación A.4 siguiente:

$$do = 1.5 * Pa \left(\left(\frac{1}{MR * \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} * \sqrt[3]{\frac{EP}{MR}}\right)^2}} \right) + \left(\frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a}\right)^2}}}{EP} \right) \right)$$

3 Calculo del Numero estructural.(S_{Neff})

Con el cálculo del EP se procede a determinar el número estructural mediante la utilización de la ecuación A.6 siguiente:

$$S_{Neff} = 0.0024D \sqrt[3]{EP}$$

Dónde:

D: espesor del pavimento.

EP: modulo efectivo del pavimento.

- 4 Con los valores antes calculados se realizara el análisis de la condición estructural actual del proyecto mediante la evaluación de cada variable calculada.
- 5 Se presentaran los resultados estructurales de cada variable obtenida mediante un gráfico que exponga los diferentes niveles estructurales que posee la carretera en los puntos evaluados en el tramo de estudio proveyendo así un mapeo estructural del proyecto.

CAPITULO IV RESUMEN DE “ANÁLISIS COMPARATIVO ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL POST CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES RECICLADOS CON CEMENTO EN EL SALVADOR (ETAPA 1)”

4.1 GENERALIDADES

El objetivo buscado en la primera etapa de la investigación era obtener un análisis comparativo estructural y funcional post construcción de pavimentos flexibles reciclados con cemento en El Salvador a través de ensayos de campo y levantamiento de deterioro además de compararlos con los datos originales de diseño para cada uno de los proyectos en análisis. Específicamente lo que se ha realizado son ensayos de extracción de núcleos y determinar en Índice de Condición de Pavimentos (PCI, Pavement Condition Index). Utilizando el método de la ASTM D-6433. Para luego compáralos con los datos originales de diseño de cada uno de los proyectos analizados.

Análisis Funcional

El PCI es el índice mediante el cual se lleva a cabo la evaluación funcional de los pavimentos el cual se fundamenta en los resultados de un inventario visual de la condición del pavimento en el cual se establecen clase, severidad y cantidad que cada daño representa.

Análisis Estructural

Ensayos de extracción de núcleos:

Este método de ensayo cubre la obtención, preparación y ensayo de núcleos taladrados de concreto para la determinación de la longitud o resistencia a la compresión; y se realizó según la normativa ASTM C42²⁴

²⁴ Para mayor referencia ver normativa completa en: Annual Book of ASTM Standards.

Determinación del módulo dinámico:

Este método de ensayo cubre la determinación de la velocidad de propagación de pulso de ondas de refuerzo longitudinal a través del concreto. Serán sometidos a este ensayo cada uno de los 16 núcleos extraídos de cada proyecto incluido en esta investigación se realizó mediante el método de ensayo estándar para la velocidad de pulso a través del concreto ASTM designación C 597 – 09²⁵

Determinación de la Resistencia a la compresión.

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concretos tales como cilindros moldeados y núcleos extraídos. Esta limitado al concreto que tenga un peso unitario mayor de 59 lb/pie³ (800 kg/m³). Dicho ensayo se efectuó bajo el método de ensayo estándar para resistencia de compresión de especímenes cilíndricos de concreto. ASTM C 39.

Los tramos que se analizaron en esta primera etapa fueron los siguientes:

1. Carretera Litoral (CA-02W), tramo entre CA-12 (Desvío a Puerto Acajutla) y CA-04 (Desvío Puerto de La Libertad).
2. Ruta RN-04, tramo San Marcos – Zacatecoluca.
3. Carretera Litoral (CA-02E), tramo El Delirio – La Unión
4. Carretera Litoral (CA-02E), tramo Comalapa – Zacatecoluca.
5. Carretera Litoral (CA-02E), tramo Usulután – El Delirio.

4.2 CARRETERA LITORAL (CA-02W). DESVÍO A PUERTO DE ACAJUTLA Y DESVÍO PUERTO DE LA LIBERTAD

Esta vía de longitud de 77 kilómetros de pavimento flexible reciclado con cemento cuenta con dos carriles de 3.65 metros cada uno y ancho de hombros de 2.35 metros. A 9 años de ser rehabilitada, en todo su trayecto en general, presenta un buen desempeño funcional, pues no existen índices severos de daños que

²⁵ Para mayor referencia ver normativa completa en: Annual Book of ASTM Standards.

permitan la disminución de velocidades de los usuarios por la misma; pero si se observa desgaste superficial de severidad media en algunos tramos de la carretera y esto corresponde al deterioro del pavimento ocasionado principalmente por acción del tránsito, agentes abrasivos o erosivos. Se presenta como pérdida de ligante y mortero en las zonas por donde transitan los vehículos y por acción del medio ambiente. También consideran algunos deterioros puntuales en su mayoría de piel de cocodrilo, grietas longitudinales y transversales, grietas de borde y ahuellamiento.

A Continuación se presenta el resumen de datos generales:

CARRETERA LITORAL (CA-02W), DESVÍO A PUERTO DE ACAJUTLA Y DESVÍO A PUERTO DE LA LIBERTAD.		
DATOS GENERALES DE CARRETERA		
NUMERO DE CARRILES	2	METROS
ANCHO DE CARRIL	3.65	METROS
LONGITUD TOTAL DE PROYECTO	77000	METROS
UNIDAD DE MUESTRA ADOPTADA	35	METROS
INICIO DE CARRETERA	KILOMETRO 35	
FIN DE CARRETERA	KILOMETRO 112	
$n = \frac{(N)(S^2)}{\frac{e^2}{4}(N-1) + S^2}$	n=	Número mínimo de unidades de muestra a ser inspeccionadas = 16
$i = \frac{\text{longitud total del proyecto}}{\text{unidad de muestra adoptada}}$	N=	Número de unidades disponibles= 2200
$i = \frac{N}{n}$	S=	Desviación Estándar = 10
	e=	Error Permitido= 5
	i=	Intervalo de muestra= 137
DE ESTO SE DETERMINA QUE LAS UNIDADES A INSPECCIONAR ESTARÁN REPARTIDAS, EN TODA LA LONGITUD DE LA CARRETERA, CADA 137 UNIDADES DE 35 METROS CADA UNA, LO QUE EQUIVALE A 4795 METROS APROXIMADAMENTE.		

Tabla 4.1 Datos generales CARRETERA LITORAL (CA-02W)

4.2.1 ANALISIS FUNCIONAL

Calculo del PCI:

INDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTOS (PCI)	
PCI=	56
	BUENO

De la misma manera se muestra el cuadro de análisis de daños:

TOTALES EN LA VÍA - AREA TOTAL ANALIZADA=				4088.8					
total por daño en la vía (m2)	piel de cocodrilo	abultam. U hundim.	Depresión	Grieta de borde	Grieta long. Y transver.	parches	Baches	Ahuellam.	
	547.6	179.6	51.5	17.3	71.8	1.3	264.4	217	
%	13.4	4.4	1.3	0.4	1.8	0.0	6.5	5.3	
total por nivel de severidad				LOW		MEDIUM		HIGH	
				m2	%	m2	%	m2	%
				1179.3	28.8	124.3	3.0	46.9	1.1
AREA TOTAL DE AFECTACIÓN DE LA VÍA (m2)		1350.5			PORCENTAJE (%)		33.0		

Tabla 4.2 Análisis de daños en carretera sección Acajutla – La Libertad.

Con la información de la tabla 4.2 Se analiza los resultados en la carretera gráficamente.

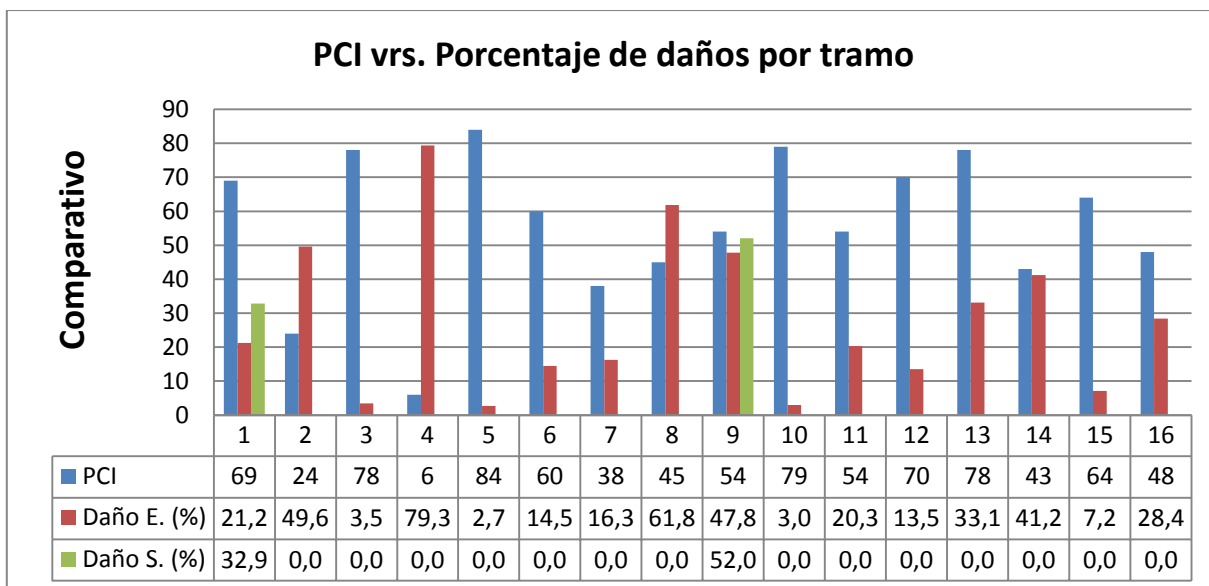


Gráfico 4.1 Análisis de PCI versus porcentaje de daños por tramos.

De acuerdo al análisis en el gráfico 4.1 los resultados nos muestran una variación de daños estructurales (notorio en todos los tramos) y superficiales (solamente en tramos 1 y 9) por área de afectación en porcentaje versus el Índice de Condición de Pavimentos (PCI) en cada una de las 16 unidades de muestra; siendo el total daños por área afectada de 1350.3 m², un 33% de su área total inspeccionada en la carretera.

Los resultados reflejan de manera general un comportamiento uniforme, donde a mayor PCI los porcentajes de daños son menores y también a mayor porcentaje de daños el PCI es menor; pero no considerando, que estos son directamente proporcionales entre sí de acuerdo a los resultados cuantitativos reflejados en la gráfica, pues hay que considerar sus niveles de severidad (ver gráfico 4.2) y el tipo de deterioro (ver gráfico 4.3), ya que estos varían de acuerdo a la falla de las capas que componen la estructura del pavimento, de manera superficial (capa asfáltica), profunda (base, sub-base, sub-rasante) o ambas.

Para tener una idea clara en este análisis de cómo afectan los niveles de severidad en esta carretera, se ilustra en el gráfico 4.2 el comportamiento que tienen por unidad de muestra, dando como resultado que todos los tramos son

afectados por una severidad baja, y considerando también en los tramos 1, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11 y 13 ser afectados únicamente por este tipo de severidad; difiriendo para el caso de los niveles medio y alto que se consideran nada más en algunos tramos tal y como lo refleja la gráfica 4.2.

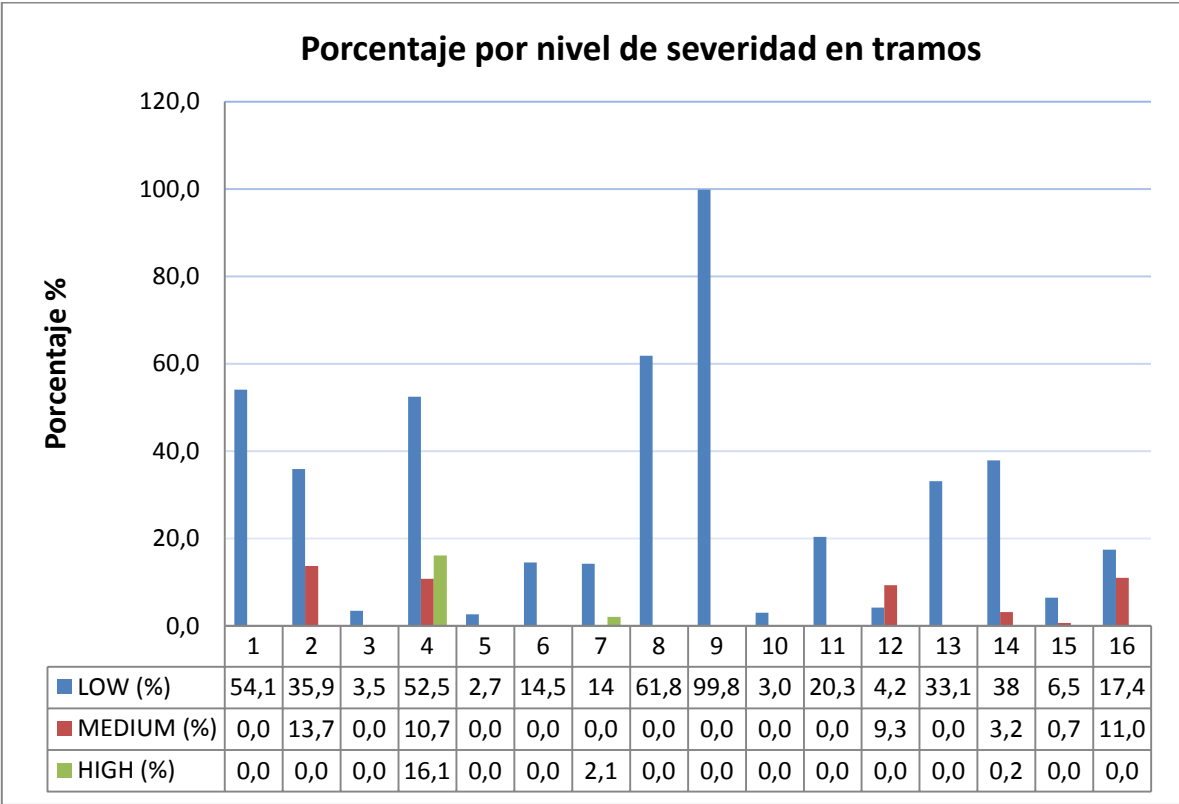


Gráfico 4.2 Representación de daños de acuerdo a sus niveles de severidad en la vía.

Para la afectación de deterioro, se presenta en el gráfico 4.3 el registro cualitativo y cuantitativo de los daños con sus respectivos niveles de severidad en la sección de carretera sujeta a estudio. Los daños más frecuentes y que más afectan por su cantidad de área registrada son de tipo estructural, (estos son piel de cocodrilo, grieta en bloque, depresión, grieta de borde, grieta longitudinal y transversal, baches, ahuellamientos) y de manera más leve los de tipo superficial (estos son meteorización o desprendimientos de agregados); mostrando también respecto a su porcentaje total de daños, el nivel de severidad que más predomina en el de tipo bajo.

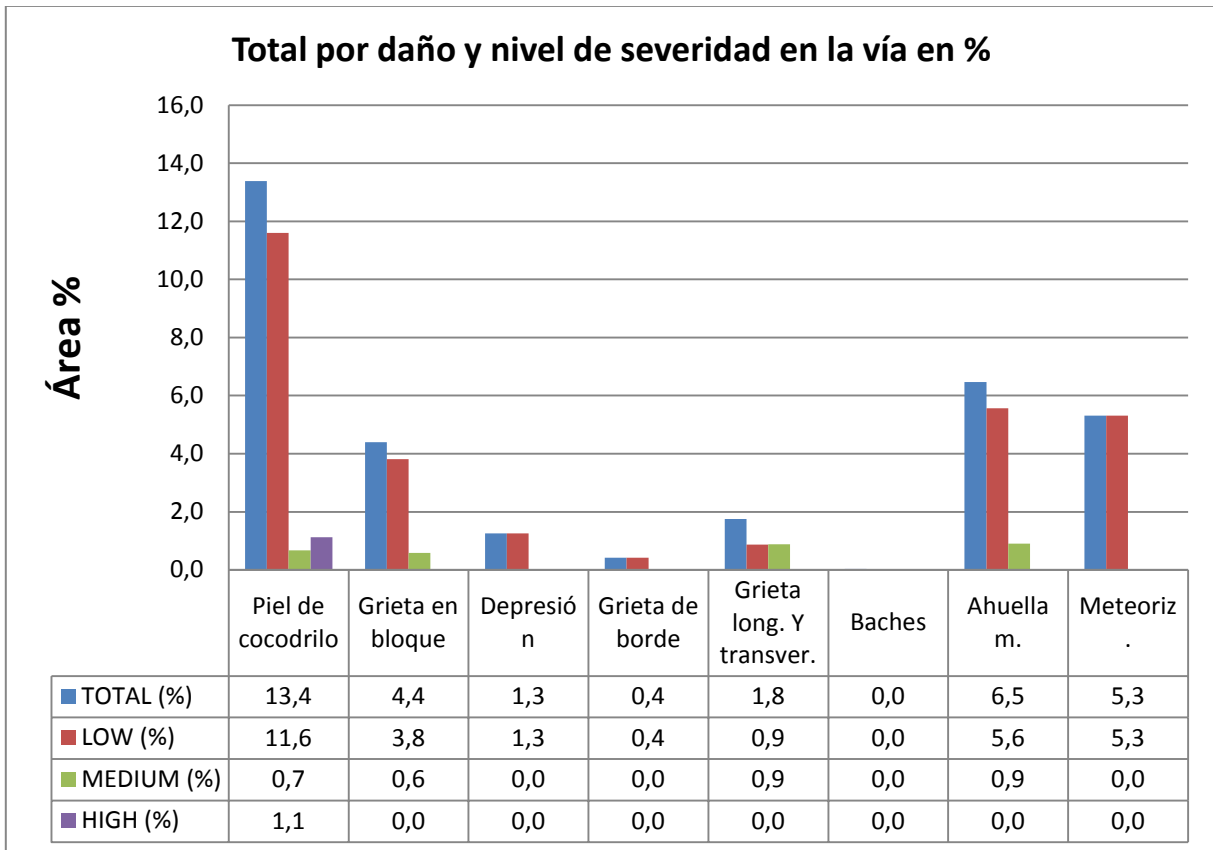


Gráfico 4.3 Representación de daños en área con su respectivo porcentaje en la vía.

4.2.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Los valores de la resistencia a la compresión promedios encontrados en cada una de las unidades de muestreo, las cuales se ubican en diferentes estaciones en toda la longitud de la carretera CA-02W tramo Acajutla-La Libertad; estos valores de resistencia fueron obtenidos de un promedio de dos especímenes cilíndricos, y su promedio general es igual a:

Resistencia a la compresión(kg/cm ²)		
Estación	Resistencia	Promedio General
38+400	75	79
48+000	67	
57+600	60	
67+200	70	
86+400	61	
91+200	161	
105+600	58	

Tabla 4.3 Resistencia a la compresión sección Acajutla – La Libertad.

En el grafico 4.4 se presentan los valores respectivos a cada estacionamiento evaluado.

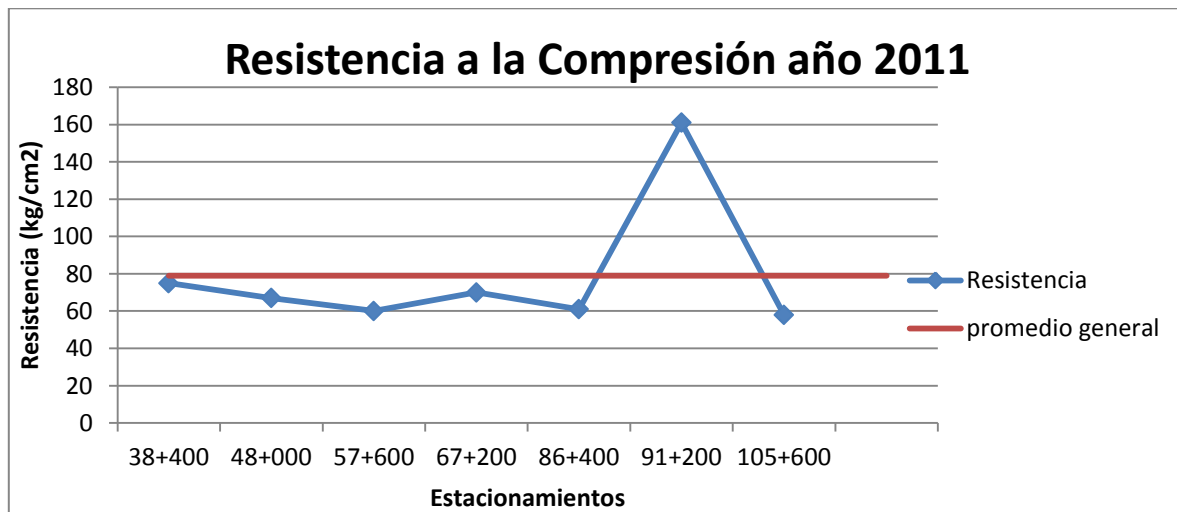


Gráfico 4.4 Resistencia a la compresión sección Acajutla – La Libertad.

Que comparado con su resistencia de diseño especificada (30 kg/cm^2) se concluyó que los pavimentos reciclados con cemento tienden a desarrollar su resistencia con el paso del tiempo, comprobando así lo que en teoría se espera de esta técnica de reciclado.

En cuanto al promedio del módulo de elasticidad dinámico que fue de $2.885\text{E}+06$ psi, que permite verificar la rigidez que presenta este pavimento, muy por encima del valor que proporciona la AASTHO a la base tratada con cemento, la cual es $2.0\text{E}+06$ psi.

4.3 RUTA RN-04 TRAMO SAN MARCOS-ZACATECOLUCA

Esta carretera de pavimento flexible reciclado con cemento tiene una longitud de 50 kilómetros, y cuenta con 2 carriles de 3.65 metros cada uno, ancho de hombros de 1.50 metros. Cuenta con una edad de 8 años de ser rehabilitada y de manera general se comporta con un buen desempeño funcional, pues de acuerdo a la inspección visual, no existen índices severos de daños que corten o disminuyan la velocidad de los usuarios por la misma; pero si se observa desgaste superficial de severidad mínima en algunos tramos de la carretera y esto corresponde al deterioro del pavimento ocasionado principalmente por acción del tránsito, agentes abrasivos o erosivos. Se presenta como pérdidas de ligante y mortero en las zonas por donde transitan los vehículos y por acción del medio ambiente. También se pueden percibir algunos deterioros puntuales como lo son piel de cocodrilo, ahuellamiento, parches y baches.

A Continuación se presenta el resumen de datos generales:

Ruta RN-04, tramo San Marcos – Zacatecoluca.		
DATOS GENERALES DE CARRERA		
NUMERO DE CARRILES	2	metros
ANCHO DE CARRIL	3.65	metros
LONGITUD TOTAL DE PROYECTO	50000	metros
UNIDAD DE MUESTRA ADOPTADA	35	metros
INICIO DE CARRETERA	KILOMETRO 35	
FIN DE CARRETERA	KILOMETRO 112	
$i = \frac{\textit{longitud total del proyecto}}{\textit{unidad de muestra adoptada}}$ $n = \frac{(N)(S^2)}{\frac{e^2}{4}(N-1) + S^2}$ $i = \frac{N}{n}$	n= Número mínimo de unidades de muestra a ser inspeccionadas N= Número de unidades disponibles= S= Desviación Estandar = e= Error Permitido= i= Intervalo de muestra=	16 1428.6 10 5 89
DE ESTO SE DETERMINA QUE LAS UNIDADES A INSPECCIONAR ESTARÁN REPARTIDAS, EN TODA LA LONGITUD DE LA CARRETERA, CADA 89 UNIDADES DE 35 METROS CADA UNA, LO QUE EQUIVALE A 3115 METROS APROXIMADAMENTE.		

Tabla 4.4 Datos generales Ruta RN-04, Tramo San Marcos – Zacatecoluca.

4.3.1 ANÁLISIS FUNCIONAL

Mediante los datos mostrados en el cuadro 4.3 se obtiene el resumen para la determinación del PCI:

INDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTOS (PCI)	
PCI=	64
	BUENO

TOTALES EN LA VÍA - AREA TOTAL ANALIZADA=				4855.5				
total por daño en la vía (m2)	piel de cocodrilo	abultam. U hundim.	Depresión	Grieta de borde	Grieta long. Y transvers.	parches	Baches	Ahuellam.
	220.7	2.3	17	18.4	10.8	62	11.1	165.2
%	4.5	0.0	0.4	0.4	0.2	1.3	0.2	3.4
total por nivel de severidad			LOW		MEDIUM		HIGH	
			m2	%	m2	%	m2	%
			350.8	7.2	88	1.8	68.7	1.4
AREA TOTAL DE AFECTACIÓN DE LA VÍA (m2)			507.5		PORCENTAJE (%)		10.5	

Tabla 4.5 Análisis de daños en carretera sección San Marcos – Zacatecoluca

Con la información de la tabla 4.5. Analizamos los resultados en la carretera gráficamente.

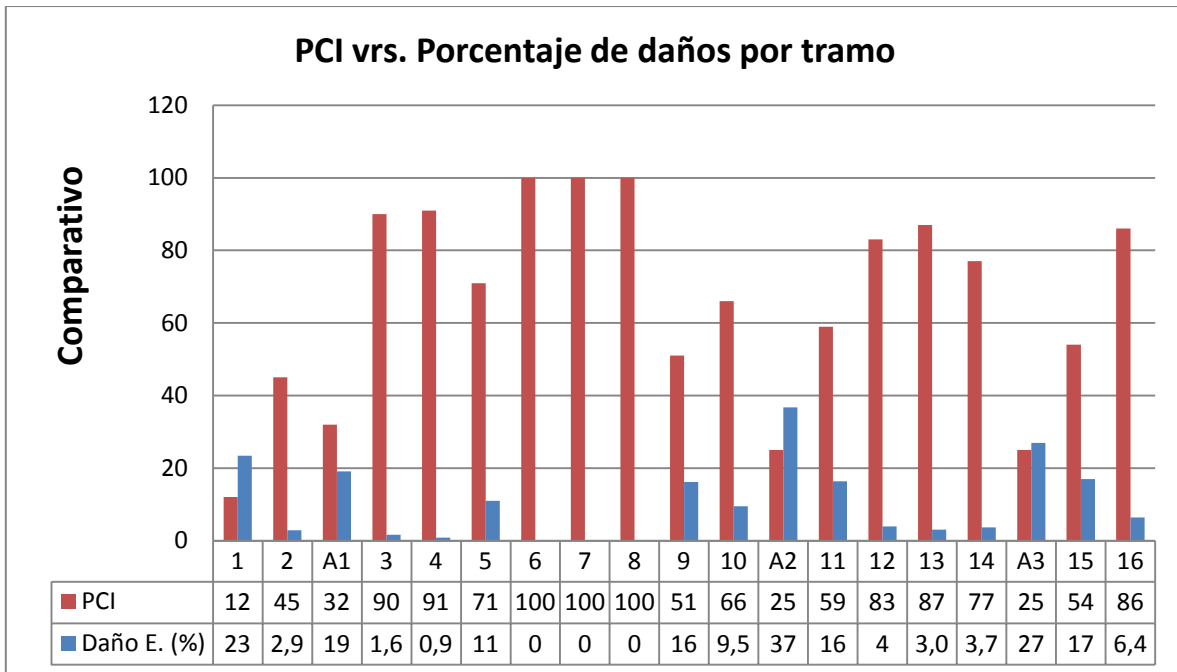


Grafico 4.5 Análisis de PCI versus porcentaje de daños por tramos.

De acuerdo al análisis en la gráfica 4.4 se observa el comportamiento entre el Índice de Condición de Pavimentos (PCI) versus el área de afectación en porcentaje en cada una de las 19 unidades de muestra; los resultados indican una variación de daños de tipo estructural en la mayoría de tramos, ya que en las unidades 6, 7, 8 no presentan deterioros; siendo el total de daños por área afectada de 507.5 m², un 10.5% de su área total inspeccionada en la carretera.

Reflejando así de manera general un comportamiento uniforme, donde a mayor PCI los porcentajes de daños son menores y también a mayor porcentaje de daños el PCI es menor; pero no considerando, pero estos son directamente proporcionales entre sí, de acuerdo a los resultados cuantitativos reflejados en la gráfica, pues hay que considerar sus niveles de severidad (ver gráfico 4.5) y el tipo de deterioro (ver gráfico 4.6) para esta carretera, ya que estos varían de acuerdo a la falla de las capas que componen la estructura del pavimento, de manera superficial (capa asfáltica), profunda (base, sub-base, sub-rasante) o ambas.

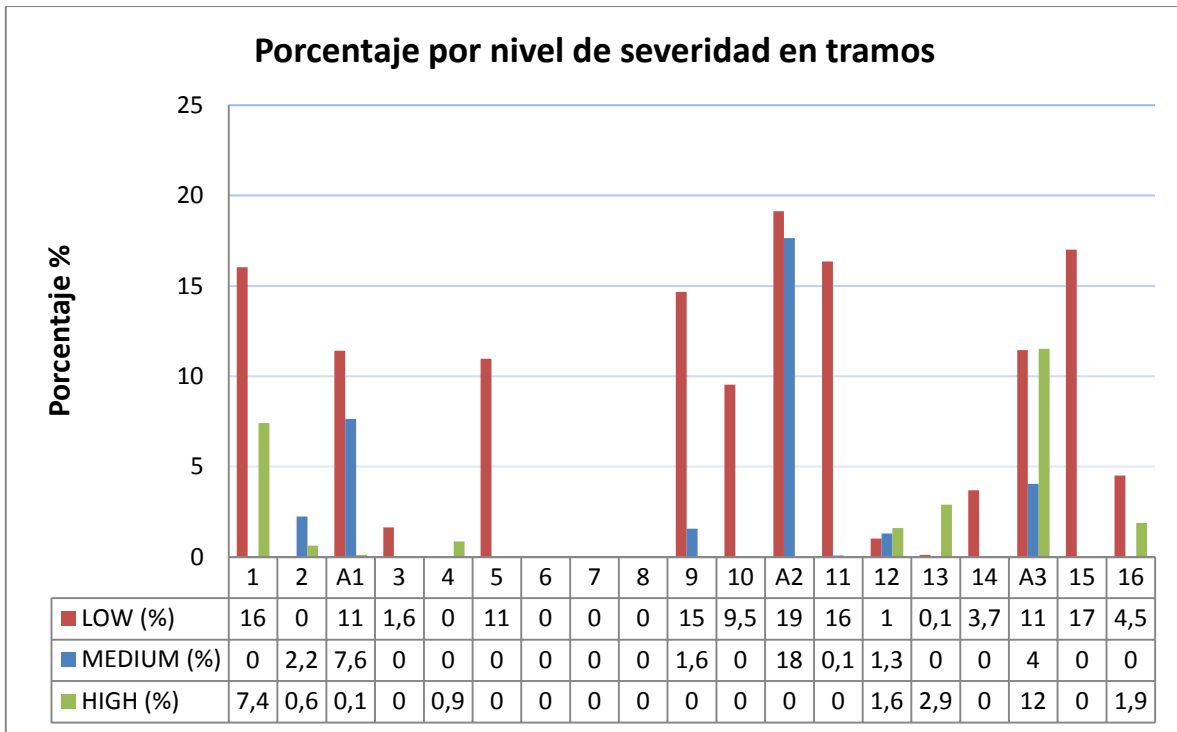


Gráfico 4.6 Representación de daños de acuerdo a sus niveles de severidad en la vía.

Para tener una idea clara e este análisis de cómo afectan los niveles de severidad en esta carretera, se ilustra en el gráfico 4.5 el comportamiento que tienen por unidad de muestra, mostrando así la mayoría tramos afectados por un nivel de severidad baja, y considerando también en los tramos 12, 13 y A3 (tramos adicionales número 3) son afectados por una severidad alta con un bajo porcentaje de área dañada.

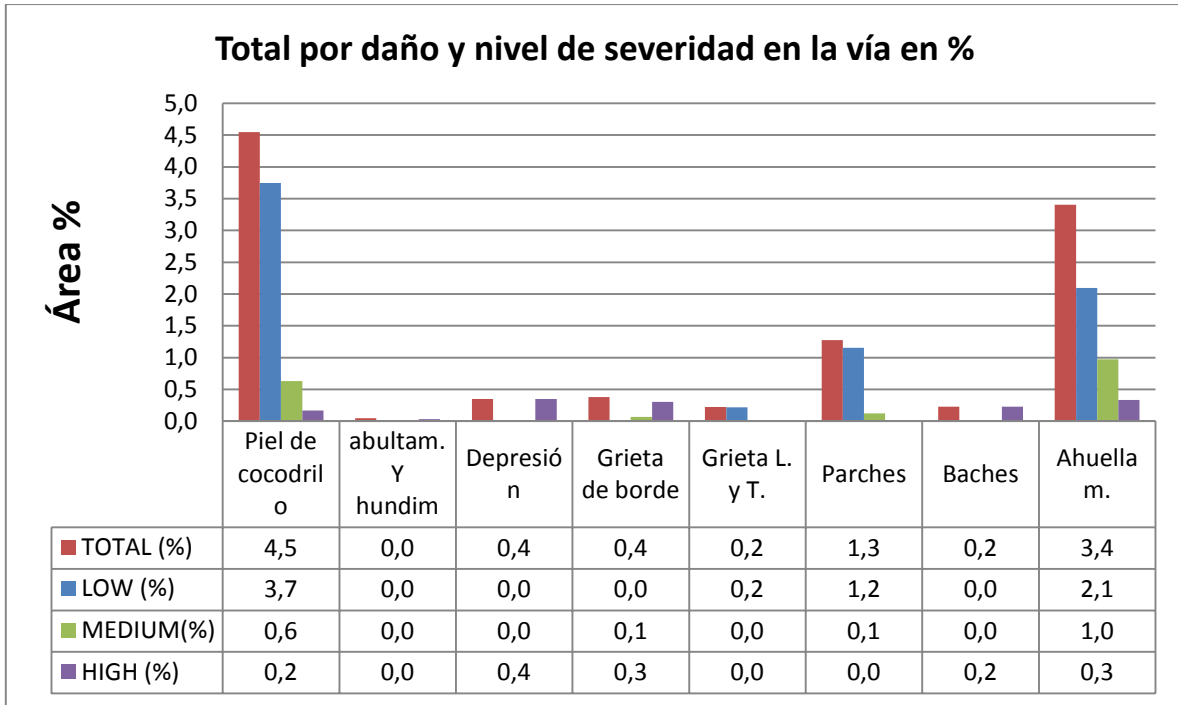


Gráfico 4.7 Representación de daños en área con su respectivo porcentaje en la vía.

Para la afectación por tipo de deterioro, se presenta en la gráfica 4.6 el registro cualitativo y cuantitativo de los daños con sus respectivos niveles de severidad en la sección de carreteras sujeta a estudio. Los daños más frecuentes y que más afectan por su cantidad de área registrada son de tipo estructural (estos son piel de cocodrilo, abultamientos y hundimientos, depresión, grieta de borde, grieta longitudinal y transversal, parches, baches, ahuellamientos); mostrando también respecto a su porcentaje total de daños el nivel de severidad que más predomina, y este es de tipo bajo.

4.3.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Ruta RN-04, tramo San Marcos – Zacatecoluca.

El proceso de extracción de núcleos en esta carretera produjo resultados nulos de extracción de la capa reciclada con cemento en toda la carretera, ya que esta posiblemente, no se encuentre lo suficientemente compactada o no cuenta con la resistencia necesaria para poder llevar a cabo dicho proceso, lo que contribuye a la pérdida de finos por la incorporación de agua durante la perforación, también cabe la posibilidad que la base reciclada en estudio, cuente realmente con un porcentaje bajo de contenido de cemento o en última instancia que la mayor parte de esta carretera cuente con una estabilización mecánica ya que en algunos tramos se observó la presencia de cemento en la base estudiada como se muestra en las siguientes figuras, pero que no generan especímenes que cumplan con los requisitos de altura para su respectivo ensayo de velocidad de pulso y resistencia a la compresión.

4.4 CARRETERA LITORAL (CA-02E), TRAMO COMALAPA – ZACATECOLUCA

Esta vía de longitud de 26 kilómetros de pavimento flexible reciclado con cemento, cuenta con dos carriles de 3.65 metros cada uno y con ancho de hombros de 2.30 metros. En general a 9 años de ser rehabilitada, en todo su trayecto presenta un buen desempeño funcional, pues no existen índices severos de daños que permitan la disminución de velocidades de los usuarios por la misma; pero si se observa desgaste superficial de severidad mínima en algunos tramos de la carretera y esto corresponde al deterioro del pavimento ocasionado principalmente por acción del tránsito, agentes abrasivos o erosivos, algunos deterioros puntuales como piel de cocodrilo, ahuellamiento, grietas longitudinales, transversales y de manera más continua a 5 kilómetros de Zacatecoluca se presentan daños en su mayoría de parches cortos y otros de gran longitud.

A Continuación se presenta el resumen de datos generales:

Carretera Litoral (CA-02E), tramo Comalapa – Zacatecoluca.		
DATOS GENERALES DE CARRERA		
NUMERO DE CARRILES	2	METROS
ANCHO DE CARRIL	3.65	METROS
LONGITUD TOTAL DE PROYECTO	26000	METROS
UNIDAD DE MUESTRA ADOPTADA	35	METROS
INICIO DE CARRETERA	KILOMETRO 35	
FIN DE CARRETERA	KILOMETRO 112	
$i = \frac{\textit{longitud total del proyecto}}{\textit{unidad de muestra adoptada}}$ $n = \frac{(N)(S^2)}{\frac{e^2}{4}(N-1) + S^2}$ $i = \frac{N}{n}$	n= Número mínimo de unidades de muestra a ser inspeccionadas N= Número de unidades disponibles= S= Desviación Estandar = e= Error Permitido= i= Intervalo de muestra=	16 742.86 10 5 46
DE ESTO SE DETERMINA QUE LAS UNIDADES A INSPECCIONAR ESTARÁN REPARTIDAS, EN TODA LA LONGITUD DE LA CARRETERA, CADA 46 UNIDADES DE 35 METROS CADA UNA, LO QUE EQUIVALE A 1610 METROS APROXIMADAMENTE.		

Tabla 4.6 Carretera Litoral (CA-02E), tramo Comalapa – Zacatecoluca.

4.4.1 ANÁLISIS FUNCIONAL

Mediante los datos mostrados en la Tabla 4.7 se obtiene el resumen para la determinación del PCI:

Tabla 4.7 PCI tramo Comalapa - Zacatecoluca

INDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTOS (PCI)				
Carretera de superficie asfáltica				
Determinación de la condición general de los pavimentos evaluados				
Tramo Evaluado:	Comalapa- Zacatecoluca	Est. Inicial:	40+000	
Código de Vía:	CA-02E	Est. Final:	65+300	
Unds Muestreadas:	16	Unds. Adicionales	2	
Area de la Muestra:	255.5	Fecha:	14 y 16/01/2011	
Realizado Por:	UPES-ISCYC			
N° DE MUESTRA	AREA (m2)	ESTACIONAMIENTO		PCI
		EST. INICIAL	EST. FINAL	
1	255.55	40+000	40+035	57
2	255.55	42+100	42+135	100
3	255.55	43+700	43+735	58
4	255.55	45+200	45+235	100
5	255.55	46+300	46+365	39
6	255.55	48+250	48+285	85
7	255.55	49+800	49+835	59
8	255.55	51+500	51+535	71
9	255.55	53+000	53+035	100
10	255.55	54+800	54+835	38
11	255.55	56+400	56+435	90
12	255.55	58+000	58+035	89
13	255.55	59+800	59+835	67
14	255.55	61+300	61+335	24
15	255.55	62+800	62+835	69
16	255.55	64+400	64+435	73
PROMEDIO (PCIr)				70
N° DE MUESTRA	AREA (m2)	ESTACIONAMIENTO		PCI
		EST. INICIAL	EST. FINAL	
ADICIONAL 1	255.55	62+500	62+535	56
ADICIONAL 2	255.55	62+050	62+085	38
ADICIONAL 3	255.55			
PROMEDIO (PCIr)				47
CÁLCULO DE PCI				

DATOS:

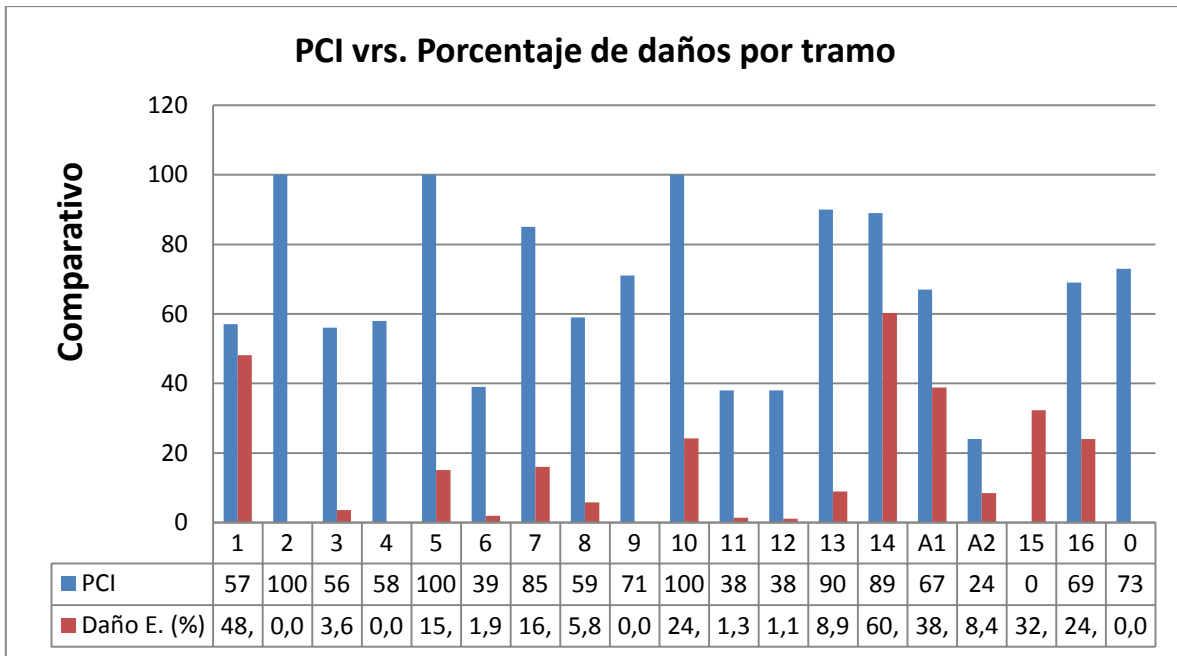
UNDS (N)	Adic. (A)	PCIr	PCla
16	2	70	47
PCIs=	67		
	BUENO		

De la misma manera se muestra el cuadro de análisis de daños:

TIPO DE DAÑOS (m2)								
Daños estructurales - Daños Superficiales								
TOTALES EN LA VÍA - AREA TOTAL ANALIZADA=				4599.9				
total por daño en la vía (m2)	piel de cocodrilo	abultam. U hundim.	Depresión	Grieta de borde	Grieta long. Y transver.	parches	Baches	Ahuellam.
	166.5	7.2	69	5.2	13.8	317.5	0.2	161.3
%	3.6	0.2	1.5	0.1	0.3	6.9	0.0	3.5
total por nivel de severidad								
			LOW		MEDIUM		HIGH	
			m2	%	m2	%	m2	%
			590.7	12.8	147.3	3.2	2.7	0.1
AREA TOTAL DE AFECTACIÓN DE LA VÍA (m2)				740.7		PORCENTAJE (%)		16.1

Tabla 4.8 Análisis de daños en carretera sección Comalapa - Zacatecoluca

Con la información de la tabla 4.8 Analizamos los resultados en la carretera gráficamente.



Gráfica 4.8. Análisis de PCI versus porcentaje de daños por tramos.

De acuerdo al análisis del gráfico 4.8, se observa el comportamiento entre el Índice de Condición de Pavimentos (PCI) versus el área de afectación en porcentaje en cada una de las 18 unidades de muestra; los resultados indican una variación de daños en cantidad de tipo estructural en la mayoría de tramos, ya que en las unidades 2, 4 y 9 no presentan deterioros; siendo el total de daños por área afectada de 740. 8 m², un 16.1% de su área total inspeccionada en la carretera.

El gráfico 4.8 refleja de manera general un comportamiento uniforme, donde a mayor PCI los porcentajes de daños son menores y también a mayor porcentaje de daños el PCI es menor; pero no considerando, que estos son directamente proporcionales entre sí, de acuerdo a los resultados cuantitativos reflejados en la gráfica, pues hay que considerar sus niveles de severidad (ver gráfico 4.9) y el tipo de deterioro (ver gráfico 4.10) para esta carretera, ya que estos varían de acuerdo a las falla de las capas que componen la estructura del pavimentos, de manera superficial (cada asfáltica), profunda (base, sub-base, sub-rasante) o ambas.

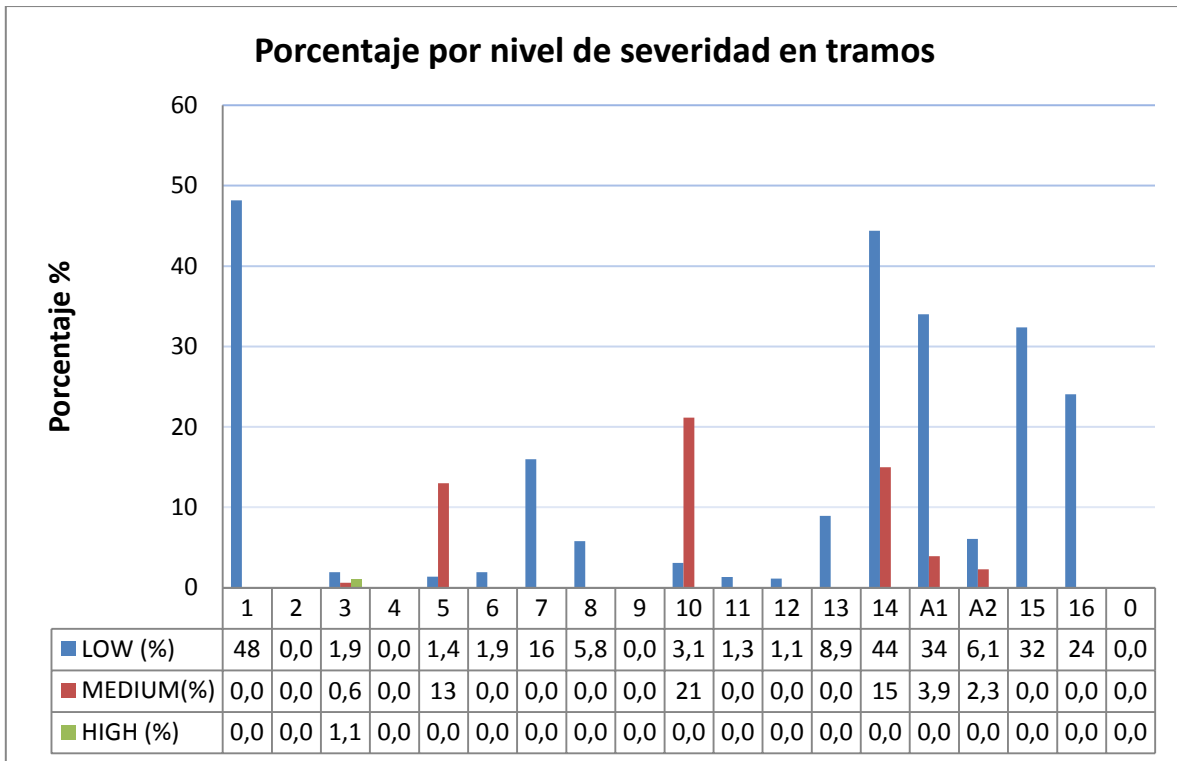


Gráfico 4.9. Representación de daños de acuerdo a sus niveles de severidad en la vía.

Para observar el análisis, cómo afectan los niveles de severidad en esta carretera, se ilustra en el gráfico 4.9 el comportamiento que tienen por unidad de muestra, mostrando así la mayoría de tramos afectados por un nivel de severidad baja y también severidad media en algunas unidades de muestra.

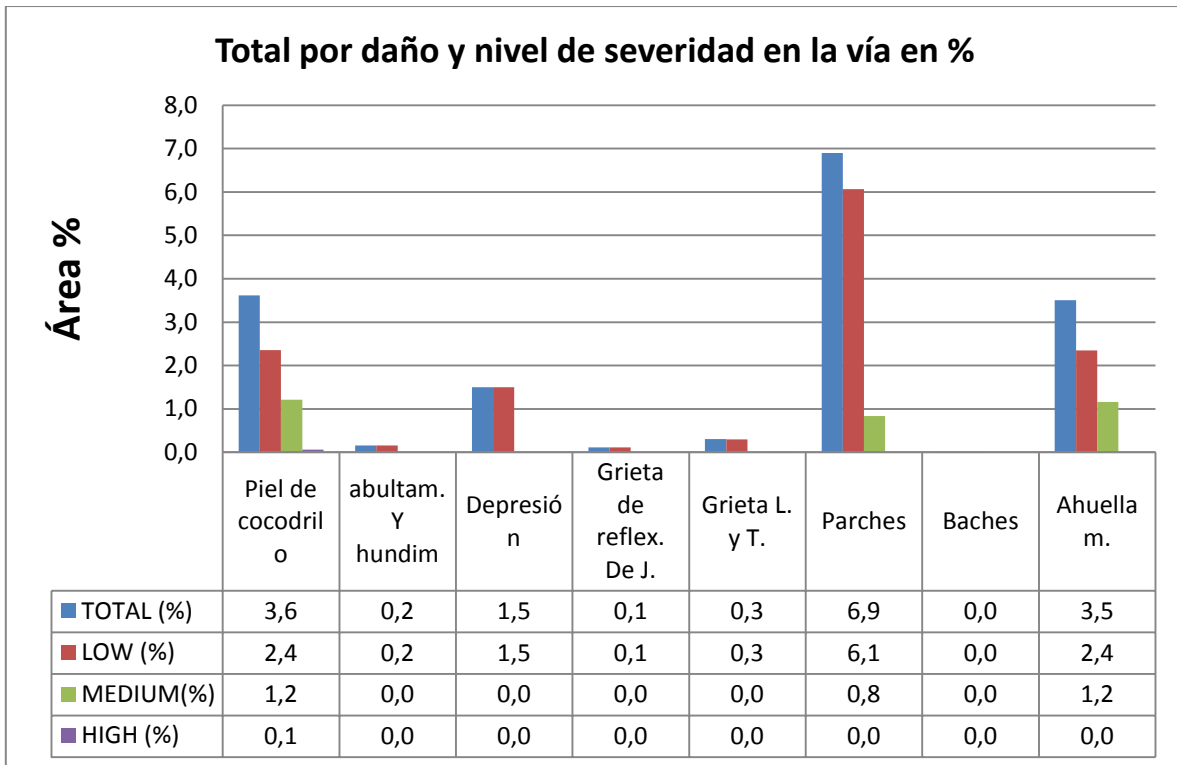


Gráfico 4.10. Representación de daños en área con su respectivo porcentaje en la vía.

Los daños registrada que más afectan a esta carretera (de acuerdo a las unidades de estudio) se representan en el gráfico 4.0, que muestra las áreas totales en porcentajes, los daños más frecuentes y que más afectan por su cantidad de área registrada son de tipo estructural (estos son piel de cocodrilo, abultamientos y hundimientos, depresión, grietas de reflexión de junta, grieta longitudinal y transversal, parches, baches, ahuellamiento); mostrando también respecto a su porcentaje total de daños los niveles de severidad que más predominan, y este es de tipo bajo.

4.4.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para la extracción de núcleos en esta carretera se utilizó una broca en húmedo de 4'' de diámetro, pero que posteriormente se cambió a una de 3'' para cumplir con los requisitos de esbeltez de los núcleos que exige la normativa.

Determinación del módulo dinámico.

Se realizó en forma directa, en cada uno de los núcleos que fueron extraídos y perfilados en sus extremos con el fin de permitir un buen acople de transductores y espécimen como se muestran en la siguiente figura.

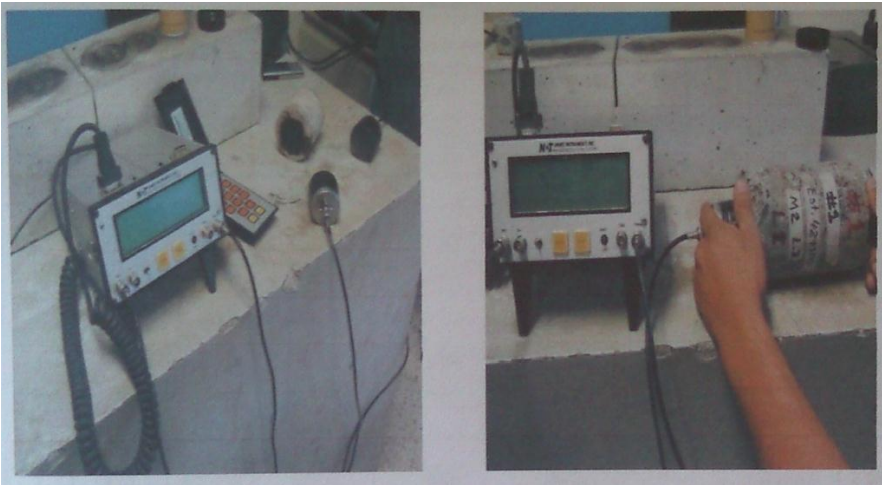


Figura 4.1 equipo para la realización del ensayo de velocidad de pulso.

Los valores registrados para el estudio de velocidad de pulso se presentan a continuación en la tabla 4.9

**VELOCIDAD DE PULSO A TRAVES DEL CONCRETO ASTM C-597
V METER (PULSO ULTRASÓNICO)**

PROYECTO	COMALAPA- ZACATECOLUCA
TIPO DE ESPECIMEN	cilindros de 3'' Y 4'' diámetro
TIPO DE MATERIAL	Base reciclada con cemento
FECHA DE ENSAYO	25/02/2011
LABORATORISTA	reviso
	hoja de laboratorio

Núcleo N°	Masa (lb)	Volumen (pie3)	Peso Volumétrico (lb/pie3)	Distancia entre transductores, (pul)	Tiempo (microseg)	Velocidad (ft/seg)	Módulo de elasticidad dinámico (PSI)	Módulo de elasticidad dinámico (kg/cm2)
1	5.75	0.03854	149.2	5.94	41.8	11835	4.518E+06	3.176E+05
2	3.54	0.02556	138.5	3.94	36.6	8952	2.413E+06	1.696E+05
						promedio	3.466E+06	2.436E+05
3	3.35	0.02557	131	3.94	24.7	13277	2.939E+06	2.066E+05
4	4.73	0.03500	135.16	5.31	40.3	10971	2.838E+06	1.995E+05
						promedio	2.889E+06	2.030E+05
5	4.68	0.03038	154.03	4.69	32.8	11931	1.99E+06	1.40E+05
6	4.69	0.03908	120	6.02	52.1	9623	1.942E+06	1.365E+05
						promedio	1.965E+06	1.381E+05
7	3.61	0.02453	147.16	3.66	32	9542	2.923E+06	2.055E+05
8	3.67	0.02503	146.6	3.86	37.2	8661	2.345E+06	1.648E+05
						promedio	2.634E+06	1.852E+05
9	5.4	0.03627	148.9	5.59	44.2	10539	2.054E+06	1.444E+05
10	5.45	0.03705	147.1	5.71	44.9	10590	1.802E+06	1.267E+05
						promedio	1.928E+06	1.355E+05
11	2.67	0.01792	149	4.53	32.7	11533	4.273E+06	3.004E+05
12	3.06	0.02137	143.2	5.39	42.9	10499	3.410E+06	2.397E+05
						promedio	3.842E+06	2.700E+05
13	3.12	0.02152	145	5.43	30.6	14788	4.505E+06	3.167E+05
						promedio	4.505E+06	3.167E+05
14	2.39	0.01624	147.16	3.98	25.2	11484	4.07E+06	2.86E+05
15	1.87	0.01275	146.66	3.47	25.6	11284	3.721E+06	2.616E+05
						promedio	3.987E+06	2.739E+05
OBSERVACIONES:								

Tabla 4.9 resultados de la prueba de velocidad de pulso.

Determinación de la resistencia a la compresión

Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron luego de haber hecho la prueba de velocidad de onda para determinar el modulo elástico respectivo, que posteriormente se cabecearon los especímenes para la prueba de resistencia a la compresión.

Los valores de resistencia a la compresión se muestran en la tabla 4.10

Resistencia a la compresión(kg/cm²)		
Estación	Resistencia	Promedio General
42+100	118	105
45+200	60	
48+200	57	
50+800	102	
53+800	87	
58+000	102	
61+000	151	
64+400	160	

Tabla 4.10 resultados de la resistencia a la compresión carretera CA-02E Litoral Comalapa – Zacatecoluca

Estos valores correspondientes a la resistencia a la compresión obtenida en cada uno de los estacionamientos evaluados en esta carretera se presentan en el gráfico 4.11

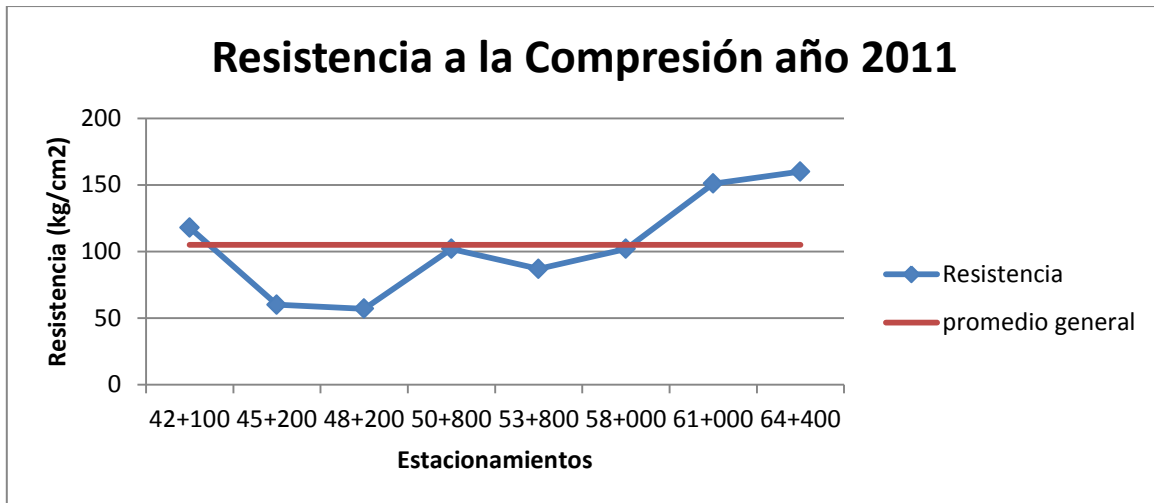


Gráfico 4.11 valores de resistencia a la compresión CA-02E Comalapa – Zacatecoluca.

Módulo de Elasticidad dinámico.

El promedio del módulo de elasticidad dinámico encontrado fue de $3.141E+06$ psi de esta forma también se verifica y establece que este pavimento posee una rigidez muy por encima del valor que la AASTHO recomienda para bases tratadas con cemento que es $2.0E+06$ psi.

En la tabla 4.10 se presenta los valores del módulo dinámico por cada estación evaluada, pero también se presentan en conjunto con los valores de la resistencia a la compresión para realizar una comparación entre variable.

tabla comparativa		
Estación	Resistencia(kg/m ²)	Módulo dinámico(psi)
42+100	118	3.47E+06
45+200	60	2.89E+06
48+200	57	1.97E+06
50+800	102	2.63E+06
53+800	87	1.93E+06
58+000	102	3.84E+06
61+000	151	4.51E+06
64+400	160	3.90E+06

Tabla 4.11 valores de resistencia y módulo elástico dinámico.

En el siguiente gráfico se presenta los valores del módulo dinámico y de la resistencia a la compresión por cada punto evaluado.

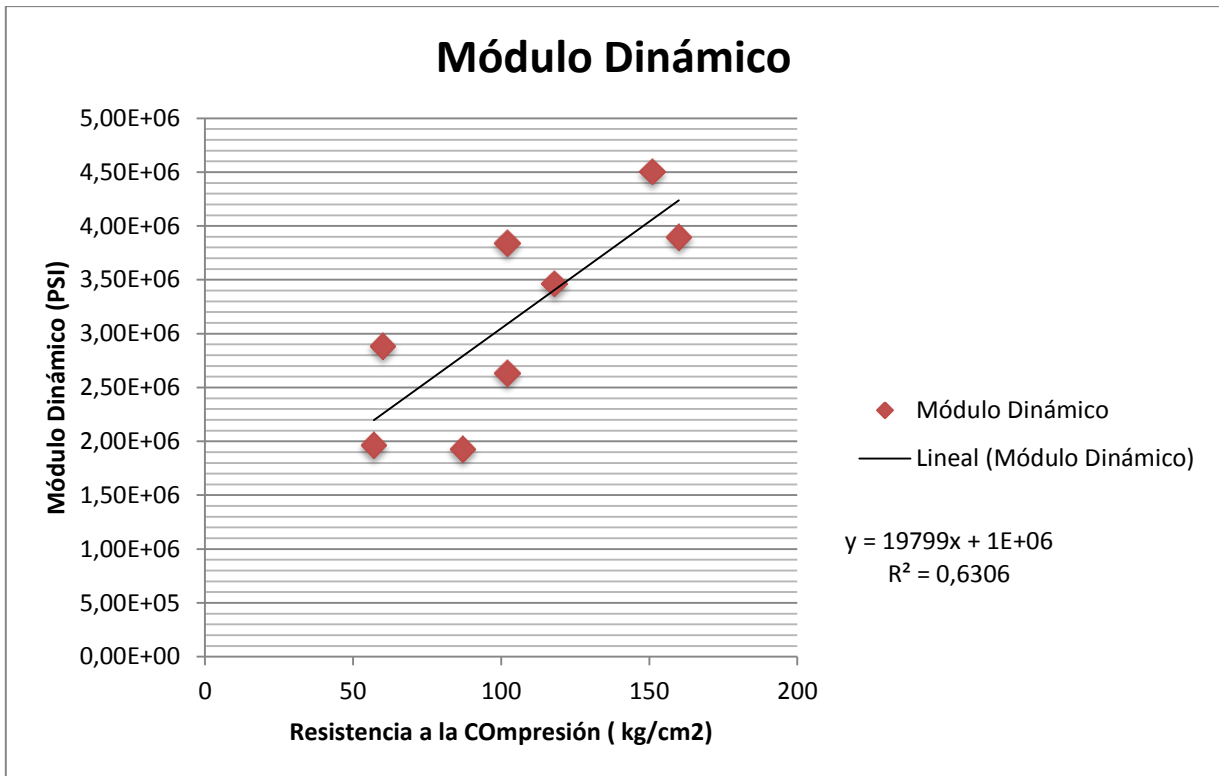


Grafico 4.12 valores de resistencia y módulo elástico dinámico.

Para este proyecto el valor de la resistencia de diseño fue 21 kg/cm², y actualmente la carretera está presentando una resistencia a la compresión promedio 105 kg/cm², indicando que estos pavimentos reciclados tienden a desarrollar su resistencia con el paso del tiempo.

En la tabla 4.12 se presenta los valores de resistencia tanto de diseño como los registrados en dicha investigación realizada en el año 2011.

Resistencia de Diseño vrs Resistencia 2011		
Estación	Resistencia de Diseño	Resistencia 2011
42+100	21	118.00
45+200	21	60.00
48+200	21	57.00
50+800	21	102.00
53+800	21	87.00
58+000	21	102.00
61+000	21	151.00
64+400	21	160.00

Tabla 4.12 valores de resistencia de diseño vrs resistencia 2011

Estos valores se presentan en el gráfico 4.13 donde se realiza una comparación entre ambos valores y como el de diseño ha variado desde su construcción hasta la fecha del estudio.

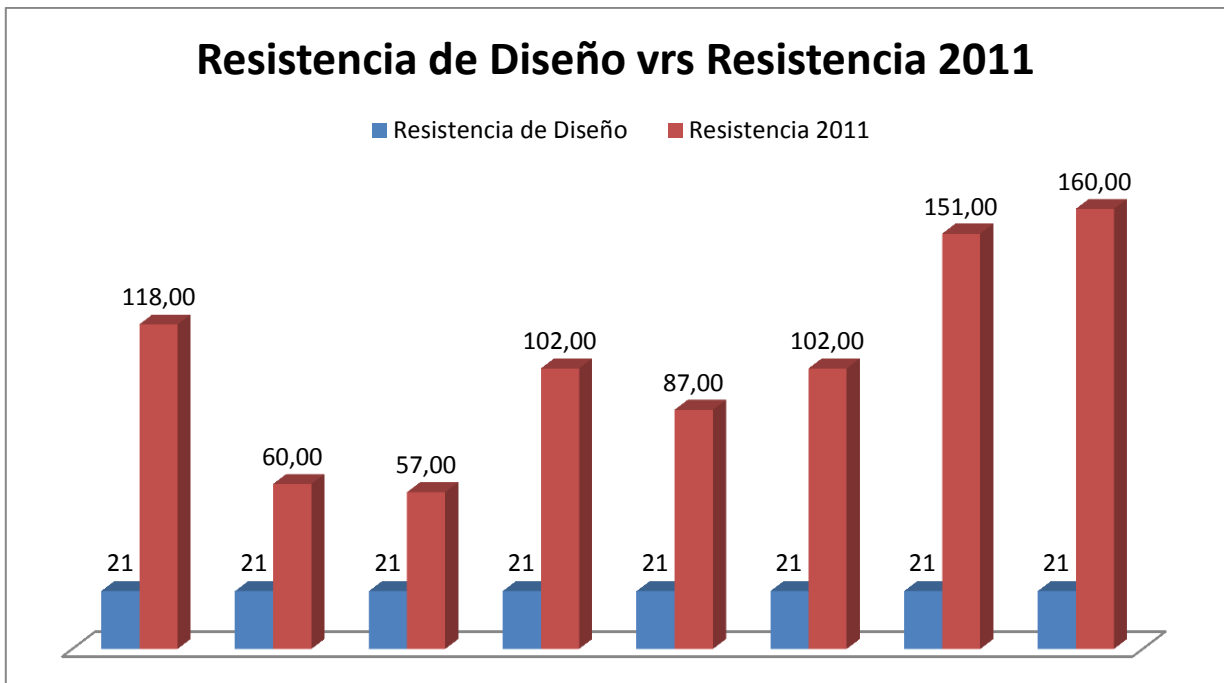


Gráfico 4.13 valores de resistencia de diseño vrs resistencia 2011.

4.5 CARRETERA LITORAL (CA-02E), TRAMO USULUTÁN - EL DELIRIO

Esta carretera de pavimento flexible reciclado con cemento tiene una longitud de 31 kilómetros, y cuenta con 2 carriles de 3.65 metros cada uno, ancho de hombros de 2.25 metros. Cuenta con una edad de 4 años de ser rehabilitada y de manera general se comporta con un buen desempeño funcional, pues de acuerdo a la inspección visual no existen índices severos de daños que corten ó disminuyen la velocidad de los usuarios por la misma; pero si se observa algunos deterioros puntuales como lo son ahuellamiento, grietas longitudinales y transversales y piel de cocodrilo.

A Continuación se presenta el resumen de datos generales:

Carretera Litoral (CA-02E), tramo Usulután – El Delirio		
DATOS GENERALES DE CARRERA		
NUMERO DE CARRILES	2	METROS
ANCHO DE CARRIL	3.65	METROS
LONGITUD TOTAL DE PROYECTO	31000	METROS
UNIDAD DE MUESTRA ADOPTADA	35	METROS
INICIO DE CARRETERA	KILOMETRO 113	
FIN DE CARRETERA	KILOMETRO 144	
$i = \frac{\textit{longitud total del proyecto}}{\textit{unidad de muestra adoptada}}$ $n = \frac{(N)(S^2)}{\frac{e^2}{4}(N - 1) + S^2}$ $i = \frac{N}{n}$	n= Número minimo de unidades de muestra a ser inspeccionadas 16 N= Número de unidades disponibles= 885.7 S= Desviación Estandar = 10 e= Error Permitido= 5 i= Intervalo de muestra= 55	
DE ESTO SE DETERMINA QUE LAS UNIDADES A INSPECCIONAR ESTARÁN REPARTIDAS, EN TODA LA LONGITUD DE LA CARRETERA, CADA 55 UNIDADES DE 35 METROS CADA UNA, LO QUE EQUIVALE A 1925 METROS APROXIMADAMENTE.		

Tabla 4.13 Carretera Litoral (CA-02E), tramo Usulután- El Delirio

4.5.1 ANÁLISIS FUNCIONAL

Calculo del PCI:

INDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTOS (PCI)	
CÁLCULO DE PCI	

DATOS:

PCIs=	86
	EXCELENTE

De la misma manera se muestra el cuadro de análisis de daños:

TOTALES EN LA VÍA - AREA TOTAL ANALIZADA= 4344.4								
total por daño en la vía (m2)	Piel de cocodrilo	Grieta long. Y transver.	Ahuellam.	Cruce de linea ferrea				
	78.8	8.1	96	8	0	0	0	0
%	1.8	0.2	2.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
total por nivel de severidad			LOW		MEDIUM		HIGH	
			m2	%	m2	%	m2	%
			190.8	4.4	0	0.0	0	0.0
AREA TOTAL DE AFECTACIÓN DE LA VÍA (m2)			190.8		PORCENTAJE (%)		4.4	

Tabla 4.14 Análisis de daños en carretera sección Usulután - El Delirio.

Con la información del cuadro 4.8 Analizamos los resultados en la carretera gráficamente.

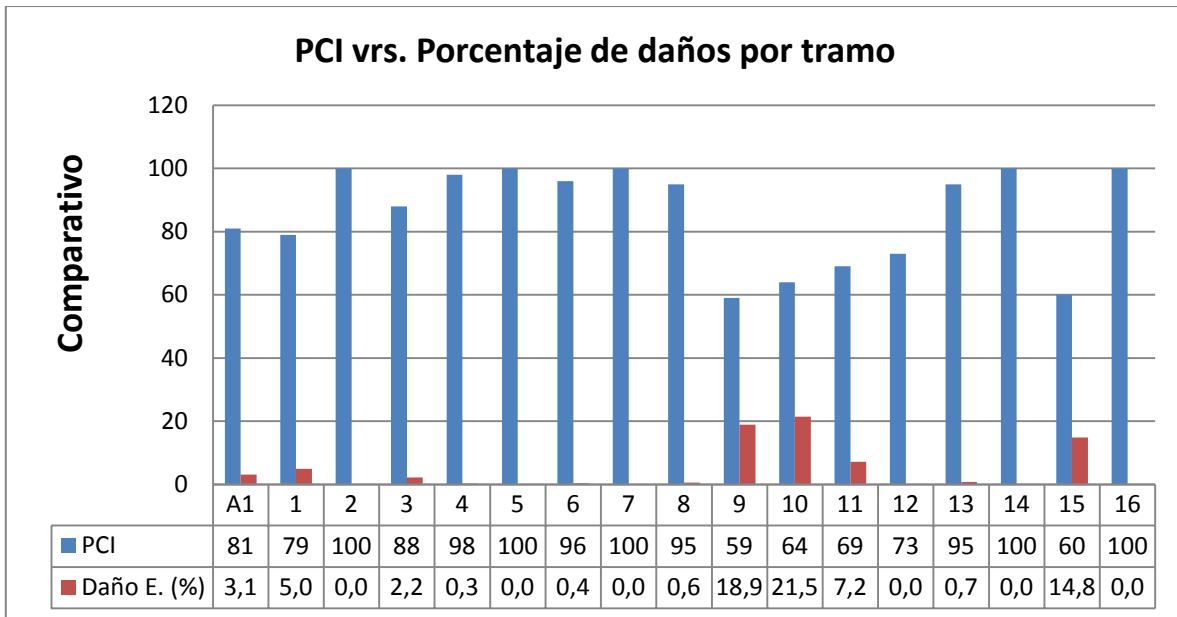


Gráfico 4.14 Análisis de PCI versus porcentaje de daños por tramos.

Para analizar el estado funcional de esta carretera, el gráfico 4.14 nos muestra el comportamiento que tiene el Índice de Condición de Pavimentos (PCI) con la cantidad de área en porcentaje en cada una de las 17 unidades de muestra; los resultados nos indican una variación de daños en cantidad de tipo estructural en la mayoría de tramo, ya que en las unidades 2, 5, 7, 14 y 16 no presentan deterioros; siendo el total daños por área afectada de 10.8 m², un 4.4% de su área total inspeccionada en la carretera.

Considerando también que esta vía está en excelente estado; la gráfica 4.14 refleja de manera general un comportamiento uniforme, donde a mayor PCI los porcentajes de daños son menores; pero considerando, que estos no son directamente proporcionales entre sí de acuerdo a los resultados cuantitativos reflejados en la gráfica, pues hay que considerar sus niveles de severidad (ver gráfico 4.15) y el tipo de deterioro (ver gráfico 4.16) para esta carretera, ya que esto varían de acuerdo a la falla de las capas que componen la estructura del pavimento, de manera superficial (capa asfáltica), profunda (base, sub-base, sub-rasante) o ambas.

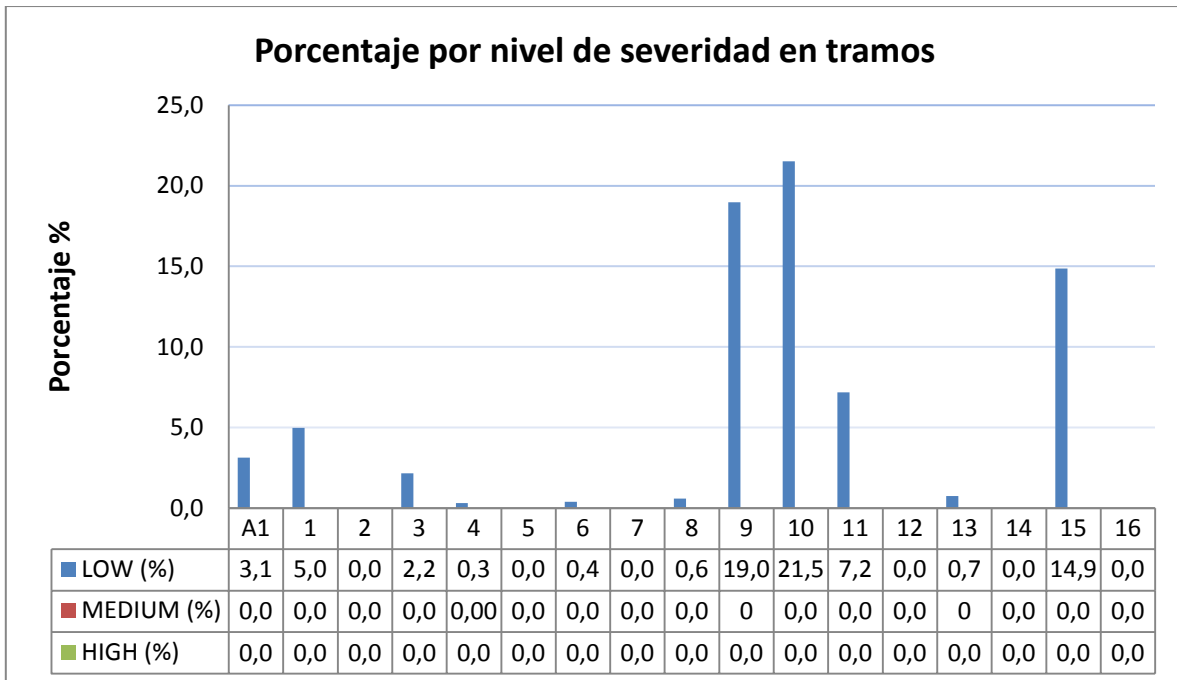


Gráfico 4.15 Representación de daños de acuerdo a sus niveles de severidad en la vía.

La gráfica 4.12 muestra que todos los tramos presentan daños estructurales (estos son piel de cocodrilo, grietas longitudinales y transversales, ahuellamiento, cruce de línea férrea) y con niveles de severidad bajos únicamente en todas las unidades de muestra (ver gráficos 15 y 16); respaldando así lo mencionado en su condición funcional como excelente para estas sección de carretera.

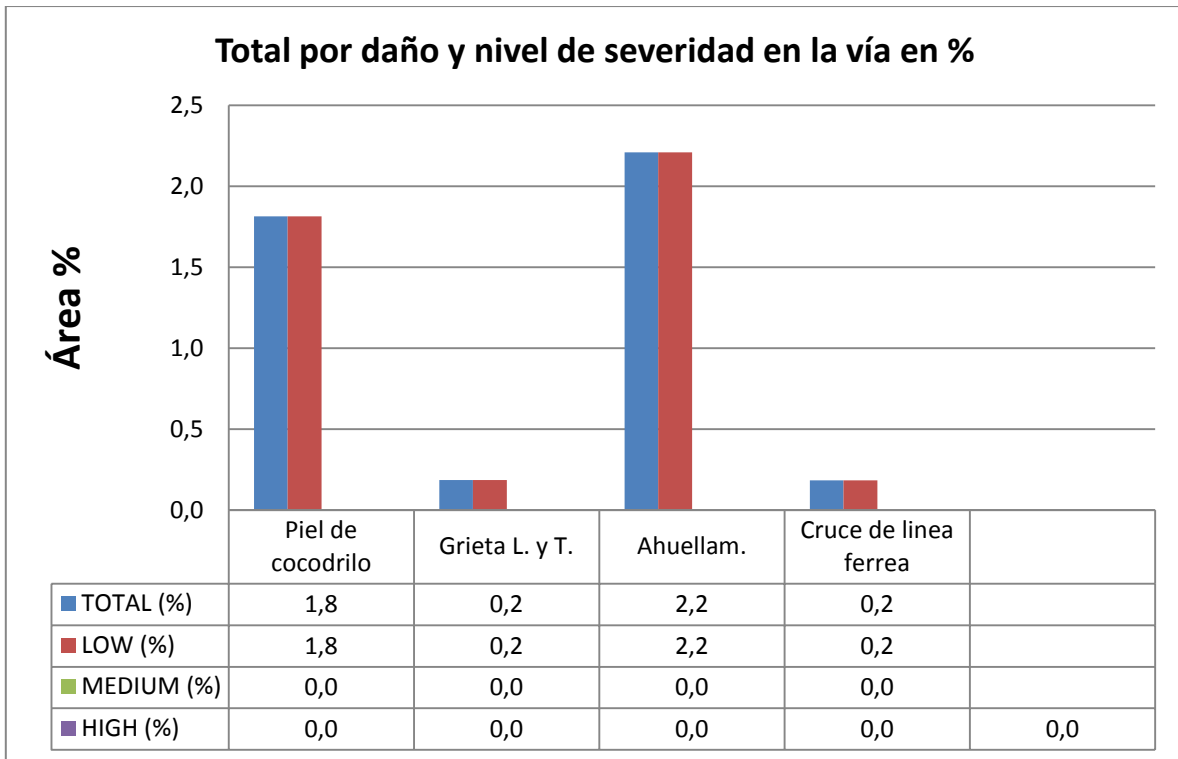


Gráfico 4.16. Representación de daños en área con su respectivo porcentaje en la vía.

Los daños registrados que más afectan esta carretera se representan en la gráfica 4.16 y de acuerdo a los resultados obtenidos podemos conocer a profundidad los deterioros más significativos que afectan la vía.

4.5.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Los valores de la resistencia a la compresión promedios encontrados en cada una de las unidades de muestreo, las cuales se ubican en diferentes estaciones en toda la longitud de la carretera CA-02E tramo Usulután – El Delirio; estos valores de resistencia fueron obtenidos de un promedio de dos especímenes cilíndricos, y su promedio general es igual a:

Resistencia a la compresión(kg/cm ²)		
Estación	Resistencia	Promedio General
119+300	39	59
126+900	59	
134+500	46	
142+100	92	

Tabla 4.15 resultados de la resistencia a la compresión carretera CA-02E Litoral Usulután–El Delirio.

Los valores de la tabla 4.14 se presentan en el grafico 4.17.

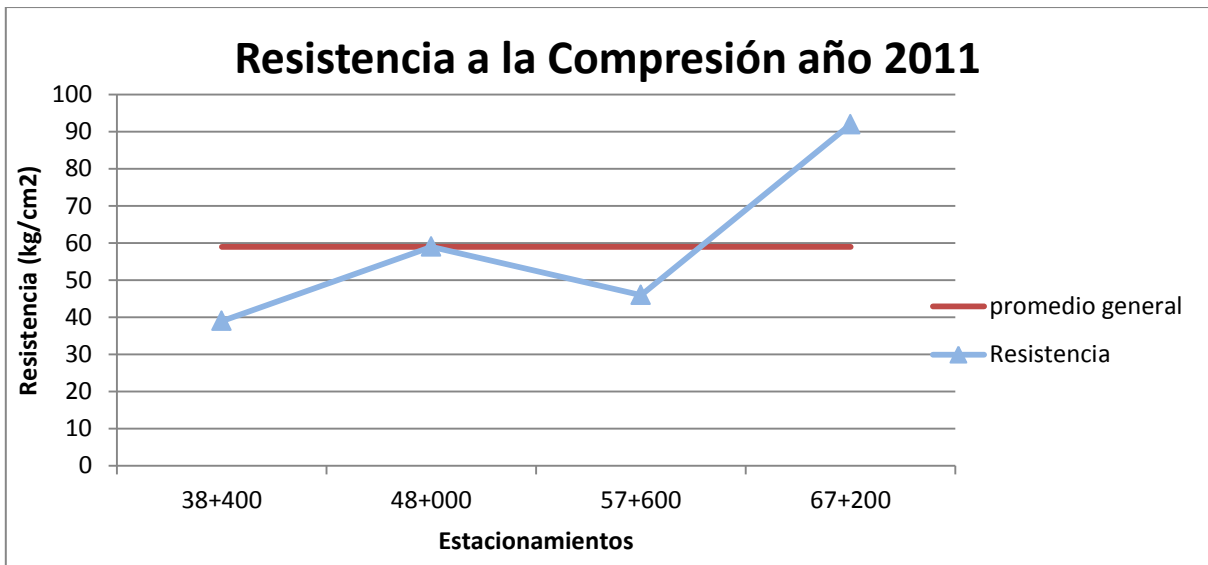


Gráfico 4.17 Resistencia a la compresión sección Usulután – El Delirio.

Mientras que su valor de diseño fue de: 28kg/cm^2 superando en un poco más del doble actualmente ese valor luego de aproximadamente 6 años a partir de su construcción en los años 2,007 y 2,008.

Mientras que el valor del módulo dinámico es mayor al establecido por la AASTHO teniendo como valor de módulo dinámico el siguiente valor $\text{MD} = 2.314\text{E}+06$ considera de alta rigidez.

4.6 CARRETERA LITORAL (CA-02E), TRAMO EL DELIRIO- LA UNIÓN

Esta vía de longitud de 58 kilómetros de pavimento flexible reciclado con cemento consta de dos carriles de 3.65 metros cada uno y ancho de hombros de 2.00 metros. A 8 años de ser rehabilitada, en todo su trayecto en general, presenta un buen desempeño funcional, pues no existen índices severos de daños que permitan la disminución de velocidades de los usuarios por la misma; pero si se observa desgaste superficial de severidad baja y media en algunos tramos de la carretera (algunos tramos muy continuos con este tipo de desgaste) Y esto corresponde al deterioro del pavimento ocasionado principalmente por acción del tránsito, agentes abrasivos o erosivos. Se presenta como pérdida de ligante y mortero en las zonas por donde transitan los vehículos y por acción del medio ambiente. También consideran algunos deterioros puntuales en su gran mayoría de grietas longitudinales y transversales que van desde baja a media severidad, grietas en bloque, piel de cocodrilo y ahuellamiento.

A Continuación se presenta el resumen de datos generales:

4.7 CARRETERA LITORAL (CA-02E), TRAMO EL DELIRIO- LA UNIÓN		
DATOS GENERALES DE CARRERA		
NUMERO DE CARRILES	2	METROS
ANCHO DE CARRIL	3.6	METROS
LONGITUD TOTAL DE PROYECTO	58000	METROS
UNIDAD DE MUESTRA ADOPTADA	35	METROS
INICIO DE CARRETERA	KILOMETRO 113	
FIN DE CARRETERA	KILOMETRO 144	
$i = \frac{\textit{longitud total del proyecto}}{\textit{unidad de muestra adoptada}}$ $n = \frac{(N)(S^2)}{\frac{e^2}{4}(N-1) + S^2}$ $i = \frac{N}{n}$	n= Número minimo de unidades de muestra a ser inspeccionadas N= Número de unidades disponibles= S= Desviación Estandar = e= Error Permitido= i= Intervalo de muestra=	16 1657.14 10 5 103
DE ESTO SE DETERMINA QUE LAS UNIDADES A INSPECCIONAR ESTARÁN REPARTIDAS, EN TODA LA LONGITUD DE LA CARRETERA, CADA 103 UNIDADES DE 35 METROS CADA UNA, LO QUE EQUIVALE A 3605 METROS APROXIMADAMENTE.		

Tabla 4.16 Carretera Litoral (CA-02E), tramo Delirio – La Unión.

4.7.1 ANÁLISIS FUNCIONAL

Calculo del PCI:

INDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTOS (PCI)	
CÁLCULO DE PCI	

DATOS:

UNDS (N)	Adic. (A)	PCIr	PCIa
16	1	64	76

PCIs=	65
	BUENO

TOTALES EN LA VÍA - AREA TOTAL ANALIZADA=				4284.0				
total por daño en la vía (m2)	piel de cocodrilo	abultam. U hundim.	Depresión	Grieta de borde	Grieta long. Y transvers.	parches	Baches	Ahuellam.
	489.6	672.1	10.5	77.6	41.3	4.4	109	630.1
%	11.4	15.7	0.2	1.8	1.0	0.1	2.5	14.7
total por nivel de severidad			LOW		MEDIUM		HIGH	
			m2	%	m2	%	m2	%
			2034.6	47.5	0	0.0	0	0.0
AREA TOTAL DE AFECTACIÓN DE LA VÍA (m2)			2034.6		PORCENTAJE (%)		47.5	

Tabla 4.17 Análisis de daños en carretera sección El delirio - La Unión

Con la información de la tabla 4.17 Analizamos los resultados en la carretera gráficamente.

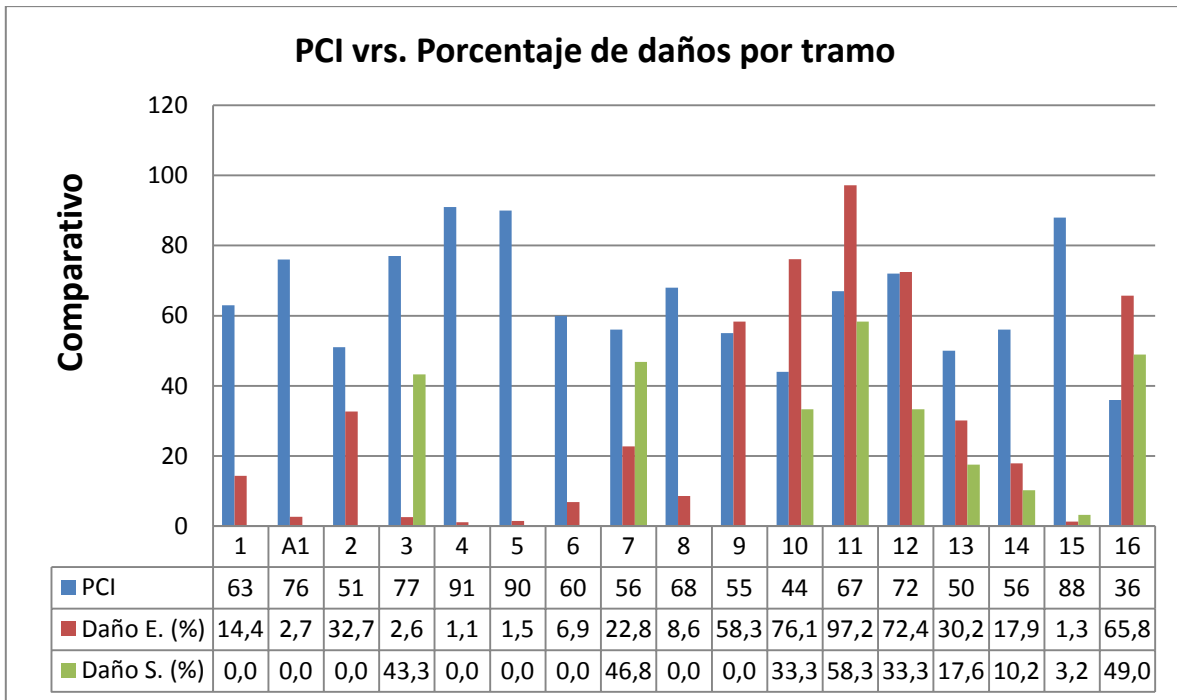


Gráfico 4.18 Análisis de PCI versus porcentaje de daños por tramos.

De acuerdo al análisis en la gráfica 4.18, los resultados nos muestran una variación de daños estructurales (notorios en todos los tramos) y superficiales (en tramos 3, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16) por área de afectación en porcentaje versus el Índice de Condición de Pavimentos (PCI) en cada una de las 17 unidades de muestra; siendo el total daños por área afectada de 2034. 6 m², un 47.5 % de su área inspeccionada en la carretera.

Los resultados reflejan de manera general un comportamiento uniforme, donde a mayor PCI los porcentajes de daños son menores y también a mayor porcentaje de daños el PCI es menor; pero no considerando, que estos son directamente proporcionales entre sí de acuerdo a los resultados cuantitativos reflejados en la gráfica, pues hay que considerar sus niveles de severidad (ver gráfica 4.19) y el tipo de deterioro (ver gráfico 4.20), ya que estos varían de acuerdo a la falla de las

capas que componen la estructura del pavimento, de manera superficial (capa asfáltica), profunda (base, sub-base, sub-rasante) o ambas.

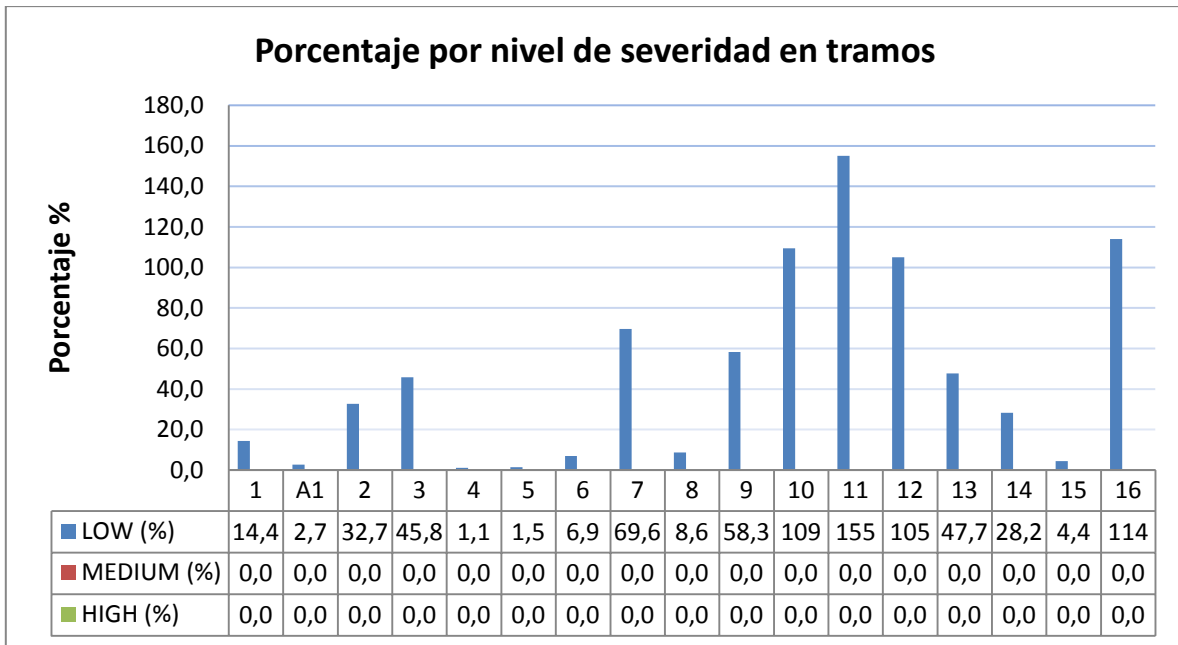


Gráfico 4.19 Representación de daños de acuerdo a sus niveles de severidad en la vía.

Para tener una idea clara en este análisis de cómo afectan los niveles de severidad en esta carretera, se ilustra en el gráfico 4.19 el comportamiento que tienen por unidad de muestrar dando como resultado que todos los tramos son afectados por una severidad baja.

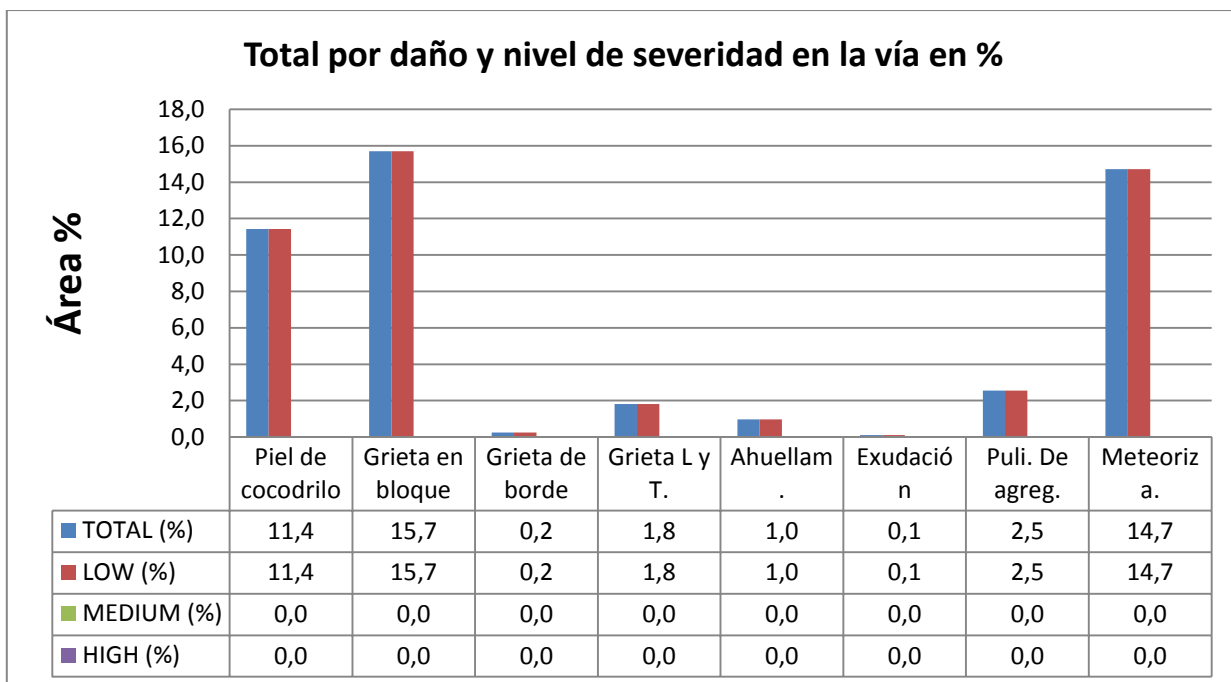


Gráfico 4.20 Representación de daños en área con su respectivo porcentaje en la vía.

Para la afectación por tipo de deterioro, se presenta en la gráfica 4.20 el registro cualitativo y cuantitativo de los daños con sus respectivos niveles de severidad en la sección de carretera sujeta a estudio. Los daños más frecuentes y que más afectan por su cantidad de área registrada son de tipo estructural (estos son piel de cocodrilo, grieta en bloque, grieta de borde, grieta longitudinal y transversal, ahuellamientos) y de manera más leve los de tipo superficial (estos son meteorización ó desprendimientos de agregados, pulimiento de agregados, exudación); mostrando también respecto a su porcentaje total de daños, la existencia únicamente niveles bajos de severidad para cada unidad de muestra en la vía.

4.7.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Los valores de la resistencia a la compresión promedios encontrados en cada una de las unidades de muestreo, las cuales se ubican en diferentes estaciones en toda la longitud de la carretera CA-02E tramo El Delirio-La Unión; estos valores de

resistencia fueron obtenidos de un promedio de dos especímenes cilíndricos, y su promedio general es igual a:

Resistencia a la compresión(kg/cm ²)		
Estación	Resistencia	Promedio general
154+600	94	86
161+000	77	
167+400	53	
173+800	50	
193+000	154	

Tabla 4.18 resultados de la resistencia a la compresión carretera CA-02E Litoral El Delirio – La Unión.

Mientras que el valor de diseño de este proyecto es igual a 35kg/cm² por lo que el valor promedio supera el de diseño resultando en una buena evolución de la técnica de reciclado.

En el siguiente gráfico se presenta los valores de la tabla 4.16

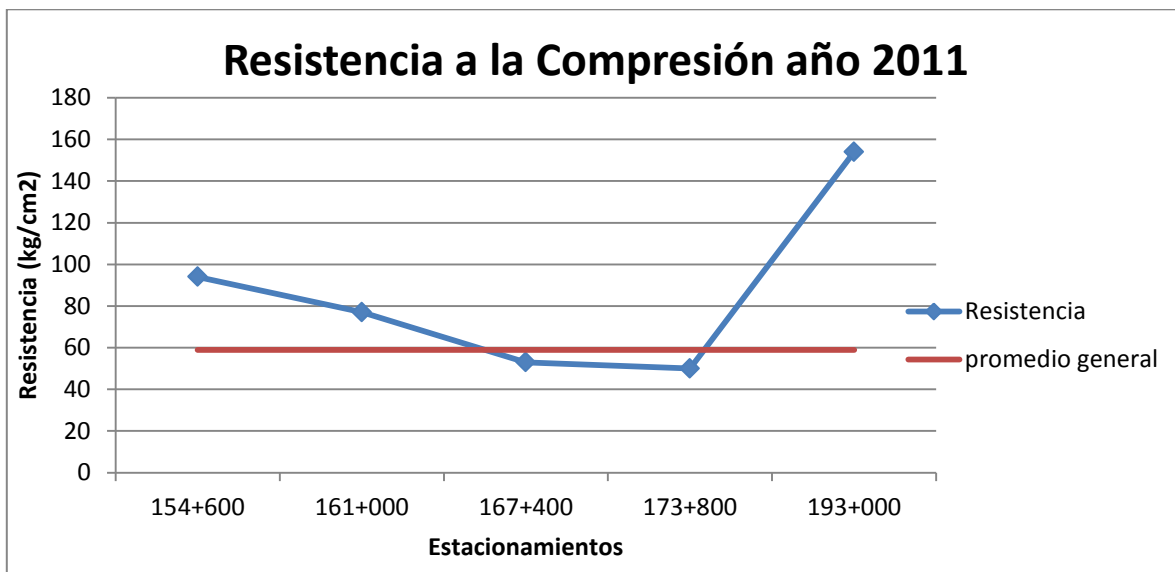


Gráfico 4.21 Resistencia a la compresión sección El Delirio – La Unión.

4.8 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE CARRETERAS SELECCIONADAS

A continuación se presenta la información general de las carreteras seleccionadas. Las tablas 4.17 y 4.18 muestran un resumen, haciendo una matriz de comparación para su análisis funcional.

CARRETERA	EDAD	PCI	PORCENTAJE DE DAÑO POR VÍA		TOTAL DE DAÑOS
			ESTRUCTURALES	SUPERFICIALES	
ACAJUTLA - LA LIBERDAD/ 9 años	9	56	27.7	5.3	33
SAN MARCOS - ZACATECOLUCA/ 8 años.	8	64	10.5	0	10.5
COMALAPA - ZACATECOLUCA/ 9 años	9	67	16.1	0	16.1
USULUTÁN-EL DELIRIO/ 4 años.	4	86	4.4		4.4
EL DELIRIO-LA UNIÓN/ 8 años.	8	65	30.1	17.4	47.5

Tabla 4.19 Resumen analítico de carreteras seleccionadas.

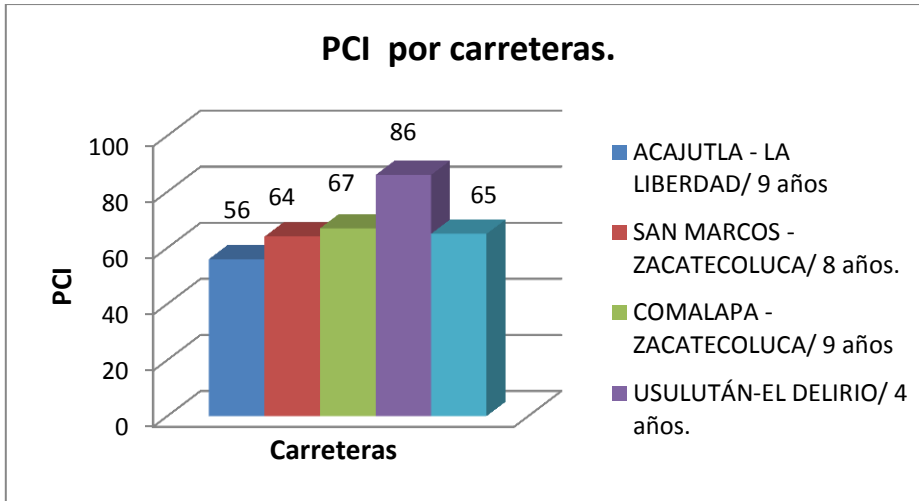


Gráfico 4.22 Comparación de PCI entre carreteras.

Al observar el análisis comparativo en la gráfica 4.19, la mayoría de carreteras tienen una edad de 8 y 9 años, y a pesar de los factores climáticos, tráfico y envejecimiento de los materiales estas carreteras tienen un comportamiento funcional buena, siendo la carretera tramos Acajutla-La Libertad la de menor ponderación con un PCI de 56, pero con menor cantidad de daños en comparación con la carretera tramos El Delirio-La Unión (ver gráfico 4.20) que se determina con un PCI más alto (PCI=65); esto es debido, que hay que considerar el tipo de deterioro y su nivel de severidad, pues existen daños que pueden repetirse constantemente en toda la vía pero que no son tan severos como para hacer fallar la estructura del pavimento (daños a nivel de capa asfáltica), como aquellos que intervienen en las capas sub-yacentes (base, sub-base, sub-rasante), evolucionando hasta hacer fallar la estructura del pavimento.

ACAJUTLA - LA LIBERDAD		SAN MARCOS - ZACATECOLUCA/ 8 años.		COMALAPA - ZACATECOLUCA		USULUTÁN-EL DELIRIO		EL DELIRIO-LA UNIÓN		Total (%)
daños	%	daños	%	daños	%	daños	%	daños	%	
Piel de cocodrilo	13.4	Piel de cocodrilo	4.5	Piel de cocodrilo	3.6	Piel de cocodrilo	1.82	Piel de cocodrilo	11.4	34.72
Grieta en bloque	4.4							Grieta en bloque	15.7	20.09
		abultam. Y hundim.	0.06	abultam. Y hundim.	0.2					0.22
Depresión	1.3	Depresión	0.4	Depresión	1.5					3.16
Grieta de borde	0.4	Grieta de borde	0.42					Grieta de borde	0.2	1.02
				Grieta de reflex. De J.	0.1					0.11
Grieta Long. Y transver.	1.8	Grieta Long. Y transver.	0.2	Grieta Long. Y transver.	0.3	Grieta Long. Y transver.	0.2	Grieta Long. Y transver.	1.8	4.23
		Parches	1.3	Parches	6.9					8.2
Baches	0.0	Baches	0.234	Baches	0.0					0.234

Ahuella m.	6.5	Ahuella m.	3.4	Ahuellam.	3.5	Ahuella m.	2.2	Ahuellam.	1.0	16.59
						Cruce de línea ferrea	0.18			0.18
								Exudación	0.1	0.1
								Pulimiento de agregado	2.5	2.50
Meteroriza.	5.3							Meteroriza.	14.7	20.01
Total (%)										

Tabla 4.20 Análisis comparativo entre carreteras.

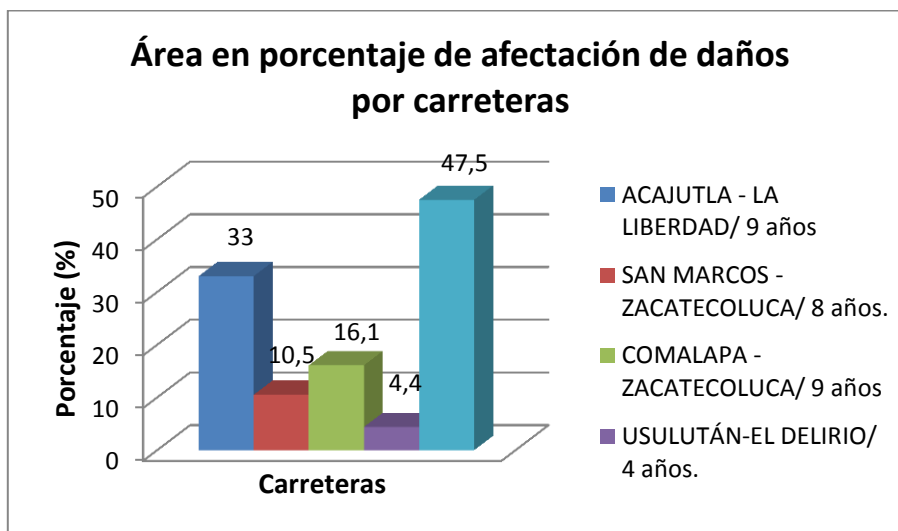


Gráfico 4.23 Comparación de total de daños entre carreteras.

La gráfica 4.20 representa las áreas en porcentaje por cada carretera, mostrando así que la más afectada es El Delirio- La Unión, con un 47.5% de su longitud analizada en las 16 unidades de muestra.

Los daños cuantificados para esta investigación se presentan en el grafico 4.21, en metros cuadrados, sumado de las unidades de muestra de las cinco carreteras seleccionadas; existiendo un total de 14 deterioros, y donde los que más predominan de acuerdo a su área registrada son los de tipo estructural (estos: piel de cocodrilo, grietas en bloque, ahuellamiento, parches, grietas longitudinales y transversales, depresión, grietas de borde, baches, abultamientos y hundimientos, cruce de línea férrea, grietas de reflexión de tránsito y en algunos casos la probabilidad de reflexión de grietas desde la base reciclada estabilizada con cemento.

También considerando los daños superficiales existentes (estos son: meteorización o desprendimientos de agregados, pulimientos de agregados, exudación), debido a problemas de mezcla asfáltica y el clima.

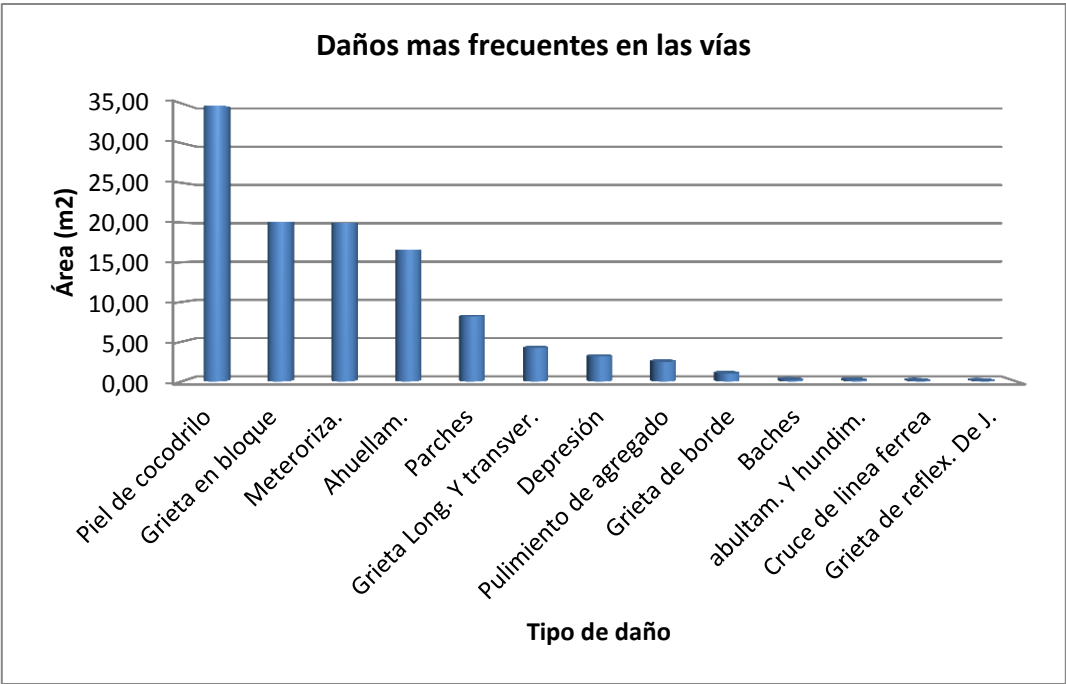


Gráfico 4.24 Área daños en que afectan las carreteras seleccionadas en m².

El comportamiento funcional de estas carreteras evaluadas en esta investigación, se pueden considerar de buen nivel funcional, ya que dichas carreteras con primarias y por lo tanto consideradas de alto Transito Promedio Diario Anual (TPDA).

En el análisis de las condiciones estructurales se considera que estas poseen una condición estructural aceptable, aunque es necesario mencionar la variabilidad de los datos encontrados que puede ser producto de una distribución no uniforme de conglomerante (cemento) en la mezcla o también puede deberse a la falta de un diseño de mezcla que permita obtener la resistencia bajo la cual se pretende que deba trabajar el pavimento.

La técnica de pavimento flexible reciclada con cemento, provee seguridad estructural y funcional para el pavimento siempre y cuando exista un buen control de la calidad en el proceso constructivo.

CAPITULO V OBTENCIÓN DE DATOS

5.1 DESCRIPCIÓN DEL TRAMO COMALAPA-ZACATECOLUCA

Rehabilitación y Parámetros de Diseño para la carretera Comalapa-Zacatecoluca (CA02E)

Se procedió a diseñar la rehabilitación como se presenta en las tablas a continuación para un período de 10 años.

Para la determinación de los espesores del refuerzo estructural del pavimento existente, se calcularon los espesores obtenidos por falta estructural según mediciones de deflexión con el FWD y se verifican dichos espesores bajo el criterio de fatiga.

Los factores daño que se emplearon se calcularon mediante la metodología de la AASHTO, partiendo de las cargas máximas legales vigentes en EL Salvador, y adoptando una serviciabilidad final de 2.5, para un valor de Numero Estructural (SN) de 3.

Por otro lado, cabe mencionar que el vehículo liviano presenta un marcado crecimiento, mientras que el tipo T3-S2 presenta un leve crecimiento.

Rehabilitación para 10 años (2002 y 2011)

A continuación se presenta las tablas que muestran los espesores definitivos para la rehabilitación de la Vía en estudio para un periodo de 10 años, con un Nivel de Servicio Final de 2.5.

Se utilizó un sistema de control de calidad durante el proceso de construcción, para asegurarse que se logre el SN proyectado.

Para esta carretera, se presenta el siguiente cuadro de rehabilitación: involucrando un reciclado y estabilizado con cemento de la capa asfáltica existente de 70mm junto a 80mm de material granular, para luego colocar un refuerzo en concreto asfáltico.

Seccion		Parametros							
km inicio	km final	Transito (Ejes Equiv. 8.2 ton)	Modulo Resiliente (kg/cm2)	SN Efectivo (FWD)	SN Requerido 10 años	Δ SN	Espesor de Concreto asfaltico por Δ SN(mm)	Espesor de base reciclada con cemento (mm)	Espesor de concreto asfaltico a colocar (mm)
39+000	42+000	4,65*10 ⁶	650	2,1	4,01	1,91	121	150	54
42+000	43+000		1200	2,1	3,18	1,08	69	150	1
43+000	44+000		500	1,9	4,41	2,51	159	200	69
44+000	45+000		800	1,75	3,71	1,96	124	150	57
45+000	47+000		1200	1,6	3,18	1,58	100	150	33
47+000	49+000		900	1,6	3,55	1,95	124	150	56
49+000	50+000		900	1,6	3,55	1,95	124	150	56
50+000	51+400		900	1,4	3,55	2,15	137	150	69
51+400	52+000		900	2	3,55	1,55	98	150	31
52+000	53+000		1200	1,7	3,18	1,48	94	150	26
53+000	54+000		1000	1,7	3,41	1,71	109	150	41
54+000	55+000		1000	1,6	3,41	1,81	115	150	47
55+000	58+200		1000	1,8	3,41	1,61	102	150	35
58+200	59+500		600	1,3	4,13	2,83	180	200	90
59+500	60+400		1000	2	3,41	1,41	90	150	22
60+400	65+100		800	1,4	3,71	2,31	147	200	57

Tabla No. 5.1 Análisis, Alternativa Propuesta

Nota 1: El Reciclado involucra la capa asfáltica existente, del orden de 70mm y 80mm del material granular, para obtener un total de 150mm de espesor de material reciclado con cemento

Nota 2: En algunos sectores se colocó 200mm de reciclado, involucrando de 120 a 150mm del material granular, con el fin de disminuir el espesor de concreto asfáltico

Sección		Parámetro	
km inicio	km final	Espesor de base reciclada con cemento (mm)	Espesor de concreto asfáltico a colocar (mm)
39+000	42+000	150	70
42+000	43+000		
43+000	44+000	200	70
44+000	45+000	150	70
45+000	47+000		
47+000	49+000		
49+000	50+000		70
50+000	51+400		
51+400	52+000		
52+000	53+000		
53+000	54+000	200	90
54+000	55+000		
55+000	58+200	150	10
58+200	59+500		
59+500	60+400		
60+400	65+100	200	10

Tabla No. 5.2 Recomendaciones, Alternativa Usada

Por otro lado, a continuación se exponen las siguientes consideraciones particulares para la construcción:

- 1) Las Especificaciones Técnicas que regirán los procesos constructivos fueron, LAS ESPECIFICACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES REGIONALES, DEL MANUAL CENTROAMERICANO (SIECA), MARZO 2001.
- 2) El Contratista dio prioridad a las labores de bacheo para evitar un mayor deterioro de la carpeta asfáltica.
- 3) La capa de base asfáltica fue colocada sobre la sección, según los espesores indicados, con un porcentaje mínimo de cemento asfáltico AC-20 del 3.5% y con una graduación Tipo B, Tabla 703-8.

**Table 703-8
Slurry Seal and Micro-Surfacing Aggregate
Gradation²⁶ and Application Rates**

Sieve Size	Percent by Mass Passing Designated Sieve (AASHTO T 27 & T 11)		
	Slurry Seal Type		
	I	II	III
9.5 mm	—	100	100
4.75 mm	100	90-100	70-90
2.36 mm	90-100	65-90	45-70
1.18 mm	65-90	45-70	28-50
600 µm	40-65	30-50	19-34
300 µm	25-42	18-30	12-25
150 µm	15-30	10-21	7-18
75 µm	10-20	5-15	5-15
Application rate ⁽²⁾ kg/m ²	3.3 - 5.5	5.5 - 8.2	8.2 or more

Tabla 5.3 703-8 Slurry Seal and Micro-Surfacing Aggregate Gradation and Application Rates²⁷

- 4) La capa de rodadura tiene un contenido mínimo de 4.5% y con una graduación Tipo D, Tabla 703-8 de las Especificaciones antes citadas.
- 5) Para la aprobación de las mezclas de concreto asfáltico, se tomó en cuenta los aspectos siguientes:
 - a) La relación entre la Estabilidad y el Flujo, (módulo de rigidez, expresado en psi), no debe ser mayor de 550,000 (para evitar rigideces que provoque agrietamientos prematuros) y no debe ser menos de 250,000 (para evitar deformaciones plásticas o ahuellamiento prematuros); también deberá prestarse especial atención a la no aceptación del cumplimiento independiente de especificaciones mínimas y máximas de la estabilidad y el flujo, ya que esto puede causar deterioro en el

²⁶ Statistical procedures do not apply.

²³ Based on the dry mass of the aggregate.

pavimento. Los parámetros límites para estabilidad serán entre 1000 y 3800 libras y para el flujo será entre 8 y 18.

- b) La relación de los finos y el asfalto de las mezclas de concreto asfáltico no deberá ser menos de 0.9 (para evitar el blinding) y no mayor de 1.2 (para evitar resequedad, oxidación y/o envejecimiento de la mezcla).

- c) El empleo de agregado fino natural, por su alto contenido de arcilla y/o limo produce mezclas rígidas con porcentajes mayores de asfalto, siendo además mezclas con mayor sensibilidad al agua. Por esta razón, el material fino para la mezcla asfáltica debe ser de trituración, evitándose con ello grandes porcentajes de asfalto, las mezclas deben tener un porcentaje óptimo de asfalto entre 4.5 y 5.5%

La alternativa adoptada, que involucra un reciclado con cemento de la capa asfáltica existente y parte del material granular, arroja resultados adecuados en comparación con otras alternativas evaluadas, dado que con el reciclado con cemento se mejora sustancialmente la capacidad estructural del pavimento existente y solo ameritaría 70mm de concreto asfáltico. Los resultados de esta alternativa se presentan en la tabla No. 13.

Para el diseño de la base reciclada y estabilizada con cemento, se recomienda que cumpla con una resistencia a la compresión inconfiada de 21kg/cm², y que con tal porcentaje de cemento se realice el ensayo de durabilidad (humedecimiento y secado) y que las pérdidas no superen el 7% en peso.

En la Actualidad

El proyecto lo conforma el tramo carretero de la ruta CA-02E, iniciando en la intersección de la ruta RN05, aproximadamente en el km 40.215 de la CA-02E, y finalizando en la rotonda de entrada de Zacatecoluca, incluyendo la rotonda en el km 64.300 de la CA-02E.

La longitud del proyecto de acuerdo al levantamiento topográfico de la vía es de 24.989 km, incluyendo la rotonda.

El tramo carretero del proyecto es una vía de dos carriles, uno por sentido de circulación, de 3.50 mts de ancho por carril. La topografía del terreno es de plana a ondulada, con alineamiento predominante recto, encontrándose alrededor de 10 curvas.



Figura 5.1 tramo Comalapa hacia Zacatecoluca que corresponde al tramo en estudio, que comprende del kilómetro 45 al kilómetro 47.5

La estructura de pavimento existente es de concreto asfáltico, conformada por una base estabilizada con cemento de aproximadamente veinte (20) cms de espesor, y una carpeta de rodaje de concreto asfáltico variando entre 8.5 y 9 cms de espesor. El mantenimiento periódico del tramo de carretera del presente proyecto, consiste en:


- ✓ La colocación de un micropavimento, definiéndose por micropavimento como "una mezcla compuesta por emulsión asfáltica modificada por polímeros, 100% agregados triturados, finos minerales, agua y otros aditivos, debidamente proporcionados y tendidos en una superficie apropiadamente preparada". El espesor del micropavimento es de 15 mm, de acuerdo a

especificaciones técnicas del proyecto, de granulometría tipo III. La temperatura del micropavimento es ambiente.

- ✓ Las zonas con presencia de daños que a criterio del contratista y aprobación de la supervisión, no fueron solventadas con la aplicación del micropavimento, si no por el contrario afectan el buen desempeño del micropavimento colado, fueron reparadas con la aplicación de una mezcla asfáltica para bacheo y base para bacheo.
- ✓ En el subtramo comprendido entre las estaciones 22+305 y 22+560, se realizó un perfilado de la carpeta asfáltica existente y la colocación de una nueva carpeta, también de concreto asfáltico.

5.1.1 INSPECCIÓN VISUAL

Como parte del estudio preliminar de la zona y del tramo en estudio de la carretera CA02-E, se decidió realizar un recorrido del tramo completo, para llevar a cabo una inspección visual de las posibles fallas que pudiesen ser sensibles e identificables a simple vista para lo cual se muestran algunas de las fotografías tomadas

No	Imagen	Localización	Tipos de Fallas Visibles	Comentarios
4.1		Inicio	Sin falla superficial aparente.	Se puede apreciar el inicio del pavimento flexible reciclado.
4.2		Inicio	El pavimento presenta Leve Agrietamiento	Por ser tramo inicial aún se puede observar la transposición del pavimento




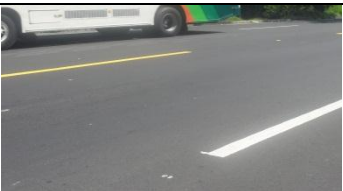


4.3		Inicio	El pavimento presenta Leve Agrietamiento	El estado del pavimento es consistente y cómodo para el conductor.
4.4		Inicio	El pavimento presenta Leve Agrietamiento	Grado alto de confort para el conductor.
4.5		Inicio	El pavimento presenta Leve Agrietamiento	Grado alto de confort para el conductor.
4.6		Intermedio	Sin falla superficial aparente.	Grado alto de confort para el conductor.
4.7		Intermedio	Sin falla superficial aparente.	El pavimento
4.8		Intermedio	Se puede observar ahuellamiento mínimo.	Se identifica la capa de micropavimento.

Tabla 5.4 inspección visual.

5.1.2 MICROPAVIMENTO

Esta carretera cuenta con una capa de micropavimento, definiéndose por micropavimento como "una mezcla compuesta por emulsión asfáltica modificada por polímeros, 100% agregados triturados, finos minerales, agua y otros aditivos, debidamente proporcionados y tendidos en una superficie apropiadamente preparada". El espesor del micropavimento es de 15 mm, de acuerdo a especificaciones técnicas del proyecto, de granulometría tipo III. La temperatura del micropavimento es ambiente.

Las zonas con presencia de daños que a criterio del contratista y aprobación de la supervisión, no fueron solventadas con la aplicación del micropavimento, si no por el contrario afectan el buen desempeño del micropavimento colado, fueron reparadas con la aplicación de una mezcla asfáltica para bacheo y base para bacheo.

En el subtramo comprendido entre las estaciones 22+305 y 22+560, se realizó un perfilado de la carpeta asfáltica existente y la colocación de una nueva carpeta, también de concreto asfáltico.

Fotografías del Proyecto



5.2 TRABAJO DE CAMPO CON PERFILÓMETRO LASER

Capacidad funcional del proyecto (IRI). Descripción del equipo.

El perfilómetro láser es un equipo de última generación que permite evaluar la condición de regularidad superficial de las carreteras, mediante un índice de estado estandarizado internacionalmente, denominado IRI (Internacional Roughness Index). La regularidad o rugosidad de una carretera se define como la suma de las irregularidades de la superficie por unidad una longitud, lo que es percibido por el usuario como el confort de marcha. Sin embargo, el aspecto más importante de la regularidad superficial es que se relaciona directamente con los costos del vehículo que circula por dicha carretera, dado que afecta su consumo de combustible y sus costos de mantenimiento (Figura 5.2).



Figura 5.2 Efecto de la regularidad superficial en el confort sentido por los usuarios de la ruta

La Figura 5.3 muestra el equipo empleado por el MOP (Ministerio de Obras Publicas) en la evaluación de proyectos, y que es conocido como perfilómetro láser. Dicho equipo consta de 5 sensores láser ubicados en la defensa delantera del vehículo, dos sobre cada huella de rodamiento y el quinto central. Estos sensores están conectados a un computador con GPS, el cual calcula en tiempo real el valor de IRI para segmentos de 100 metros de longitud, y los guarda en archivos de texto²⁸.

²⁸ El proceso de cálculo del Índice de Regularidad Internacional se basa en las Normas de ASTM-E 950 “Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference”, la cual abarca la medición y almacenamiento de datos de perfil medidos con base en una referencia inercial establecida por acelerómetros; y la Norma ASTM-E 1170 “Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces”, la cual abarca el cálculo de la respuesta vehicular a las regularidades superficiales de la carretera, utilizando un programa de simulación vehicular.

Cada uno de estos archivos debe ser procesado individualmente, para convertirlos en tablas de datos que necesita el SIG para crear los mapas y reportes finales de las mediciones para cada tramo de carretera evaluado.



Figura 5.3. Perfilómetro Láser

5.2.1 RESULTADOS OBTENIDOS

Se presenta informe relacionado con resultados de medición de Deflexiones y Regularidad Superficial, realizados en la estructura de pavimento de un tramo de la carretera Litoral (CA02E), Departamento de La Paz, específicamente en el tramo kilómetro 45 – 47 ½, en atención a instrucciones del señor Viceministro de Obras Públicas, arquitecto Hugo Alfredo Barrientos Clará, a través de la Hoja de Instrucciones referencia VMOP- 0283-12, de fecha 31 de enero de 2012, recibida en esta Unidad el 01 de febrero de 2012.

Lo anterior a raíz de nota sin número de referencia, de fecha 27 de enero de 2012, suscrita por la ingeniera Soraya Lissette Barrera de García, Jefa del Departamento de Ingeniería y Arquitectura y Coordinadora General de Procesos de Grado, de la Facultad Multidisciplinaria de Occidente de la Universidad de El Salvador; a través de la cual solicita hacer uso de los mediciones realizadas con deflectómetro de impacto y perfilómetro láser por parte de la UIDV-MOP, para analizar un tramo de 2.5 km de cinco (5) proyectos. Lo anterior, con el objeto de desarrollar el Trabajo de graduación "Análisis Comparativo Estructural y Funcional post- construcción de Pavimentos flexibles reciclados con cemento en El Salvador".

Cabe indicar, que en reunión sostenida con los estudiantes que desarrollarán el Trabajo de graduación, el 10 de febrero de 2012, se indicó que no era factible brindar el apoyo requerido de manera inmediata ni en los cinco (5) tramos solicitados; lo anterior, debido a que esta Unidad ya tenía programado la ejecución de evaluaciones de estructuras de pavimento utilizando los equipos deflectómetro de impacto y perfilómetro laser, por lo que se brindaría el apoyo posteriormente. En vista de lo anterior, se acordó que se proporcionaría información únicamente del tramo de carretera antes señalado, con base en información recopilada por esta Unidad, dentro del marco de evaluaciones técnicas realizadas en la carretera Litoral (CA02E).

Trabajo desarrollado.

Las mediciones de deflexiones y regularidad superficial, ejecutadas por esta Unidad, dentro del marco de evaluaciones técnicas realizadas en la carretera Litoral (CA02E), en fecha 12, 14 y 18 de septiembre de 2012.

Ejecución de Ensayos de Regularidad Superficial.

- a) La medición de la regularidad superficial del pavimento (Ahuellamiento e Índice de Regularidad Internacional (IRI)) se llevó a cabo el 18 de septiembre de 2012, en los dos carriles de circulación que conforman la vía en el tramo evaluado.

- b) La medición de la regularidad se realizó en el sentido del tráfico, utilizando un equipo Perfilómetro de Referencia Inercial (RSP) marca Dynatest. modelo 5051 Mark III, clasificado como clase 1 de acuerdo con ASTM E 950-98 Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference.
- c) La medición se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones indicadas en AASHTO PP-37 Standard Practice for Quantifying Roughness of Pavements y ASTM E 950 Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference.
- d) El valor de IRI fue calculado en tramos de 100 m (0.1 km) para ambas roderas (izquierda y derecha). El valor de IRI reportado para cada tramo evaluado en m/km, corresponde al promedio de los valores de IRI de las roderas izquierda y derecha; lo anterior es consistente con lo indicado en AASHTO PP-37 Standard Practice for Quantifying Roughness of Pavements.

5.2.1.1 RESULTADOS DE ENSAYOS CON PERFILÓMETRO LASSER

Los resultados de IRI y AHUELLAMIETO, registrados en el tramo evaluado, se presentan a continuación.

5.2.1.2 REGISTROS DE IRI

A continuación se presentan los resultados de la medición de la regularidad superficial de la capa de rodadura en el tramo en estudio, en términos del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Cabe señalar que el valor de IRI fue calculado en tramos de 100m.

Estacionamientos		Lateral Derecho			Lateral Izquierdo		
		Valores de IRI (m/km)			Valores de IRI (m/km)		
		Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas	Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas
45+000	45+100	2.23	1.58	1.91	2.42	2.28	2.35
45+100	45+200	2.03	1.65	1.84	2.24	2.21	2.23
45+200	45+300	2.21	2.07	2.14	2.88	2.40	2.64
45+300	45+400	1.70	2.03	1.87	1.59	1.65	1.62
45+400	45+500	1.78	1.46	1.62	1.63	1.59	1.61
45+500	45+600	2.18	1.71	1.95	2.43	2.03	2.23
45+600	45+700	2.30	1.39	1.85	2.59	2.51	2.55
45+700	45+800	1.99	1.63	1.81	2.53	2.02	2.28
45+800	45+900	2.23	2.14	2.19	2.67	2.32	2.50
45+900	46+000	2.38	1.82	2.10	3.27	2.78	3.03
46+000	46+100	2.40	1.95	2.18	2.96	2.16	2.56
46+100	46+200	2.15	2.23	2.19	1.87	1.51	1.69
46+200	46+300	2.55	2.52	2.54	2.54	2.14	2.34
46+300	46+400	2.03	2.70	2.37	1.78	2.00	1.89
46+400	46+500	2.43	2.36	2.40	1.96	2.34	2.15
46+500	46+600	1.60	1.71	1.66	1.56	1.89	1.73
46+600	46+700	2.01	1.76	1.89	2.01	2.91	2.46
46+700	46+800	1.53	1.28	1.41	1.85	2.10	1.98
46+800	46+900	1.82	1.64	1.73	2.17	2.89	2.53
46+900	47+000	2.84	2.59	2.72	1.55	1.65	1.60
47+000	47+100	2.41	1.57	1.99	2.05	2.71	2.38
47+100	47+200	1.95	1.63	1.79	1.71	2.58	2.15
47+200	47+300	2.02	1.93	1.98	1.60	1.78	1.69
47+300	47+400	1.71	1.77	1.74	2.17	1.80	1.99
47+400	47+500	1.50	1.17	1.34	2.20	2.03	2.12

Tabla 5.5, valores de IRI obtenidos mediante el uso del perfilómetro inercial lasser

Observación: Las mediciones de regularidad superficial se ejecutaron en condiciones climáticas secas.

5.2.1.3 REGISTROS DE AHUELLAMIENTO

A continuación se presentan los resultados de la medición de ahuellamiento, registrados en la zona de las roderas de la capa de rodadura del tramo en estudio. Cabe señalar que el valor de ahuellamiento fue calculado en tramos de 100m.

Estacionamientos		Lateral Derecho			Lateral Izquierdo		
		Valores de Ahuellamiento (mm)			Valores de Ahuellamiento (mm)		
		Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas	Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas
45+000	45+100	1.20	0.20	0.70	2.60	0.60	1.60
45+100	45+200	0.30	0.00	0.15	3.00	0.40	1.70
45+200	45+300	1.30	1.10	1.20	2.40	0.50	1.45
45+300	45+400	0.80	0.30	0.55	0.90	0.40	0.65
45+400	45+500	0.10	0.00	0.05	1.00	0.20	0.60
45+500	45+600	0.80	0.20	0.50	2.20	0.00	1.10
45+600	45+700	0.00	0.00	0.00	1.00	0.50	0.75
45+700	45+800	0.00	0.00	0.00	1.30	0.40	0.85
45+800	45+900	0.50	0.60	0.55	0.00	0.00	0.00
45+900	46+000	2.60	0.50	1.55	0.20	0.20	0.20
46+000	46+100	1.50	0.40	0.95	2.00	0.20	1.10
46+100	46+200	1.20	0.50	0.85	2.40	0.90	1.65
46+200	46+300	0.40	1.90	1.15	2.30	0.00	1.15
46+300	46+400	0.90	1.10	1.00	1.10	0.00	0.55
46+400	46+500	0.70	0.00	0.35	1.30	1.00	1.15
46+500	46+600	1.40	0.30	0.85	1.40	0.20	0.80
46+600	46+700	2.90	1.00	1.95	2.60	3.00	2.80
46+700	46+800	1.50	1.30	1.40	1.60	1.50	1.55
46+800	46+900	1.70	2.30	2.00	1.90	0.90	1.40
46+900	47+000	1.30	1.60	1.45	2.00	1.80	1.90
47+000	47+100	2.10	2.90	2.50	1.70	1.80	1.75
47+100	47+200	1.70	1.10	1.40	1.50	0.30	0.90
47+200	47+300	0.40	0.40	0.40	0.70	0.30	0.50
47+300	47+400	4.80	0.30	2.55	1.60	0.90	1.25
47+400	47+500	1.00	0.00	0.50	1.40	0.50	0.95

Tabla 5.6 datos de ahuellamiento obtenidos mediante el uso del perfilómetro inercial laser.

5.3 TRABAJO DE CAMPO CON DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD)

Con la finalidad de determinar la capacidad estructural de los pavimentos, una de las tecnologías que se utiliza más ampliamente en varios países está basada en ensayos no destructivos, NDT, (Non Destructive Test), y el equipo con mayor aceptación es el Falling Weight Deflectometer (FWD), el cual al aplicar un golpe registra la información de la respuesta de la estructura, y la configuración del pavimento.

A pesar de la sofisticación de sus componentes, el FWD requiere ser calibrado adecuadamente; de no ser así, los valores obtenidos pueden ser imprecisos y conducir a soluciones inadecuadas; las cuales resultarían más costosas de lo que se calcularía en realidad, o serían insuficientes para las condiciones estructurales y de uso del pavimento de que se trate.

Es muy importante que las deflexiones medidas sean lo suficientemente precisas para realizar estimaciones correctas de las características estructurales de los pavimentos a partir de datos del FWD. Por tal razón, es indispensable la calibración de cualquier equipo FWD que intervenga en proyectos de rehabilitación de carreteras.

Este método de ensayo cubre la determinación de deflexiones de la superficie del pavimento, como resultado de la aplicación de una carga de impulso a la superficie del pavimento. Las deflexiones resultantes se miden en el centro de la carga aplicada a diferentes distancias y lejos de la carga. Las deflexiones pueden ser ya sea directamente correlacionada con el rendimiento del pavimento o se utiliza para determinar las características del material in-situ de las capas del pavimento. Algunos usos de los datos incluyen la evaluación estructural de capacidad de carga y la determinación de los requisitos de espesor de recubrimiento para pavimentos de carreteras y aeródromos.

Equipo.

La instrumentación del sistema, debe cumplir con los siguientes requisitos generales:

- Los instrumentos expuestos a los elementos (fuera del vehículo), se podrán accionar en el rango de temperatura de -10 a 50 ° C (10 a 120 ° F) y se tolera la humedad relativamente alta, la lluvia o rocío, y todas las reacciones adversas otras condiciones tales como polvo, los golpes o vibraciones que normalmente se pueden encontrar.
- Los instrumentos no expuestos a los elementos (dentro del vehículo), se podrán accionar en el rango de temperatura de 5 a 40 ° C (40 a 105 ° F).

Dispositivo Generador de Fuerza (Falling “Weight”) con un sistema guía. El dispositivo generador de fuerza será capaz de ser elevado a una o más alturas predeterminadas y caer.

La fuerza resultante de los impulsos transmitidos al pavimento deberá ser reproducible, definido previamente en la calibración. La fuerza del impulso se aproxime a la forma de un Haversine o una onda de medio seno, y una fuerza máxima de aproximadamente 50 kN (11 000 lb) alcanzable.



Figura 5.4 Equipo de deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer)

La Guía del sistema, ha sido diseñada para funcionar con la fricción o resistencia despreciable y diseñada de modo que el peso caiga perpendicular a la superficie del pavimento.

Carga de la placa, debe ser capaz de proveer una distribución aproximada y uniforme de la carga sobre la superficie del pavimento. Los Platos típicos de carga son 300 y 450 mm (12 y 18 pulgadas) de diámetro para las mediciones en las carreteras convencionales y pistas de aterrizaje o similares en pavimentos rígidos²⁹.

La placa debe ser adecuadamente construida para permitir mediciones de deflexión en el centro de la placa en pavimentos.

²⁹ Es una práctica común utilizar una duración de fuerza-impulso de 20 a 60 ms o un tiempo de subida de 10 a 30 ms.

En el Procesamiento de datos, en el sistema de almacenamiento de carga y en los datos de desviación se hará constar en una o ambas de un dispositivo de almacenamiento magnético o una grabadora de cinta de papel. La información de apoyo, tal como la temperatura del aire, la temperatura de la superficie del pavimento, las mediciones de distancia, y los datos de identificación para cada punto de prueba se puede grabar de forma automática o manualmente.

Calibración.

Dispositivo Generador de Fuerza. Antes de la carga y la calibración del sensor de deflexión, de pre-condición del dispositivo se debe dejar caer el peso por lo menos cinco veces y comprobar la diferencia relativa de cada carga. Las Cargas no deben variar en más del 3% en sus respectivos valores. Si las variaciones superan esta tolerancia, la altura de la caída, la limpieza de la vía, así como cualquier resorte o almohadillas de caucho que se utilizan para acondicionar la carga deben ser revisados.

Y las Partes que operan indebidamente deberán ser sustituidas o reparadas antes de la calibración para asegurar que las fuerzas horizontales se reduzcan al mínimo.

Calibración de la carga de la Plataforma: Siga las recomendaciones del fabricante para la calibración desde varios tipos de estos dispositivos están disponibles comercialmente.

Calibrar los sensores de deflexión sensores por lo menos una vez al mes o de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

Calibración de la desviación relativa El procedimiento de calibración de la desviación relativa se utiliza para ajustar las mediciones de la deformación de cada sensor de deflexión para que se produzca la medición de la misma desviación.

La calibración de la desviación relativa requiere una torre que sostenga el sensor, esta torre puede ser provista por el fabricante del equipo. La torre debe tener suficientes posiciones de sensores para dar lugar a todos los sensores que se usan durante la prueba. Además se le deberán colocar los sensores uno encima del otro a lo largo de un eje vertical. La base de la torre deberá contar con un poste de soporte único en el mismo eje vertical. La torre debe poseer una rigidez suficiente como para permitir que cada sensor experimente la misma desviación generada por el dispositivo generador de fuerza. Se deberán Montar los sensores en la torre y lo más cerca posible de la placa de carga como sea posible. La posición de la torre se puede solucionar haciendo un pequeño agujero en el pavimento o por cementación de una arandela en el pavimento para proporcionar un punto de contacto sólido para el poste de soporte. La placa de carga debe estar en continuo contacto con la superficie del pavimento, mientras que la recolección de datos en la calibración. Durante la calibración, gire los sensores de forma que cada sensor ocupe todos los niveles de la torre. En cada posición de la torre, grabar cinco deflexiones para cada sensor. La torre se mantiene manualmente en una posición vertical con una presión moderada a la baja mientras que la medición de las deflexiones. Magnitudes de desviación aproximada de 400 micras (15 milésimas de pulgada) de los deseados.

El mismo ajuste se mantiene para la carga a lo largo de la calibración. Se debe Determinar los coeficientes de deflexión para cada sensor dividiendo la media de todos los sensores por el promedio de ese sensor. Si cualquiera de las proporciones resultantes es mayor que 1,003 o menos de 0,997, todos los factores de calibración del sensor se sustituyen por el factor de calibración existente multiplicada por la relación. Si alguno de los factores de calibración exceden los límites establecidos por el fabricante, el dispositivo debe ser reparado y recalibrado de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. Para asegurar que las pequeñas desviaciones (que se encuentra típicamente cerca del borde exterior de la cuenca de desviación) se controlan a un grado razonable de exactitud, repita el procedimiento anterior a una distancia de 1 a 1,5 m (3 a 5 pies) desde la placa de carga. Las magnitudes de desviación de entre 50

μm y $100 \mu\text{m}$ (2 a 4 milésimas de pulgada) son las deseadas. Asegúrese de que la diferencia promedio entre las dos lecturas de los sensores es de $2 \mu\text{m}$ (0,08 milésimas de pulgada) o menos, los factores de calibración del sensor no deben ser alterados. Si las diferencias en la desviación media es superior a $2 \mu\text{m}$ (0,08 milésimas de pulgada) se encuentra, que el dispositivo debe ser reparado y recalibrado de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

Uno de ellos es el procedimiento de calibración de referencia desarrollado por el Programa de Investigación Estratégica Carretera (SHRP), actualmente bajo la dirección del rendimiento a largo plazo de Pavimentos (LTPP) Oficina de la Administración Federal de Carreteras (FHWA). Para el propósito de utilizar este método de referencia para calibrar los Defléctometro de Impacto han sido utilizadas en el estudio LTPP, en cuatro centros regionales de calibración se han establecido, una en cada región LTPP³⁰.

Estos centros se encuentran en Pennsylvania, Minnesota, Texas y Nevada, operado por sus respectivos Departamentos de Estado de Transporte.

Otro método es un sistema de verificación de la calibración transportable, desarrollado en la Universidad del paso Texas (UTEP) para el Departamento de Transporte de Texas.

Estos también utilizan células independientes de carga y sensores de desviación para medir la carga y deflexiones creadas por un dispositivo de caída de tipo peso. Tanto SRHP y el método UTEP pueden utilizar el, mismo punto en la superficie del pavimento para calibrarlas lecturas de la deflexión mediante la eliminación del “sensor bajo prueba” de su soporte y colocar un soporte de referencia, mientras que el método de UTEP también puede conservar el uso de soporte de sensores proporcionado por el fabricante, con el sensor de deformación de verificación (s) colocados lo más cerca posible al sensor bajo prueba.

³⁰ Varios son los métodos que han sido desarrollados por distintos fabricantes para calibrar la caída del tipo de peso y para los dispositivos de carga de impulso que utilizan células independientes de carga y sensores de deformación

Estos dos métodos de calibración son más complementarios que intercambiables, con el método estacionario utilizado para hacer los ajustes de 2% o menos a las ganancias de desviación del sensor y el método de UTEP portátil utilizado como una verificación de la combinación de deflexión soporte del sensor/sensor tal como se utiliza en el campo, bajo condiciones reales de campo.

Acondicionamiento de la Señal y el Sistema de guardado.

Todos los de acondicionamiento de señal y del aparato de control permitirá la lectura de datos de resolución para cumplir con los siguientes requisitos:

Las mediciones de carga se muestran y almacenan con una resolución de 200 N (50lb) o menos.

Las mediciones de deformación se muestran y almacenan con una resolución de 61 micras (0,04 milésimas de pulgada) o menos.

Las mediciones de carga y la deflexión se registran, respectivamente, dentro de un período de tiempo o ventana de medida de al menos 60 ms, con una precisión en el momento de carga máxima y la deflexión de + o - 2% y una precisión de + o - 2 μ m (0,08 milésimas de pulgada).

Procedimiento.

El transporte del equipo a la ubicación de la prueba y la posición de la placa de carga sobre el punto de ensayo. El lugar de la prueba será de lo más limpio posible de rocas y escombros para asegurarse de que la placa de carga deba estar correctamente sentada. Las Superficies con grava o tierra será tan suave como sea posible y todo el material suelto removido. (ASTM D 4695).

Bajar la placa de carga y los sensores para asegurarse de que reposen en una superficie firme y estable.

Levantar el generador de fuerza a la altura deseada y suelte el "peso". Registre las deflexiones máximas resultantes de la superficie y la carga pico³¹.

Se deben realizar al menos dos secuencias de carga y comparar los resultados. Si la diferencia es mayor que 3% para cualquier sensor, tenga en cuenta la variabilidad en el informe. Los exámenes adicionales pueden hacerse funcionar a las mismas cargas o diferentes.

Precisión y Exactitud.

Precisiones: En este momento, no hay precisión de una serie de pruebas estadísticamente diseñadas con diferentes dispositivos. Los resultados del ensayo del mismo dispositivo o desde diferentes dispositivos pueden variar debido a variaciones en la rigidez tampón o rigidez del pavimento. Cada dispositivo, sin embargo, debe ser capaz de satisfacer los requisitos de precisión y los requisitos de calibración establecidos por el fabricante y SHRP.

Exactitud: Ninguna declaración se está haciendo en cuanto a la tendencia de este Método de ensayo en el momento actual.

5.3.1 RESULTADOS OBTENIDOS

Ejecución de Ensayos de Deflectometría.

- a) Los ensayos de deflectometría en la estructura de pavimento fueron realizados en el sentido del tráfico, aproximadamente en la zona donde se ubica la rodera externa, con una separación aproximada de 200 m en cada carril.

³¹ Si la deformación permanente y significativa en la placa de carga se produce, mueva el aparato y reduzca la fuerza aplicada hasta que la deformación permanente no sea de importancia a la primera prueba en un lugar de prueba.

- b) La medición de las deflexiones fue realizada con base en las recomendaciones indicadas en la ASTM D 4694 Standard Test Method for Deflections with a Falling Weight Type Impulse Load Device, en el Manual for FWD Testing in the Long Term Pavement Performance Program (SHRP-P-661) y en la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento, AASHTO, edición 1993.
- c) El equipo utilizado para la ejecución de los ensayos, consiste en un Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer (FWD)), marca Dynatest, modelo 8000, el cual posee nueve (9) sensores (geófonos) y un (1) plato de carga de 30 cm de diámetro. Los ensayos se realizaron aplicando una carga de 9000 lb.
- d) Debido a la naturaleza de los ensayos, las mediciones se realizaron en horas de la noche, en el período comprendido aproximadamente entre las 10:40 p.m. y las 11:15 p.m. del día 12 de septiembre de 2012 y entre las 12:00 a.m. y las 12:30 a.m. del día 14 de septiembre de 2012. Lo anterior con el objeto de cumplir el requerimiento de temperatura superficial del pavimento, la cual debe ser inferior a 50°C, que corresponde a la temperatura máxima permisible indicada por la AASHTO en la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento, edición 1993, para que se lleve a cabo el ajuste de las deflexiones registradas en cada punto, por el efecto de la temperatura en la mezcla asfáltica que conforma la capa de rodadura para este tipo de pavimento.

5.3.1.1 REGISTROS DE DEFLEXIONES

A continuación se presenta la información relacionada con los ensayos de deflectometría llevados a cabo en la estructura de pavimento. Cabe señalar que las deflexiones registradas, corresponden a la respuesta de la estructura de pavimento, ante la aplicación de una carga de impacto de aproximadamente 9,000 libras utilizando el equipo FWD.

Ubicación		Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Fuerza (Libras)	Deflexiones obtenidas (Milésimas de pulgadas)						
Est.	Lateral			d0	d30	d60	d90	d120	d150	d180
45+000	Izquierdo	27.7	9032	6.41	4.31	2.40	1.38	0.87	0.63	0.52
45+100	Derecho	27.7	9032	8.13	5.97	3.93	2.64	1.84	1.38	1.11
45+200	Izquierdo	28.2	8927	9.78	5.64	2.94	1.85	1.35	1.07	0.89
45+300	Derecho	27.6	8994	10.53	7.70	4.91	2.93	1.88	1.33	1.06
45+400	Izquierdo	28.2	8979	7.45	4.47	2.38	1.42	0.90	0.65	0.55
45+500	Derecho	27.6	9039	8.03	5.46	3.22	1.97	1.30	0.96	0.76
45+600	Izquierdo	28.2	9057	11.18	6.39	3.10	1.75	1.11	0.78	0.61
45+700	Derecho	27.3	8958	10.68	7.22	3.87	2.07	1.30	0.97	0.79
45+800	Izquierdo	27.9	8913	9.01	5.75	2.93	1.66	1.07	0.78	0.61
45+900	Derecho	27.6	9005	6.95	4.51	2.50	1.51	1.06	0.81	0.67
46+000	Izquierdo	27.6	9066	7.87	5.23	2.99	1.83	1.25	0.94	0.76
46+100	Derecho	27.9	8958	10.71	7.97	4.86	2.93	1.81	1.23	0.96
46+200	Izquierdo	28.0	8967	8.44	5.33	3.10	2.02	1.41	1.06	0.85
46+300	Derecho	27.2	8979	8.89	6.43	4.00	2.65	1.79	1.32	1.02
46+400	Izquierdo	27.6	8963	7.12	3.84	2.18	1.48	1.11	0.89	0.72
46+500	Derecho	27.5	8952	7.69	5.19	2.88	1.79	1.24	0.96	0.78
46+600	Izquierdo	27.6	9062	6.76	4.75	3.23	2.31	1.73	1.36	1.12
46+700	Derecho	28.2	8922	9.81	6.12	3.13	1.75	1.12	0.87	0.77
46+800	Izquierdo	27.5	8920	7.60	5.10	2.87	1.69	1.10	0.81	0.64
46+900	Derecho	27.3	8967	4.66	3.13	1.93	1.30	0.95	0.74	0.61
47+000	Izquierdo	28.8	8970	4.26	2.67	1.82	1.32	0.99	0.78	0.64
47+100	Derecho	26.8	8958	3.47	2.43	1.53	1.03	0.75	0.59	0.48
47+200	Izquierdo	29.3	9057	10.33	7.07	4.31	2.81	1.89	1.35	1.04
47+300	Derecho	27.3	8999	6.40	4.40	2.51	1.35	0.73	0.44	0.29
47+400	Izquierdo	29.4	8963	4.16	2.95	2.02	1.42	1.00	0.79	0.63
47+500	Derecho	30.9	9005	4.60	3.18	2.06	1.42	1.05	0.83	0.68

Tabla 5.7 deflexiones obtenidas mediante el uso del deflectómetro de impacto.

1 milésima de pulgada: 0.0254mm

1. Simbología:

d0: Deflexión registrada abajo del plato de carga.

d30: Deflexión registrada a 30 cm del plato de carga.

d60: Deflexión registrada a 60 cm del plato de carga.

d90: Deflexión registrada a 90 cm del plato de carga.

d120: Deflexión registrada a 120 cm del plato de carga.

d150: Deflexión registrada a 150 cm del plato de carga.

d180: Deflexión registrada a 180 cm del plato de carga.

Observaciones:

- En los puntos de ensayo, la temperatura de la superficie del pavimento osciló entre 26.8 °C y 30.9 °C.
- Los ensayos se ejecutaron en condiciones climáticas secas.

CAPITULO VI RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1 RESULTADOS DE LA PERFILOMETRÍA

Mediante la realización de la prueba con el Perfilómetro laser se registraron los datos correspondientes a la rugosidad cuyo parámetro que lo define es el (índice de rugosidad internacional por sus siglas “IRI”) las cuales se registraron por roderas en cada carril en el tramo a evaluar, además también el registro del ahuellamiento cuyo registro al igual que el de la rugosidad se realizó por roderas en cada carril del tramo en estudio.

6.2 INDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL (IRI)

Los valores registrados referentes a la rugosidad permitirán definir la condición funcional de la técnica de reciclado mediante la evaluación del tramo en estudio y la cual corresponderá al nivel de servicio que la carretera brinda a los usuarios de esta tanto en comodidad como en seguridad que se experimenta al utilizar esta vía ya sea en el sentido que va de Comalapa hacia Zacatecoluca y viceversa.

Además se conocerá los distintos sub-tramos pertenecientes a el tramo de estudio que posean diferencias en relación a la rugosidad por concernientes diferente nivel de funcionalidad tanto dentro del mismo carril en relación a la existencia de diferencia entre las roderas como entre los dos carriles que la carretera posee y por consiguiente conocer cuál de ellos ha tenido un mayor deterioro en su capacidad funcional. Mediante la utilización de la tabla 2.7 para realizar la debida evaluación funcional de cada valor registrado mediante la realización de la prueba.

IRI	Condición
0 - 1	Muy Buena
1 - 1.9	Buena
1.9 - 3.5	Regular
3.5 - 6.4	Mala
6.4 - 16	Muy Mala

En la tabla 6.1 se muestran los valores registrados por el perfilómetro laser en el en cada punto de evaluación en el tramo de estudio además de ello se presenta los valores promedios respectivamente de cada rodera que componen a cada carril presentándose el valor registrado de rugosidad para su posterior análisis.

Estacionamientos		Lateral Derecho			Lateral Izquierdo		
		Valores de IRI (m/km)			Valores de IRI (m/km)		
		Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas	Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas
45+000	45+100	2.23	1.58	1.91	2.42	2.28	2.35
45+100	45+200	2.03	1.65	1.84	2.24	2.21	2.23
45+200	45+300	2.21	2.07	2.14	2.88	2.4	2.64
45+300	45+400	1.7	2.03	1.87	1.59	1.65	1.62
45+400	45+500	1.78	1.46	1.62	1.63	1.59	1.61
45+500	45+600	2.18	1.71	1.95	2.43	2.03	2.23
45+600	45+700	2.3	1.39	1.85	2.59	2.51	2.55
45+700	45+800	1.99	1.63	1.81	2.53	2.02	2.28
45+800	45+900	2.23	2.14	2.19	2.67	2.32	2.5
45+900	46+000	2.38	1.82	2.1	3.27	2.78	3.03
46+000	46+100	2.4	1.95	2.18	2.96	2.16	2.56
46+100	46+200	2.15	2.23	2.19	1.87	1.51	1.69
46+200	46+300	2.55	2.52	2.54	2.54	2.14	2.34
46+300	46+400	2.03	2.7	2.37	1.78	2	1.89
46+400	46+500	2.43	2.36	2.4	1.96	2.34	2.15
46+500	46+600	1.6	1.71	1.66	1.56	1.89	1.73
46+600	46+700	2.01	1.76	1.89	2.01	2.91	2.46
46+700	46+800	1.53	1.28	1.41	1.85	2.1	1.98
46+800	46+900	1.82	1.64	1.73	2.17	2.89	2.53
46+900	47+000	2.84	2.59	2.72	1.55	1.65	1.6
47+000	47+100	2.41	1.57	1.99	2.05	2.71	2.38
47+100	47+200	1.95	1.63	1.79	1.71	2.58	2.15
47+200	47+300	2.02	1.93	1.98	1.6	1.78	1.69
47+300	47+400	1.71	1.77	1.74	2.17	1.8	1.99
47+400	47+500	1.5	1.17	1.34	2.2	2.03	2.12
Promedio		2.08	1.85	1.97	2.17	2.17	2.17
PROMEDIO DE IRI PARA EL PROYECTO							2.07

Tabla 6.1. Valor de IRI en cada estacionamiento.

6.2.1 ANÁLISIS DEL IRI CARRIL DERECHO

Carril derecho correspondiente al sentido que conduce de Comalapa hacia Zacatecoluca, el análisis se realizara por rodera que corresponde a la rodera externa e interna que para efectos de este trabajo se entiende por rodera izquierda (interna) y rodera derecha (externa) como se explica en la figura 3.1

Rodera Izquierda.

Los diferentes valores de rugosidad que se tienen a lo largo de dicha rodera poseen una pequeña variación que se muestra en la gráfico 6.1

En el siguiente grafico se resume el valor del IRI a lo largo del tramo en estudio

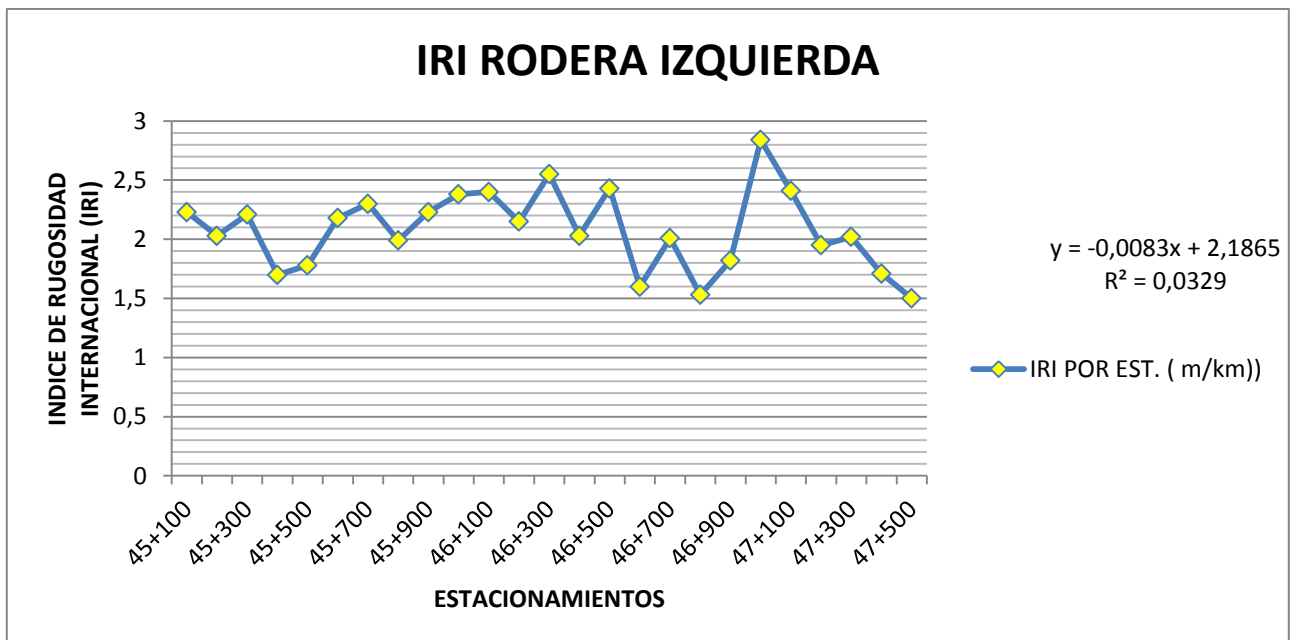


Gráfico 6.1 IRI para rodera derecha, lateral derecho.

La variación en cuanto a el valor de rugosidad presente en esta rodera en los diferentes puntos en que se evaluó demuestran que el punto con mayor valor equivalente a 2.84 pertenece a el estacionamiento 47 +000 el cual según la tabla 2.7 la clasifica como un valor regular en cuanto a la condición de la carretera regular significando que ha recibido cierto daño en dicho punto pero también como

valor mínimo posee 1.5 en el estacionamiento 47+500 clasificado como una condición buena perteneciente a pavimento nuevos*

La rodera izquierda posee un valor promedio de IRI = 2.08 m/km clasificado como regular más sin embargo posee un valor aceptado para pavimentos nuevos cumpliendo con un buen nivel de funcionalidad.

Rodera Derecha.

Lo valores registrados para esta rodera se expresan gráficamente en la figura 6.2 que se muestra a continuación.

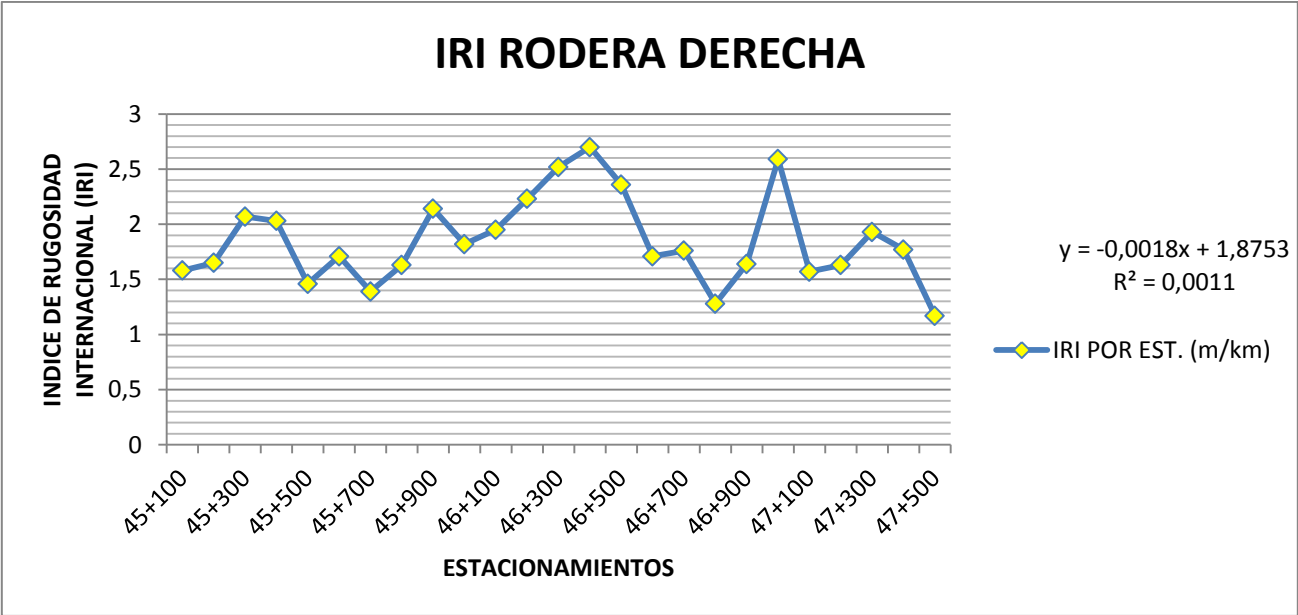


Gráfico 6.2 IRI rodera izquierda lateral derecho.

En esta rodera los valores máximos de IRI registrados son 2.7 para el estacionamiento 47 +000 el cual se clasifica como regular un pavimento que presenta algún daño en su calidad de servicio y 1.17 para el estacionamiento 47+500 siendo clasificado como bueno.

* Ver figura 2.20 la que define gráficamente el valor de IRI y lo relaciona a condiciones puntuales de pavimentos.

Por lo tanto esta rodera posee como valor promedio de IRI = 1.85 m/km siendo clasificado con un nivel de servicio bueno, un valor que teóricamente pertenece a pavimentos nuevos.

Carril Derecho

En la gráfica 6.3 se presenta los valores promedio perteneciente a el carril derecho en los cuales se registran los correspondientes valores de cada rodera y que se establece un valor general para la función de este carril.

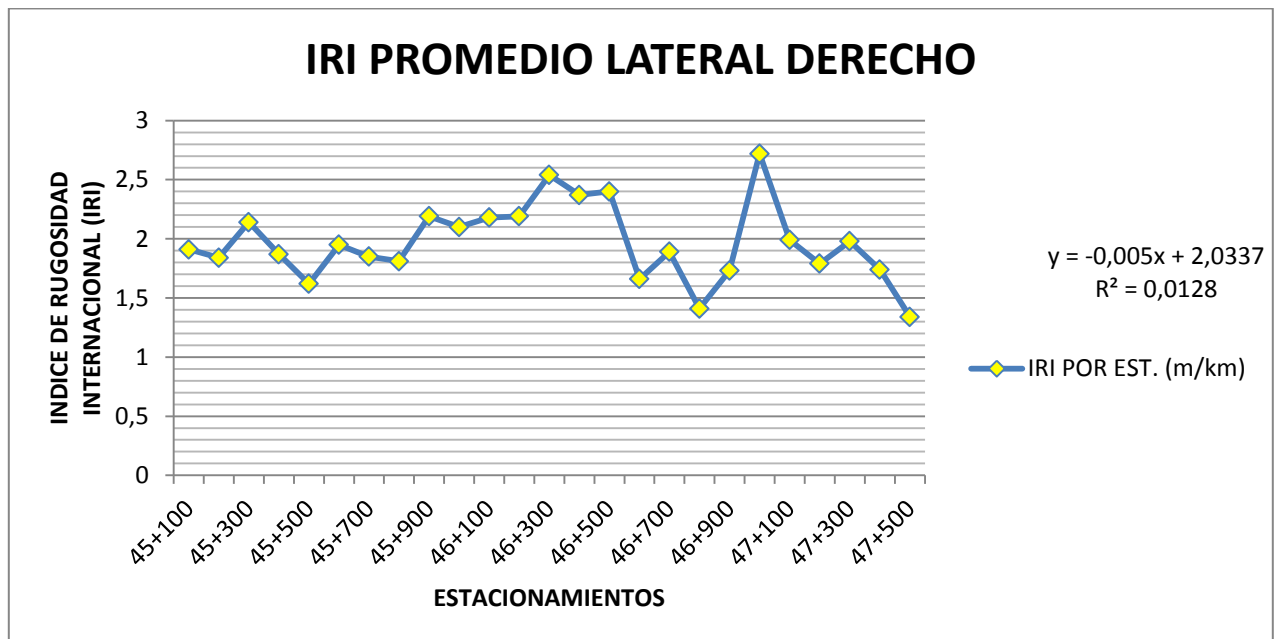


Gráfico 6.3 valor promedio IRI correspondiente al carril derecho que va de Comalapa a Zacatecoluca.

En este carril se ha identificado que los puntos con los valores más altos coinciden en el mismo estacionamiento 47 + 000 para ambas roderas lo que indica la presencia de un punto débil en la carretera en la cual se ha obtenido una disminución en la funcionalidad mar perceptible que en los otros puntos registrados.

Para todo el carril los valores límites son como máximo un valor de 2.72 en el estacionamiento 47 + 000 con una condición regular y como un valor mínimo 1.34

en el estacionamiento 47 + 500 y que es clasificado como bueno, la condición que se establece como valor promedio de todo carril corresponde a un IRI de **1.97 m/km** que se establece como **regular**, y que en base a la teoría se le puede acreditar a pavimentos que recientemente acaban de ser construidos.

Por lo tanto el carril que conduce de Comalapa a Zacatecoluca posee un nivel considerado bueno en el que se clasifican a las autopistas nuevas.

6.2.2 ANÁLISIS DEL IRI CARRIL IZQUIERDO

Este carril es el que conduce de Zacatecoluca hacia Comalapa y sus valores se resumen en los siguientes gráficos en el cual se plantean las condiciones funcionales de dicho carril mediante el análisis por separado de cada rodera y que plantean punto a punto la condición en diferente sector de un mismo punto analizado.

Rodera Izquierda

Rodera interna del carril y que sus valores de rugosidad se presentan en la tabla 6.4 para cada uno de los puntos en que este carril se evaluó.



Gráfico 6.4 IRI rodera derecha carril izquierdo.

El IRI correspondiente al mayor valor es 3.27 en el estacionamiento 46 +000 y cuyo valor se encuentra en el rango de clasificación considerado como regular para puntos en que se tiene algún daño en cuanto a la capacidad funcional que el pavimento esta brindado a cada usuario de la misma, y el valor mínimo IRI es igual a 1.55 en el estacionamiento 47 + 000 clasificado como bueno cuyo valor se asocia a pavimentos recién construidos. Esta rodera posee como valor promedio en toda su longitud un IRI correspondiente a **2.17 m/km** que de manera general se clasifica como regular

Rodera Derecha

Los valores que corresponde a este sector de análisis es la rodera derecha y se presenta gráficamente en la gráfica 6.5 en la cual se resume todo los valores a lo largo del tramo de análisis.

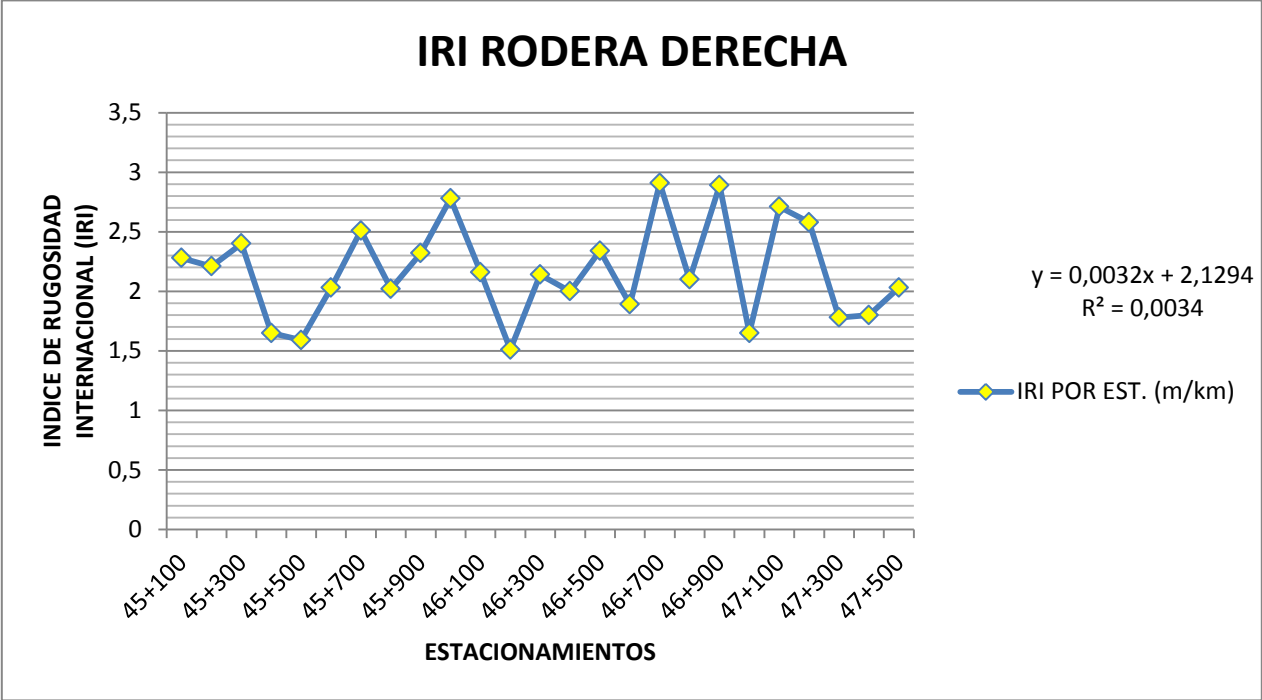


Gráfico 6.5. IRI rodera derecha carril izquierdo.

El valor máximo de IRI es 2.91 para el estacionamiento 46 +700 y que es catalogado como regular y el valor mínimo es 1.51 en el estacionamiento 46 +200 clasificado como bueno y correspondiente a pavimentos nuevos mientras que el

valor máximo hace referencias a que existe algún daño superficial que ha reducido la capacidad funcional y en este punto. Y que como valor total de IRI tiene **2.17 m/km** siendo igual al carril izquierdo clasificado como bueno directamente proporcional a un pavimento nuevo.

Carril Izquierdo

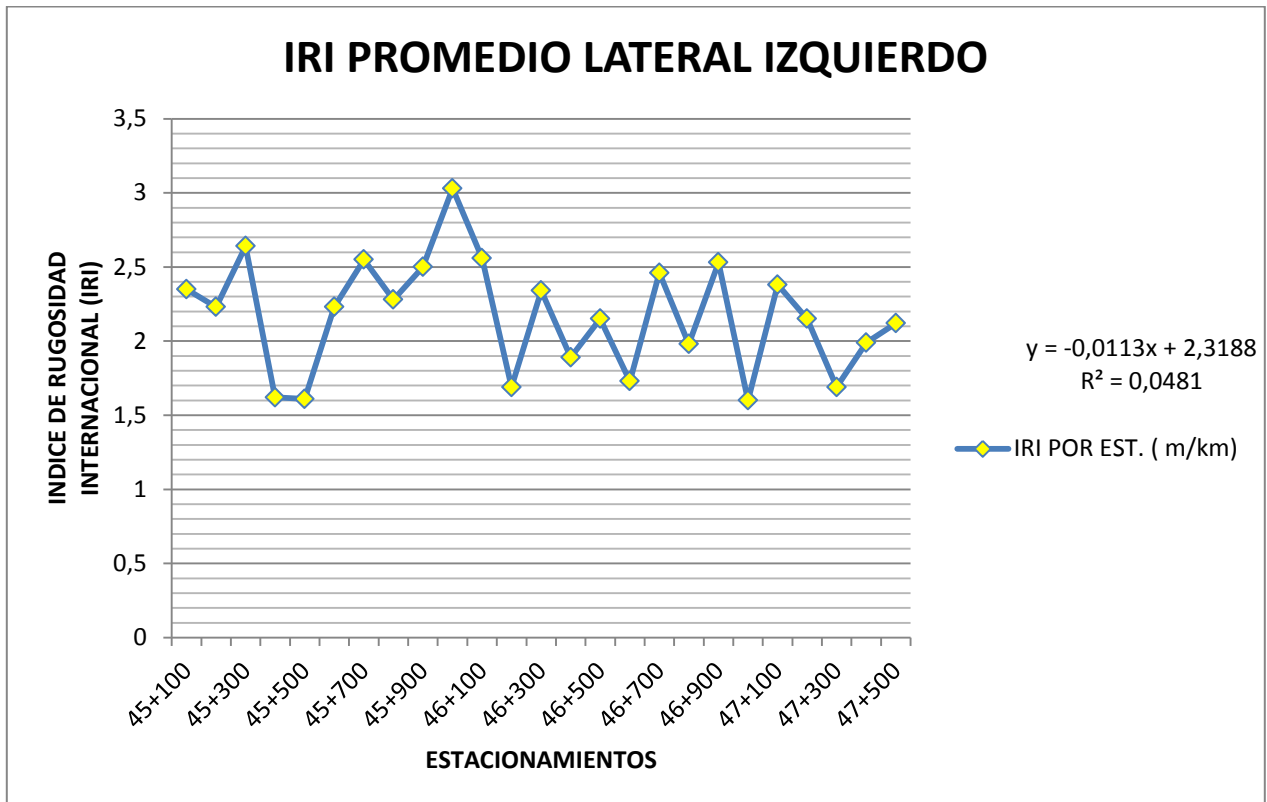


Gráfico 6.6 IRI carril izquierdo que conduce de Zacatecoluca a Comalapa.

Como resumen para este carril y teniendo considerados los valores de cada rodera en este gráfico se deduce que el valor máximo de IRI es 3.03 precisamente en el estacionamiento 46 + 000 y que se clasifica como regular mientras que el valor correspondiente al mínimo es igual a 1.6 en el estacionamiento 47 + 000 y que se clasifica en bueno.

El valor de IRI promedio correspondiente es igual a **2.17 m/km** al igual que cada una de las roderas que pertenecen a este carril y que la igual al carril derecho este sigue la misma clasificación considerada como buena y que hacen referencia a la condición que poseen aquellos pavimentos que se acaba de construir

considerados como pavimentos nuevos y que este carril hace alusión a poseer esa misma clasificación.

6.3 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE CARRILES

En el carril derecho se obtuvo un punto (47 +000) en común en cada rodera donde coincidió el mayor valor de IRI que corresponde a la peor clasificación siendo este el punto en el la condición de la carretera se determina como regular y que es característica de pavimentos con daños lo que lleva a establecer que en este punto existe algún daño no visible en la carretera que ha llevado a un aumento en el valor de rugosidad. Mientras que el carril izquierdo los puntos con mayor IRI no coincidieron más sin embargo este obtuvo valores más altos de IRI (3.27 y 2.91) lo que significa que ha tenido mayor desgaste pero que igualmente se localizan dentro del mismo rango de clasificación que el carril derecho.

Y en relación con los valores mínimos de IRI el carril derecho obtuvo valores más pequeños que el carril izquierdo, no obstante ambos valores se encuentran en el rango de clasificación considerado condición que es referenciada a pavimentos nuevos.

La diferencia entre ambos carriles más que en aspecto funcional radica en un valor cuantitativo debido a que el carril derecho tiene como valor promedio de IRI = 1.97 m/km mientras que el carril izquierdo posee un valor equivalente a = 2.17m/km obteniendo una diferencia de 0.2 m/km la cual no es suficiente como para tener una condición diferente dado que ambos comparten la condición regular.

En el grafico 6.7 se resume gráficamente los valores registrados de ambos carriles a lo largo de todo el tramo de investigación y en el cual se pueden ver las diferencias entre ellos.

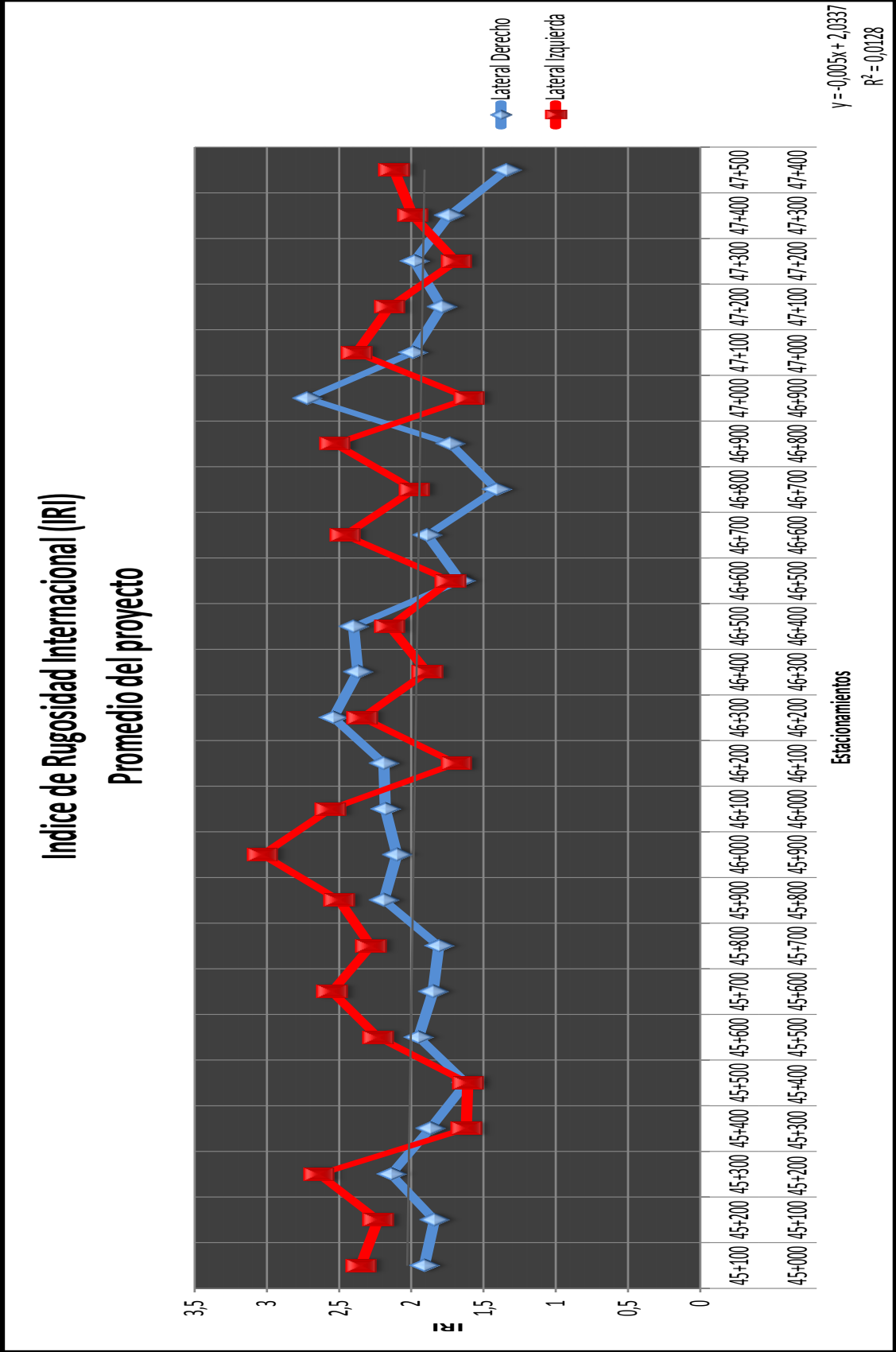


Gráfico 6.7 índice de Rugosidad Internacional comparativo entre carriles

6.4 ANÁLISIS DE LA CONDICIÓN FUNCIONAL DEL TRAMO COMALAPA – ZACATECOLUCA

Este proyecto fue reciclado en los años 2002 a 2003 luego a 8 años de ello, en el año 2011 se le aplicó una capa de micropavimento para proteger la capa de rodamiento que a su vez también mejoro la condición superficial del proyecto.

La evaluación funcional realizada mediante la utilización de equipo de última tecnología como lo es el perfilómetro inercial laser se realizó a aproximadamente 10 años de su reciclado. Y mediante el análisis a los valores registrados en cada carril se hace la valoración respectiva del proyecto completo resultando un valor de **IRI = 2.07** que mediante la tabla 2.7 se clasifica como regular la cual está en correspondencia con los valores obtenidos en los análisis respectivos de cada carril, a pesar de ser clasificada con una condición regular este valor mediante la interpretación que permite la figura 2.20 puede deducirse que debido a que está en el límite inferior del rango de valores clasificados como regular este valor es también correspondiente a valores asignados a pavimentos nuevos; es decir, a pavimentos recién construidos con lo que establece que la vía se encuentra prestando un buen servicio a los usuarios de la misma brindándoles seguridad y comodidad al transitar por ella, cualidades de una carretera con una buena capacidad funcional.

Según los resultados obtenidos el tramo en estudio representativo del proyecto obtiene un valor de IRI que permite clasificarlo como bueno, nivel considerado para pavimentos recién construidos y que cuyo valor esta por abajo del valor mínimo aceptado en el país para proyectos nuevos.

La capa de micropavimento permite proteger la capa de rodamiento y de alguna manera incide en el buen nivel resultante del proyecto, mas sin embargo no es una variable determinante para mejorar tanto el valor de rugosidad debido a que es una capa de un espesor pequeño es este caso de 15 mm la cual su función es brindarle una protección extra a la capa y a su vez mejorar el drenaje del proyecto

pero estructuralmente su aporte no es significativo razón por la cual pese a ser intervenida de esta manera no se traduce a una mejora tan sustancial.

6.5 AHUELLAMIENTO

Siendo el ahuellamiento un parámetro cualitativo del pavimento que puede tener efectos nocivos para la estructura y condición funcional de este y al encontrarse valores demasiados elevados, se hace necesario analizar los datos obtenidos mediante el levantamiento realizado con el perfilómetro laser, en relación con los valores de ahuellamiento detectados a lo largo de todo el tramo de análisis y que se presenta en la tabla 6.2.

En esta tabla se presentan los valores registrados por roderas en cada carril en estudio y que al igual que la rugosidad el ahuellamiento es un parámetro registrado mediante la utilización del perfilómetro laser con el que se obtiene mayor información acerca de estas variables que permiten el análisis funcional de proyectos viales.

Estacionamientos		Lateral Derecho			Lateral Izquierdo		
		Valores de Ahuellamiento (mm)			Valores de Ahuellamiento (mm)		
		Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas	Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Promedio de Roderas
45+000	45+100	1,2	0,2	0,7	2,6	0,6	1,6
45+100	45+200	0,3	0	0,15	3	0,4	1,7
45+200	45+300	1,3	1,1	1,2	2,4	0,5	1,45
45+300	45+400	0,8	0,3	0,55	0,9	0,4	0,65
45+400	45+500	0,1	0	0,05	1	0,2	0,6
45+500	45+600	0,8	0,2	0,5	2,2	0	1,1
45+600	45+700	0	0	0	1	0,5	0,75
45+700	45+800	0	0	0	1,3	0,4	0,85
45+800	45+900	0,5	0,6	0,55	0	0	0
45+900	46+000	2,6	0,5	1,55	0,2	0,2	0,2
46+000	46+100	1,5	0,4	0,95	2	0,2	1,1
46+100	46+200	1,2	0,5	0,85	2,4	0,9	1,65
46+200	46+300	0,4	1,9	1,15	2,3	0	1,15
46+300	46+400	0,9	1,1	1	1,1	0	0,55
46+400	46+500	0,7	0	0,35	1,3	1	1,15

46+500	46+600	1,4	0,3	0,85	1,4	0,2	0,8
46+600	46+700	2,9	1	1,95	2,6	3	2,8
46+700	46+800	1,5	1,3	1,4	1,6	1,5	1,55
46+800	46+900	1,7	2,3	2	1,9	0,9	1,4
46+900	47+000	1,3	1,6	1,45	2	1,8	1,9
47+000	47+100	2,1	2,9	2,5	1,7	1,8	1,75
47+100	47+200	1,7	1,1	1,4	1,5	0,3	0,9
47+200	47+300	0,4	0,4	0,4	0,7	0,3	0,5
47+300	47+400	4,8	0,3	2,55	1,6	0,9	1,25
47+400	47+500	1	0	0,5	1,4	0,5	0,95

Tabla 6.2 ahuellamiento

Los resultados obtenidos son expresados en mm, los valores a utilizar son los promedios de roderas de los laterales izquierdo y derecho, es decir de cada carril, del proyecto en análisis, de lo cual se puede extraer el siguiente gráfico:

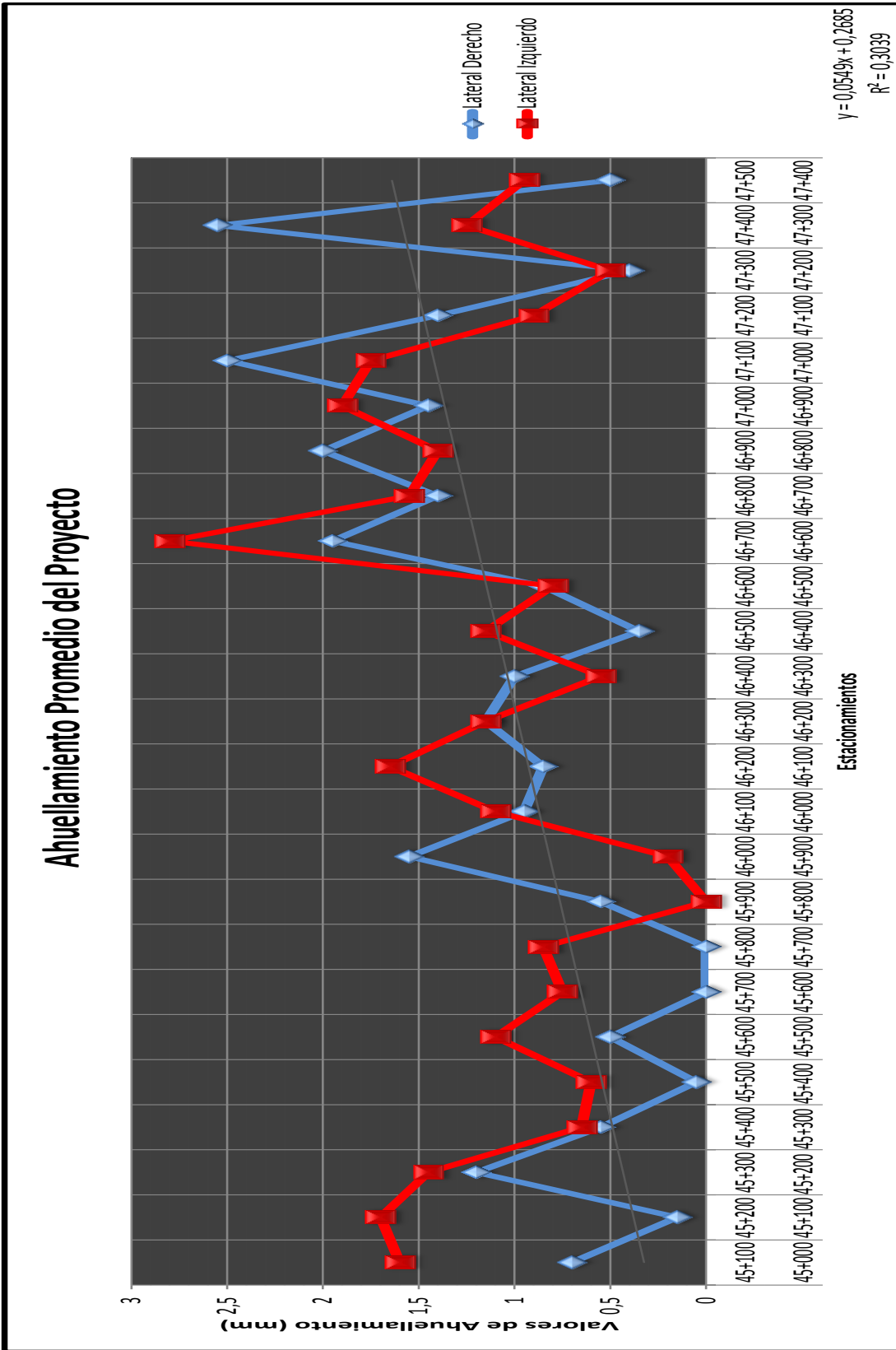


Gráfico 6.8 ahuellamiento comparativo entre carriles

Al analizar el grafico anterior se pueden destacar los valores máximos y mínimos registrados por carril los cuales son:

Para el carril izquierdo

Máximo: 3.0 mm

Mínimo: 0 mm, esto es debido a que no toda la carretera presenta ahuellamiento.

Mostrando un ahuellamiento máximo promedio de 1.132 mm esto da una idea de la condición superficial del pavimento del tramo carretero en estudio sin realizar ninguna otra prueba.

Para el carril derecho:

Máximo: 4.8 mm

Mínimo: 0 mm

El máximo promedio registrado es de 0.982 mm siendo este valor casi imperceptible al transitar sobre la huella.

Al comparar los resultados obtenidos por carril del proyecto, se obtiene que el carril que conduce desde Comalapa hasta Zacatecoluca presenta leves alzas en los valores de ahuellamiento mientras que en el carril izquierdo que es el que conduce desde Zacatecoluca hacia Comalapa presenta los valores más bajos, esto no sugiere que sean valores más significativos siendo las diferencias casi despreciables.

LEYENDA (SEGÚN MÉTODO PCI)	RANGO DE AHUELLAMIENTOS	CALIFICACIÓN
	Ah < 6mm	Ahuellamiento Leve
	6 < Ah < 12	Ahuellamiento Moderado
	12 < A < 25	Ahuellamiento Severo
	A > 25	Falla del Pavimento

Tabla³² 6.3 Calificación de carretera según su ahuellamiento.

Comparando los valores de ahuellamiento con la tabla 6.3 todos los valores están por debajo de los 6mm por lo cual es un ahuellamiento leve.

³² Fuente: Informe Inicial Camineros, octubre 2010

6.6 RESULTADOS DE LA DEFLECTOMETRÍA. DE IMPACTO

En este parámetro los valores que se registraron fueron únicamente la rodera externa de cada carril y que mediante el uso del deflectómetro de impacto se obtuvo una serie de datos que permiten realizar el análisis estructural a partir de las variables que se calcularán mediante el proceso denominado de retrocálculo por la Guía AASHTO 1993, que establece las pautas principales del análisis de cada una de estas variables.

Con el uso de este equipo se obtienen las deflexiones en los puntos de estudio y que mediante el análisis propuesto por la guía AASTHO se obtienen las variables (módulo resiliente, módulo efectivo del pavimento y el número estructural) que son las que permiten caracterizar la subrasante, conocer capacidad estructural y la condición actual del pavimento.

Con esta información se complementará la información presentada en el análisis funcional que depende de la condición estructural de cada uno de los componentes o elementos que integran la estructura de un pavimento.

En conjunción con esta información se presentará el estado actual del pavimento, lo que determinará si la técnica de reciclado con cemento realmente presenta un buen nivel de desempeño y que brinda así una alternativa viable no solo desde el punto de vista económico sino también técnico (funcional y estructural).

6.6.1 MÓDULO RESILIENTE

El cálculo del módulo resiliente está basado en las recomendaciones de la guía AASTHO 1993, la cual establece el procedimiento de su cálculo así como las condiciones que deben cumplir para ser aceptada la información para que esta sea representativa y exponga el verdadero estado estructural del proyecto evaluado en el tramo de análisis.

CALCULO DEL MODULO RESILIENTE. (MR)

Módulo Resiliente MR₃₀

Cálculo del valor correspondiente al lateral izquierdo estacionamiento 45 + 000 correspondiente al valor registrado por el geófono ubicado a 30 centímetros del punto a evaluar (plato de carga)

El procedimiento a seguir para el Cálculo del MR₃₀ es el descrito en el capítulo 3 ítem 3.2 respectivamente.

El procedimiento es el siguiente:

1. Calculo del MR con el valor obtenido correspondiente a las deflexiones registradas por el equipo y que en este caso son las medidas en el carril izquierdo estacionamiento 45 +000 en el geófono ubicado a 30 centímetros del punto de evaluación.

Ecuación A.1

$$MR = \frac{0.24P}{d_r * r}$$

Datos:

MR₃₀: ?

P: 9000 libras.

dr₃₀³³: 0.00431 pulgadas.

r³⁴: 30 cm = 11.81 pulgadas.

$$MR_{30} = \frac{0.24 * 9000}{0.00431 * 11.81}$$

$$MR_{30} = 42,435.23 \text{ PSI}$$

³³ Valor Extraído de tabla 5.3 correspondiente a los valores registrados por el deflectómetro de impacto.

³⁴ Esta variable debe cumplir con la condición de $r > 0.7ae$, según la guía AASTHO 1993.

2. Para que el valor del módulo resiliente sea un valor representativo este debe cumplir con la condición establecida en la guía AASTHO.

Comprobación de que el valor del módulo resiliente es representativo si cumple con la condición de $r \geq 0.7ae$

Cálculo de ae mediante la ecuación A.3

$$ae = \sqrt{a^2 + \left(D * \sqrt[3]{\frac{EP}{MR}} \right)^2}$$

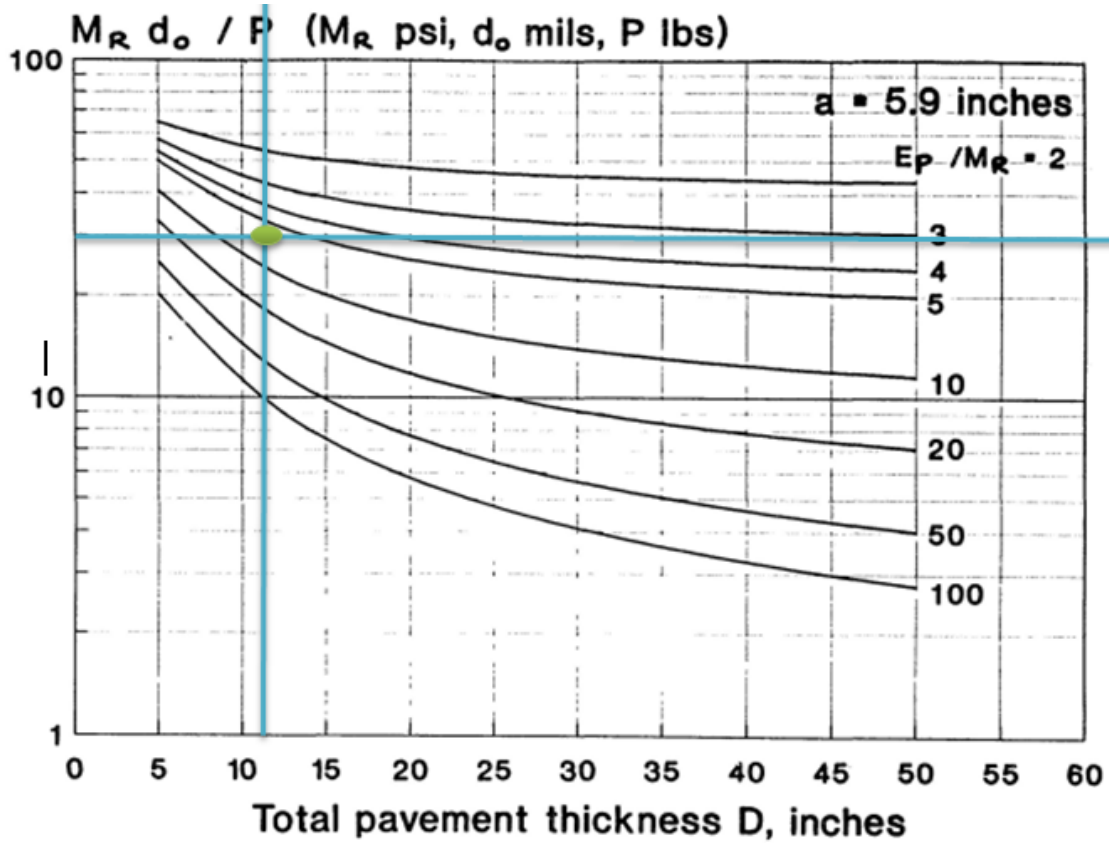
Para la utilización de la ecuación se necesita el parámetro EP/MR , el cual se obtiene gráficamente mediante la utilización de la figura 3.2, correspondiente para pruebas de deflectometría donde el plato posee 5.9 pulgadas de radio lo cual coincide perfectamente con el valor del plato de carga con los que se realizaron los ensayos. Para el cálculo de este valor los datos siguientes son necesarios para su cálculo.

Datos:

d_o : 0.00641 pulgadas

D : espesor del pavimento = 30.5 cm = 12 pulgadas.

$MR * d_o / P = (42435.23 * 6.41) / 9000 = \mathbf{30.22331541 = 30.0}$



El valor de $EP/MR = 7.0$

$$ae = \sqrt{a^2 + \left(D * \sqrt[3]{\frac{EP}{MR}} \right)^2}$$

$$ae = \sqrt{5.9^2 + (12 * \sqrt[3]{7})^2}$$

$$ae = 23.70 \text{ pulg.}$$

Comprobación de la ecuación A.2

$$r \geq 0.7 * ae$$

Comprobando:

$$r_{30} \geq 0.7 * ae$$

$$r_{30} \geq 0.7 * 23.70$$

$$r_{30} \geq 16.59 \text{ pulg}$$

$$11.81 \geq 16.59 \text{ No satisface la condición}$$

El valor de la deflexión en el geófono ubicado a 30 centímetros del plato de carga no cumple con la condición $r \geq 0.7 ae$, por lo que la deflexión en dicho punto no es representativa.

Módulo resiliente MR_{60}

Cálculo del valor correspondiente al lateral izquierdo estacionamiento 45 + 000 correspondiente al valor registrado por el geófono ubicado a 60 centímetros del punto a evaluar (plato de carga)

El procedimiento a seguir para el Cálculo del MR_{60} es exactamente el mismo que para el MR_{30} .

1. Cálculo del MR mediante la ecuación A.1

$$MR = \frac{0.24P}{d_r * r}$$

Datos:

MR_{60} : ?

P: 9000 libras.

dr_{60}^{35} : 0.0024 pulgadas.

r^{36} : 60 cm = 23.62 pulgadas.

$$MR_{60} = \frac{0.24 * 9000}{0.0024 * 23.62}$$

$MR_{60} = 38,130.30$

2. Comprobación de que el valor del módulo resiliente es representativo si cumple con la condición de $r \geq 0.7ae$
Calculo de mediante la ecuación A.3

$$ae = \sqrt{a^2 + \left(D * \sqrt[3]{\frac{EP}{MR}} \right)^2}$$

³⁵ Valor Extraído de tabla 5.3 correspondiente a los valores registrados por el deflectómetro de impacto, y debe estar en pulgadas.

³⁶ Esta variable debe cumplir con la condición de $r > 0.7ae$, según la guía AASTHO 1993.

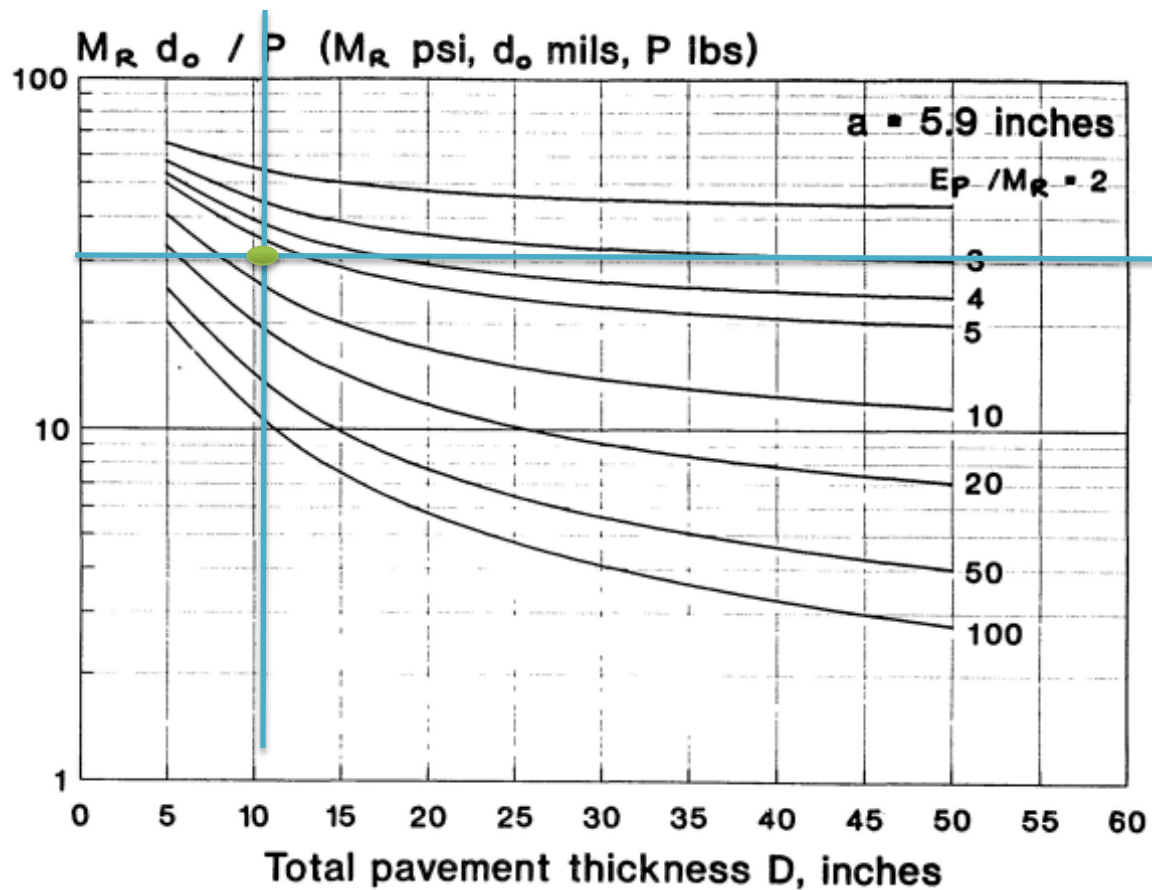
Datos:

d_o : 0.00641 pulgadas

D : espesor del pavimento = 30.5 cm = 12 pulgadas.

$M_R * d_o / P = (38,130.3 * 6.41) / 9000 = 27.14 = 27.0$

Mediante el uso de la figura 3.2



El valor de $E_p / M_R = 8.5$

$$ae = \sqrt{a^2 + \left(D * \sqrt[3]{\frac{EP}{MR}} \right)^2}$$

$$ae = \sqrt{5.9^2 + (12 * \sqrt[3]{8.5})^2}$$

$$ae = 25.19$$

Comprobación de $r \geq 0.7 * ae$

Comprobando:

$$r_{60} \geq 0.7 * ae$$

$$r_{60} \geq 0.7 * 25.19$$

$$r_{60} \geq 17.63$$

23.62 \geq 17.63 Si satisface la condición.

El valor de la deflexión correspondiente a dr_{60} satisface la condición de r , razón por la cual este valor brinda información representativa y que por medio de ella se puede llevar a cabo un análisis de la condición estructural del pavimento en estudio.

Nota: el cálculo del módulo resiliente para los otros estacionamientos (de ambos carriles) es exactamente igual al descrito para el estacionamiento 45 + 000 para los valores d_{30} y d_{60} , razón por la cual se resumen en las correspondientes tablas.

Como primer paso es la conversión de las deflexiones de milésimas de pulgadas a pulgadas, debido a que para su utilización en la fórmula 212 deben estar en estas unidades.

Cumpliendo siempre con la fórmula de **MR = (0.24P) / (dr*r)**

Como inicio es expresar las deflexiones en pulgadas, lo cual se resume en la siguiente tabla.

Deflexiones en pulgadas (dr) correspondientes a cada estación de cada carril.

Ubicación		Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Fuerza (Libras)	Deflexiones obtenidas pulgadas (dr)						
Est.	Lateral			dr0	dr30	dr60	dr90	dr120	dr150	dr180
45+000	Izquierdo	27.7	9032	0.00641	0.00431	0.0024	0.00138	0.00087	0.00063	0.00052
45+100	Derecho	27.7	9032	0.00813	0.00597	0.00393	0.00264	0.00184	0.00138	0.00111
45+200	Izquierdo	28.2	8927	0.00978	0.00564	0.00294	0.00185	0.00135	0.00107	0.00089
45+300	Derecho	27.6	8994	0.01053	0.0077	0.00491	0.00293	0.00188	0.00133	0.00106
45+400	Izquierdo	28.2	8979	0.00745	0.00447	0.00238	0.00142	0.0009	0.00065	0.00055
45+500	Derecho	27.6	9039	0.00803	0.00546	0.00322	0.00197	0.0013	0.00096	0.00076
45+600	Izquierdo	28.2	9057	0.01118	0.00639	0.0031	0.00175	0.00111	0.00078	0.00061
45+700	Derecho	27.3	8958	0.01068	0.00722	0.00387	0.00207	0.0013	0.00097	0.00079
45+800	Izquierdo	27.9	8913	0.00901	0.00575	0.00293	0.00166	0.00107	0.00078	0.00061
45+900	Derecho	27.6	9005	0.00695	0.00451	0.0025	0.00151	0.00106	0.00081	0.00067
46+000	Izquierdo	27.6	9066	0.00787	0.00523	0.00299	0.00183	0.00125	0.00094	0.00076
46+100	Derecho	27.9	8958	0.01071	0.00797	0.00486	0.00293	0.00181	0.00123	0.00096
46+200	Izquierdo	28	8967	0.00844	0.00533	0.0031	0.00202	0.00141	0.00106	0.00085
46+300	Derecho	27.2	8979	0.00889	0.00643	0.004	0.00265	0.00179	0.00132	0.00102
46+400	Izquierdo	27.6	8963	0.00712	0.00384	0.00218	0.00148	0.00111	0.00089	0.00072
46+500	Derecho	27.5	8952	0.00769	0.00519	0.00288	0.00179	0.00124	0.00096	0.00078
46+600	Izquierdo	27.6	9062	0.00676	0.00475	0.00323	0.00231	0.00173	0.00136	0.00112
46+700	Derecho	28.2	8922	0.00981	0.00612	0.00313	0.00175	0.00112	0.00087	0.00077
46+800	Izquierdo	27.5	8920	0.0076	0.0051	0.00287	0.00169	0.0011	0.00081	0.00064
46+900	Derecho	27.3	8967	0.00466	0.00313	0.00193	0.0013	0.00095	0.00074	0.00061
47+000	Izquierdo	28.8	8970	0.00426	0.00267	0.00182	0.00132	0.00099	0.00078	0.00064
47+100	Derecho	26.8	8958	0.00347	0.00243	0.00153	0.00103	0.00075	0.00059	0.00048
47+200	Izquierdo	29.3	9057	0.01033	0.00707	0.00431	0.00281	0.00189	0.00135	0.00104
47+300	Derecho	27.3	8999	0.0064	0.0044	0.00251	0.00135	0.00073	0.00044	0.00029
47+400	Izquierdo	29.4	8963	0.00416	0.00295	0.00202	0.00142	0.001	0.00079	0.00063
47+500	Derecho	30.9	9005	0.0046	0.00318	0.00206	0.00142	0.00105	0.00083	0.00068

Tabla 6.4 resumen de las deflexiones en pulgadas, (dr).

En la tabla 6.5 se colocan todas las distancias desde el centro de carga hasta el punto de medición de cada geófono ubicado para registrar las deflexiones en cada punto de análisis en pulgadas.

r (distancia del plato de carga hasta el geófono en pulgadas)						
r30	r60	r90	r120	r150	r180	cms
11.81	23.62	35.43	47.24	59.06	70.87	plg

Tabla 6.5 radio de Centro de la Carga hasta el punto de medición.

En la tabla 6.6 se resume el cálculo de cada módulo resiliente que correspondiente a la formula $MR = (0.24 * P)/(dr * r)$.

Dónde:

dr: valor extraído de la tabla 6.1.

r: valor extraído de la tabla 6.2.

P: 9000 libras.

MR: ?

Estos valores son para cada uno de los puntos evaluados en cada carril a lo largo de tramo en estudio, a excepción del valor de máxima deflexión debido a que dicho valor no es utilizable para el cálculo del módulo resiliente dado que representaría un valor demasiado grande y poco confiable en el caso de ser utilizado para la obtención del módulo resiliente, modulo efectivo del pavimento, numero estructural)

Esta tabla presenta todos los valores de módulo resiliente perteneciente a la carretera específicamente al tramo en estudio en cada punto en el que se realizó la prueba de deflectometría para generar una cantidad completa y representativa de la evaluación estructural.

TABLA RESUMEN DE MODULO RESILIENTE

Ubicación		Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Fuerza (Libras)	MODULO RESILIENTE (PSI)						
Est.	Lateral			MR 0	MR 30	MR 60	MR 90	MR 120	MR 150	MR 180
45+000	Izquierdo	27.7	9032		42435.23	38103.3	44177.74	52556.28	58052.34	58612.19
45+100	Derecho	27.7	9032		30635.82	23269.19	23092.91	24849.98	26502.16	27457.96
45+200	Izquierdo	28.2	8927		32428.34	31104.74	32954.21	33869.6	34180.35	34245.33
45+300	Derecho	27.6	8994		23752.71	18624.83	20807.26	24321.26	27498.48	28753.15
45+400	Izquierdo	28.2	8979		40916.3	38423.5	42933.3	50804.4	56266.12	55415.16
45+500	Derecho	27.6	9039		33497.41	28399.98	30946.84	35172.28	38096.85	40103.08
45+600	Izquierdo	28.2	9057		28622.2	29499.33	34837.3	41192.76	46888.43	49964.49
45+700	Derecho	27.3	8958		25331.84	23629.95	29451.83	35172.28	37704.1	38580.18
45+800	Izquierdo	27.9	8913		31807.97	31210.9	36726.07	42732.68	46888.43	49964.49
45+900	Derecho	27.6	9005		40553.4	36579.17	40374.36	43135.81	45151.82	45490.06
46+000	Izquierdo	27.6	9066		34970.53	30584.59	33314.36	36579.17	38907.42	40103.08
46+100	Derecho	27.9	8958		22948.04	18816.45	20807.26	25261.86	29734.13	31748.27
46+200	Izquierdo	28	8967		34314.42	29499.33	30180.83	32428.34	34502.81	35856.87
46+300	Derecho	27.2	8979		28444.14	22861.98	23005.77	25544.11	27706.8	29880.73
46+400	Izquierdo	27.6	8963		47629.13	41948.59	41192.76	41192.76	41093.23	42331.03
46+500	Derecho	27.5	8952		35240.05	31752.75	34058.82	36874.16	38096.85	39074.8
46+600	Izquierdo	27.6	9062		38504.39	28312.05	26391.9	26430.04	26891.89	27212.8
46+700	Derecho	28.2	8922		29884.94	29216.59	34837.3	40824.97	42037.9	39582.26
46+800	Izquierdo	27.5	8920		35861.93	31863.39	36074.13	41567.24	45151.82	47622.41
46+900	Derecho	27.3	8967		58433.18	47382.34	46896.37	48130.49	49422.94	49964.49
47+000	Izquierdo	28.8	8970		68500.32	50246.11	46185.82	46185.82	46888.43	47622.41
47+100	Derecho	26.8	8958		75265.78	59769.89	59189.6	60965.28	61988.1	63496.54
47+200	Izquierdo	29.3	9057		25869.29	21217.62	21695.83	24192.57	27091.09	29306.1
47+300	Derecho	27.3	8999		41567.24	36433.44	45159.47	62635.57	83120.4	105097.73
47+400	Izquierdo	29.4	8963		61998.59	45271.25	42933.3	45723.96	46294.91	48378.32
47+500	Derecho	30.9	9005		57514.42	44392.2	42933.3	43546.63	44063.83	44821.09

Tabla 6.6 resumen de módulo resiliente para cada punto de análisis.

En los gráficos siguientes se presentan los valores del módulo resiliente correspondientes a los valores registrados por cada geófono en cada punto evaluado donde los valores de los estacionamientos pares corresponden al carril izquierdo mientras que los valores impares son los pertenecientes al carril derecho.

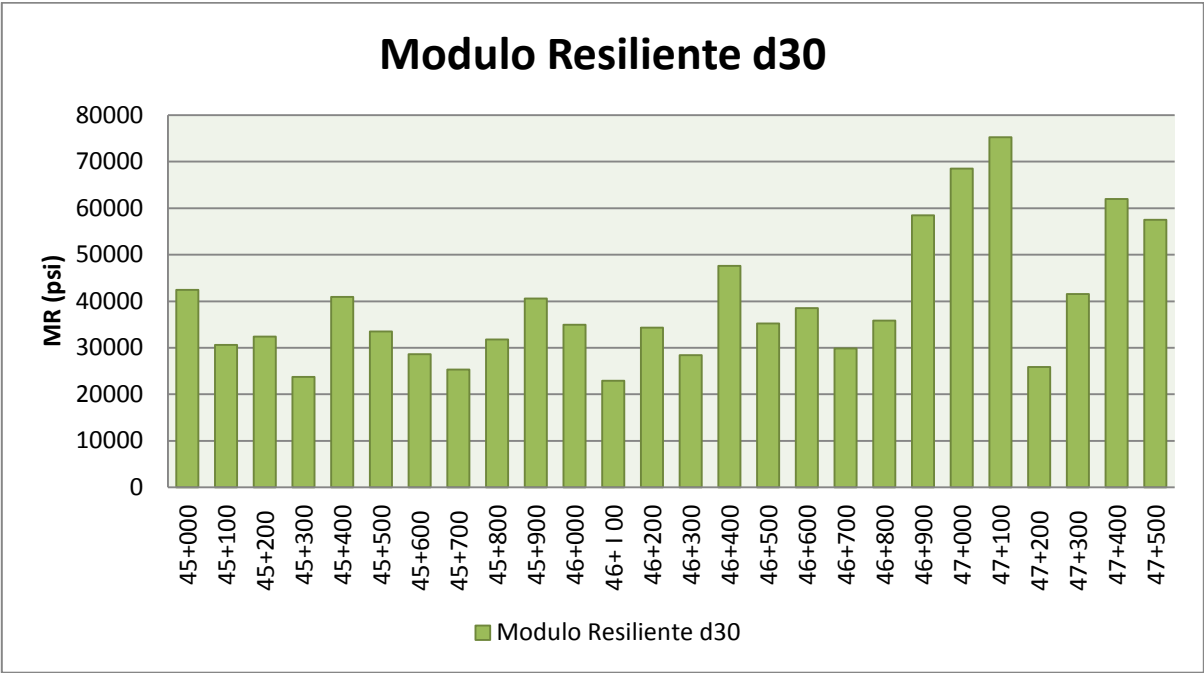


Gráfico 6.9 módulo resiliente correspondiente al MR₃₀.

En el grafico correspondiente al del geófono ubicado a 30 centímetros se registraron valores de ambos carriles en el que se destacan que los valores máximos y mínimos que corresponde al carril derecho los cuales son los MR mínimo = 22,948.04 en el estacionamiento 46 +100 y el valor máximo de MR= 75,265.78 en el estacionamiento 47 +100. Mientras que en el carril izquierdo los valores obtenidos fueron MR máximo = 68,500.32 en el punto evaluado en el estacionamiento 47 + 000 psi y el mínimo es 25,869.29 psi en el est. 47 + 200.

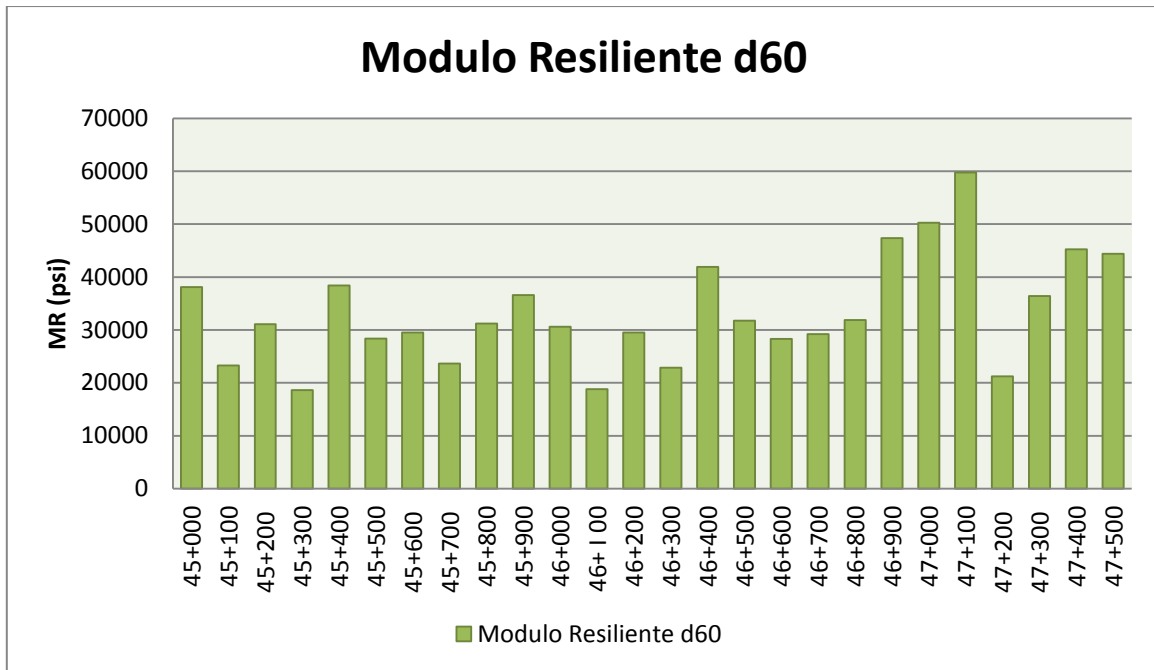


Gráfico 6.10 módulo resiliente correspondiente al MR60.

Los valores obtenidos en el sensor d60 siguen la misma tendencia que la del d30 siempre registrando el mayor valor de MR en el carril derecho 59,769.89 psi en el estacionamiento 47+100 y el valor mínimo de MR= 18,624.83 psi en el estacionamiento 45 + 300.

Y el carril izquierdo posee valores de MR = 50,246.11 psi valor máximo en el estacionamiento 47 + 000 y MR = 28,312.05 psi como valor mínimo en el estacionamiento 46 +600.

Los valores máximos de MR corresponden al carril derecho en cuanto al mayor valor de MR registrado en este punto mientras que en comparación el valor mínimo de ambos carriles es el izquierdo el que posee un mayor valor numérico del MR mínimo.

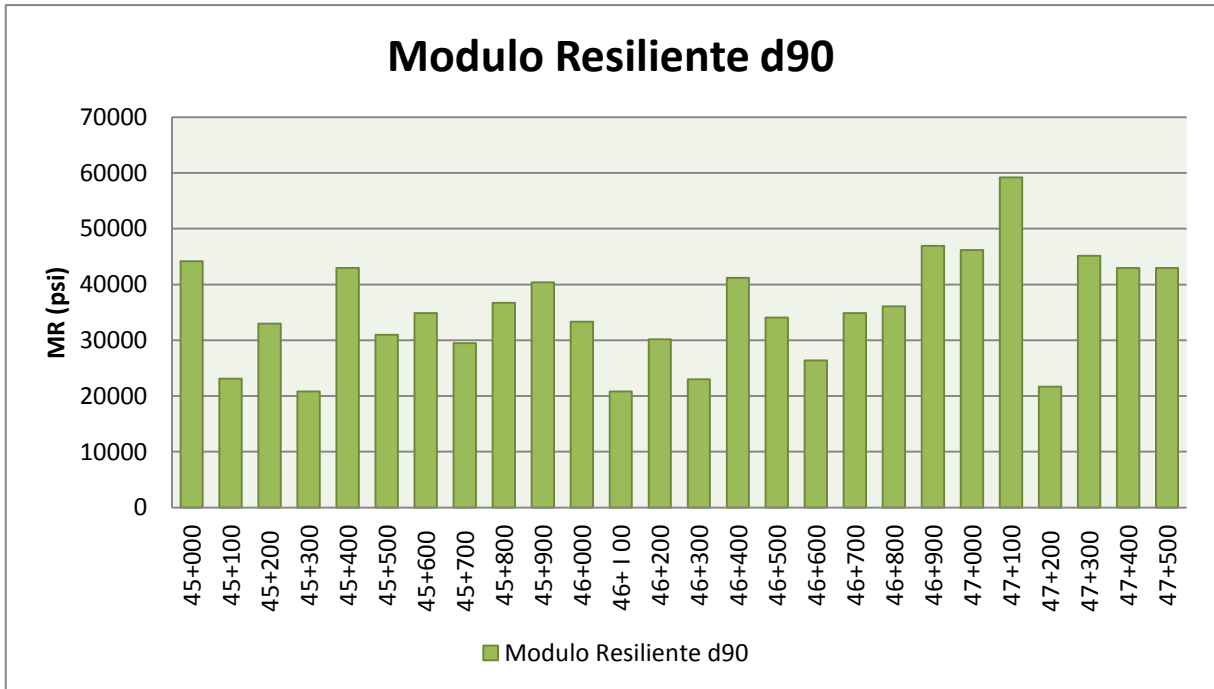


Gráfico 6.11 módulo resiliente correspondiente al MR90.

Los valores aquí registrados como MR máximo para el carril derecho corresponde al mismo estacionamiento 47 + 100 con un valor de 59,189.6 psi y el valor mínimo en el estacionamiento 45 + 300 y 46 + 100 que comparten el mismo valor equivalente a 20,807.26 psi.

Y los valores del carril izquierdo son MR máximo = 46,185.82 psi y el valor mínimo es 21,695.83 psi que se registraron en los estacionamientos 47 + 000 y 47 + 200 respectivamente.

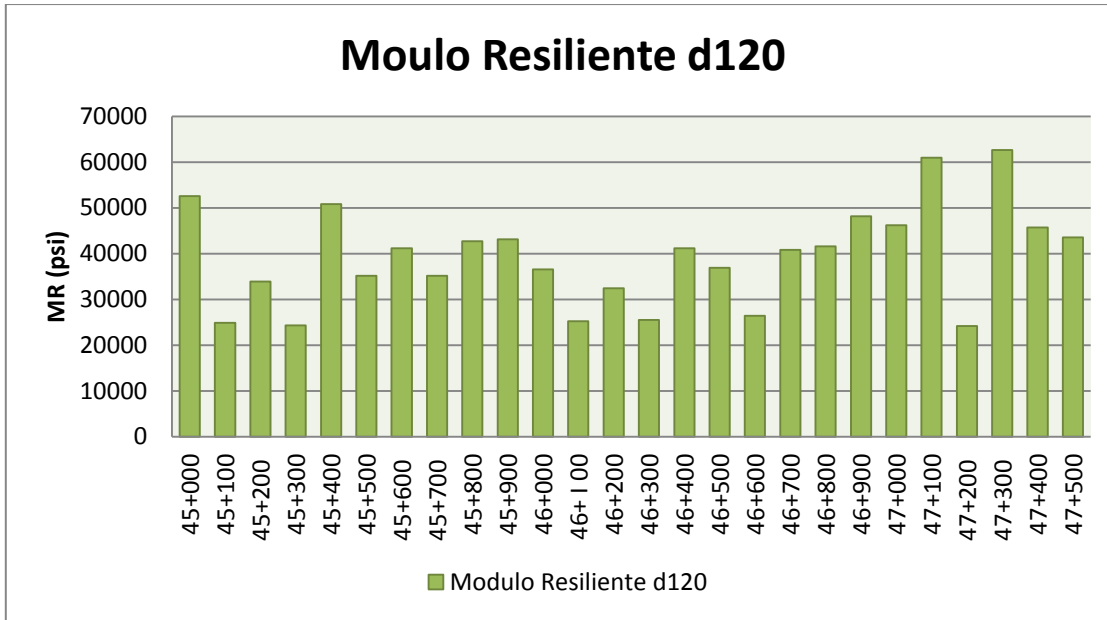


Gráfico 6.12 módulo resiliente correspondiente al MR120.

Los valores registrados por cada carril corresponden a los siguientes valores:

Carril derecho:

Valor máximo de MR = 62,365.57 psi en el est. 47 + 300

Valor mínimo de MR = 24,321.26 psi en el est. 45 + 300

Carril izquierdo:

Valor máximo de MR = 60,965.28 psi en el estacionamiento 47 + 100

Valor mínimo de MR = 24,192.57 psi en el estacionamiento 47 + 200

En este caso los valores extremos se registraron para el carril derecho mostrando valores más altos que los encontrados en los puntos analizados en el carril izquierdo registrados en la misma distancia desde el punto de evaluación. Siendo diferente a lo mostrado en los geófonos anteriores.

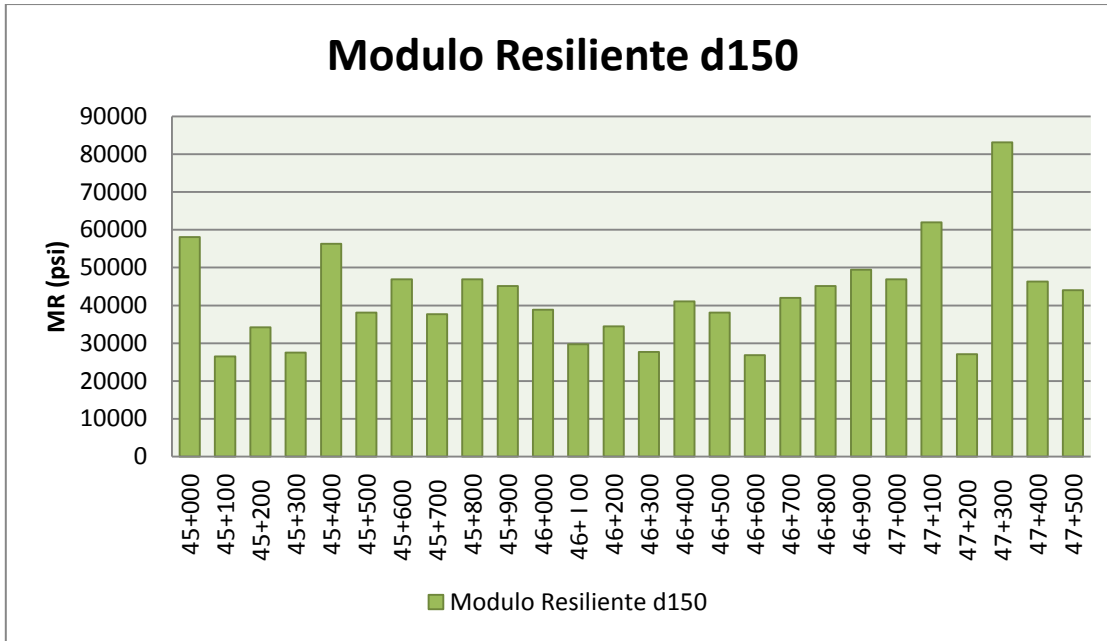


Gráfico 6.13 módulo resiliente correspondiente al MR150.

Los valores del módulo resiliente obtenidos por el geófono a 150 centímetros para cada carril se resumen en el grafico 6.13 donde se extrae que los valores extremos para el carril derecho son 83,120.4 psi en el estacionamiento 47 + 300 y 26,502.16 psi en el punto ubicado en el estacionamiento 45 +100. Mientras que los valores para el carril izquierdo se resumen en 61,988.10 psi como valor máximo obtenido en el estacionamiento 47 +100 y como valor mínimo de MR = 27,091.09 psi ubicado en el punto 47 + 200

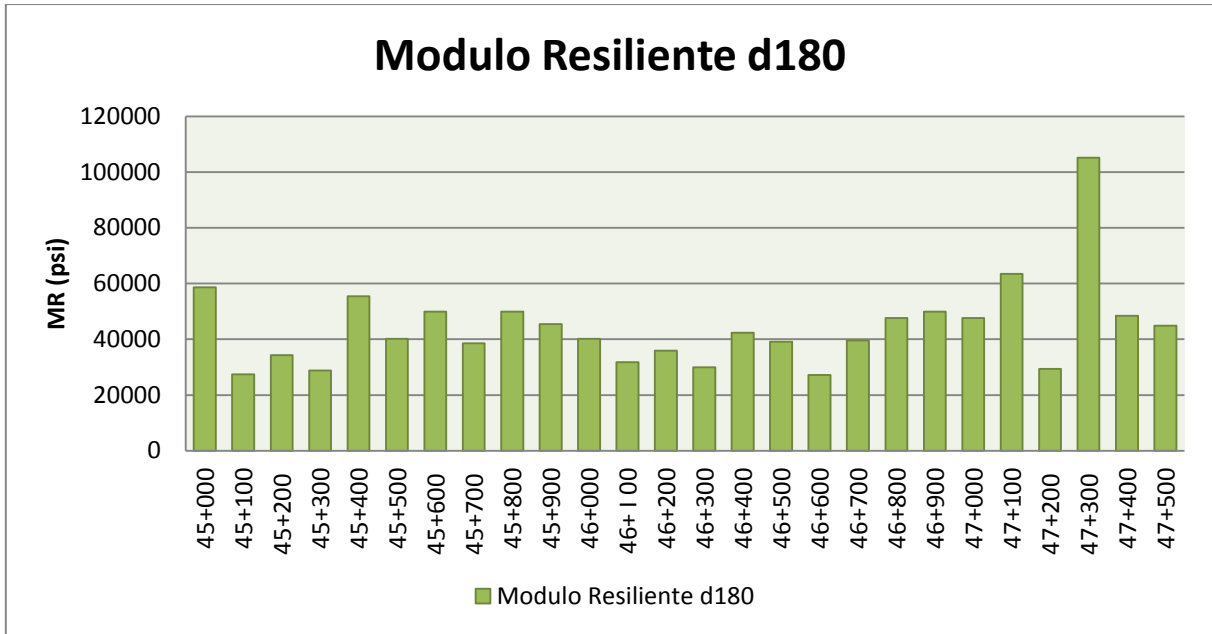


Gráfico 6.14 módulo resiliente correspondiente al MR180.

Y los valores en el último geófono obtuvieron los registros mostrados en la gráfica 6.14 que presenta como sus valores máximos por carril derecho de 105,097.73 psi y 27,457.96 psi en los puntos 47 +300 y 45 +100 respectivamente.

Y el carril izquierdo se resume en el estacionamiento 47 +100 el valor de MR correspondiente a 63,496.54 psi y en el estacionamiento 46 + 600 un valor de MR = 27,212.8 psi

Como siguiente paso es determinar qué valores cumplen con la condición de $r \geq 0.7ae$, estableciendo y seleccionando la información que permita completar el análisis estructural del pavimento y conjuntamente de la técnica.

Se determinara el EP/MR mediante la utilización de la gráfica 3.2, pero para poder utilizarla se necesita las siguientes variables.

D: espesor del pavimento = 12 pulgadas.

MR * do/P = de cada punto de estudio y la cual se resume en la siguiente tabla.

Tabla 6.7 resumen de MR*do/P

Ubicación		Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Fuerza (Libras)							
Est.	Lateral			(MR*d0)/p 0	(MR*d0)/p 30	(MR*d0)/p 60	(MR*d0)/p 90	(MR*d0)/p 120	(MR*d0)/p 150	(MR*d0)/p 180
45+000	Izquierdo	27.7	9032		30.22	27.14	31.46	37.43	41.35	41.74
45+100	Derecho	27.7	9032		27.67	21.02	20.86	22.45	23.94	24.8
45+200	Izquierdo	28.2	8927		35.24	33.8	35.81	36.8	37.14	37.21
45+300	Derecho	27.6	8994		27.79	21.79	24.34	28.46	32.17	33.64
45+400	Izquierdo	28.2	8979		33.87	31.81	35.54	42.05	46.58	45.87
45+500	Derecho	27.6	9039		29.89	25.34	27.61	31.38	33.99	35.78
45+600	Izquierdo	28.2	9057		35.56	36.64	43.28	51.17	58.25	62.07
45+700	Derecho	27.3	8958		30.06	28.04	34.95	41.74	44.74	45.78
45+800	Izquierdo	27.9	8913		31.84	31.25	36.77	42.78	46.94	50.02
45+900	Derecho	27.6	9005		31.32	28.25	31.18	33.31	34.87	35.13
46+000	Izquierdo	27.6	9066		30.58	26.74	29.13	31.99	34.02	35.07
46+100	Derecho	27.9	8958		27.31	22.39	24.76	30.06	35.38	37.78
46+200	Izquierdo	28	8967		32.18	27.66	28.3	30.41	32.36	33.63
46+300	Derecho	27.2	8979		28.1	22.58	22.72	25.23	27.37	29.52
46+400	Izquierdo	27.6	8963		37.68	33.19	32.59	32.59	32.51	33.49
46+500	Derecho	27.5	8952		30.11	27.13	29.1	31.51	32.55	33.39
46+600	Izquierdo	27.6	9062		28.92	21.27	19.82	19.85	20.2	20.44
46+700	Derecho	28.2	8922		32.57	31.85	37.97	44.5	45.82	43.14
46+800	Izquierdo	27.5	8920		30.28	26.91	30.46	35.1	38.13	40.21
46+900	Derecho	27.3	8967		30.26	24.53	24.28	24.92	25.59	25.87
47+000	Izquierdo	28.8	8970		32.42	23.78	21.86	21.86	22.19	22.54
47+100	Derecho	26.8	8958		29.02	23.04	22.82	23.51	23.9	24.48
47+200	Izquierdo	29.3	9057		29.69	24.35	24.9	27.77	31.09	33.64
47+300	Derecho	27.3	8999		29.56	25.91	32.11	44.54	59.11	74.74
47+400	Izquierdo	29.4	8963		28.66	20.93	19.84	21.13	21.4	22.36
47+500	Derecho	30.9	9005		29.4	22.69	21.94	22.26	22.52	22.91

Los valores se graficaron como se muestra en la figura 3.2 resumen de estacionamiento 45 +000, la cual en el eje vertical se grafica $(M_R \cdot d_o)/P$, y en el eje horizontal D. en donde se interceptan corresponde al valor de E_p/M_R

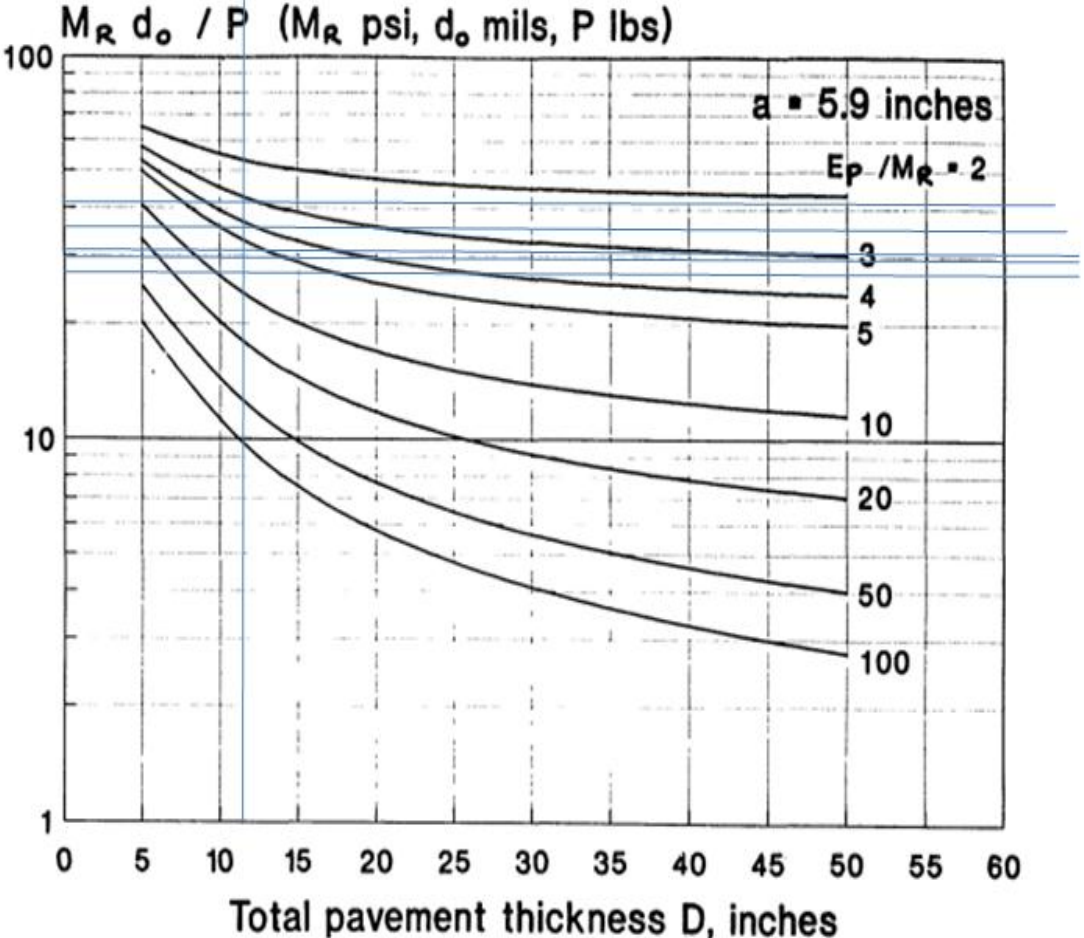


Figura 3.2 Determinación de E_p / M_R

Este procedimiento se repitió para los otros estacionamientos de cada carril para la obtención de E_p/M_R que se necesitan para la evaluación de cada dato obtenido en la realización de la prueba en el tramo en estudio. Ver graficas en anexo A, pero los valores resumen se muestran en la tabla 6.8

Ubicación		Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Fuerza (Libras)							
Est.	Lateral			EP/MR 0	EP/MR 30	EP/MR 60	EP/MR 90	EP/MR 120	EP/MR 150	EP/MR 180
45+000	Izquierdo	27.7	9032		7	8.5	6	4	3	3
45+100	Derecho	27.7	9032		7.5	14	14	12	10.5	8.5
45+200	Izquierdo	28.2	8927		4.5	5	4	3.8	3.8	3.8
45+300	Derecho	27.6	8994		7.5	14	10	7	6	5
45+400	Izquierdo	28.2	8979		5	6	4	3	2.5	2.7
45+500	Derecho	27.6	9039		6	9	7.5	5.5	4.5	4
45+600	Izquierdo	28.2	9057		4	3.8	3	2.1	2	2
45+700	Derecho	27.3	8958		6	7.5	4.3	3	2.8	2.6
45+800	Izquierdo	27.9	8913		6	6	3.8	3	2.5	2.4
45+900	Derecho	27.6	9005		5.5	7	5.5	4.9	4.5	4.3
46+000	Izquierdo	27.6	9066		6	8.5	7	6	5	4.5
46+100	Derecho	27.9	8958		7.5	13	10	6.5	4.5	3.7
46+200	Izquierdo	28	8967		6	8	8	7	6	5
46+300	Derecho	27.2	8979		7.5	13	13	9.5	8	6.5
46+400	Izquierdo	27.6	8963		3.9	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
46+500	Derecho	27.5	8952		6.5	8	7	5.5	5	4.8
46+600	Izquierdo	27.6	9062		7	12	15	15	15	15
46+700	Derecho	28.2	8922		5	5.5	3.7	2.8	2.6	2.9
46+800	Izquierdo	27.5	8920		7	8.5	7	4.5	3.9	3.4
46+900	Derecho	27.3	8967		6	8	8	8	7	7
47+000	Izquierdo	28.8	8970		6	10	11	11	11	9
47+100	Derecho	26.8	8958		6.5	13	13	11	10	9
47+200	Izquierdo	29.3	9057		7	10	9	8	6	5
47+300	Derecho	27.3	8999		7	9	5	2.8	1	1
47+400	Izquierdo	29.4	8963		7	12	15	12	12	11
47+500	Derecho	30.9	9005		6.5	11.5	13	12	11.5	10

Tabla 6.8 EP/MR de cada punto evaluado.

Mediante la ecuación A.3

$$ae = \sqrt{a^2 + \left(D * \sqrt[3]{\frac{EP}{MR}} \right)^2}$$

Y con los valores a, D y EP/MR ya conocidos se obtiene el valor ae.

Ubicación		Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Fuerza (Libras)	ae						
Est.	Lateral			ae 0	ae 30	ae 60	ae 90	ae 120	ae 150	ae 180
45+000	Izquierdo	27.7	9032		23.70	25.19	22.59	19.94	18.29	18.29
45+100	Derecho	27.7	9032		24.22	29.52	29.52	28.10	26.93	25.19
45+200	Izquierdo	28.2	8927		20.67	21.35	19.94	19.63	19.63	19.63
45+300	Derecho	27.6	8994		24.22	29.52	26.52	23.70	22.59	21.35
45+400	Izquierdo	28.2	8979		21.35	22.59	19.94	18.29	17.32	17.72
45+500	Derecho	27.6	9039		22.59	25.65	24.22	21.99	20.67	19.94
45+600	Izquierdo	28.2	9057		19.94	19.63	18.29	16.46	16.23	16.23
45+700	Derecho	27.3	8958		22.59	24.22	20.39	18.29	17.91	17.52
45+800	Izquierdo	27.9	8913		22.59	22.59	19.63	18.29	17.32	17.12
45+900	Derecho	27.6	9005		21.99	23.70	21.99	21.22	20.67	20.39
46+000	Izquierdo	27.6	9066		22.59	25.19	23.70	22.59	21.35	20.67
46+100	Derecho	27.9	8958		24.22	28.83	26.52	23.16	20.67	19.48
46+200	Izquierdo	28	8967		22.59	24.71	24.71	23.70	22.59	21.35
46+300	Derecho	27.2	8979		24.22	28.83	28.83	26.09	24.71	23.16
46+400	Izquierdo	27.6	8963		19.79	21.99	21.99	21.99	21.99	21.99
46+500	Derecho	27.5	8952		23.16	24.71	23.70	21.99	21.35	21.08
46+600	Izquierdo	27.6	9062		23.70	28.10	30.18	30.18	30.18	30.18
46+700	Derecho	28.2	8922		21.35	21.99	19.48	17.91	17.52	18.10
46+800	Izquierdo	27.5	8920		23.70	25.19	23.70	20.67	19.79	18.98
46+900	Derecho	27.3	8967		22.59	24.71	24.71	24.71	23.70	23.70
47+000	Izquierdo	28.8	8970		22.59	26.52	27.33	27.33	27.33	25.65
47+100	Derecho	26.8	8958		23.16	28.83	28.83	27.33	26.52	25.65
47+200	Izquierdo	29.3	9057		23.70	26.52	25.65	24.71	22.59	21.35
47+300	Derecho	27.3	8999		23.70	25.65	21.35	17.91	13.37	13.37
47+400	Izquierdo	29.4	8963		23.70	28.10	30.18	28.10	28.10	27.33
47+500	Derecho	30.9	9005		23.16	27.72	28.83	28.10	27.72	26.52

Tabla 6.9 de ae de cada punto evaluado.

Se realiza la evaluación mediante la ecuación $r \geq 0.7ae$ para cada valor, que se muestra en la tabla 6.9 y que el resultado se resumen en las tablas 6.10 y 6.11

En esta tabla solo se muestra el valor numérico de la ecuación para cada punto en análisis.

Ubicación		Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Fuerza (Libras)	0,7ae						
Est.	Lateral			r 0	r 30	r 60	r 90	r 120	r 150	r 180
45+000	Izquierdo	27.7	9032		16.59	17.63	15.81	13.96	12.80	12.80
45+100	Derecho	27.7	9032		16.95	20.66	20.66	19.67	18.85	17.63
45+200	Izquierdo	28.2	8927		14.47	14.95	13.96	13.74	13.74	13.74
45+300	Derecho	27.6	8994		16.95	20.66	18.56	16.59	15.81	14.95
45+400	Izquierdo	28.2	8979		14.95	15.81	13.96	12.80	12.13	12.40
45+500	Derecho	27.6	9039		15.81	17.95	16.95	15.39	14.47	13.96
45+600	Izquierdo	28.2	9057		13.96	13.74	12.80	11.52	11.36	11.36
45+700	Derecho	27.3	8958		15.81	16.95	14.27	12.80	12.54	12.27
45+800	Izquierdo	27.9	8913		15.81	15.81	13.74	12.80	12.13	11.98
45+900	Derecho	27.6	9005		15.39	16.59	15.39	14.85	14.47	14.27
46+000	Izquierdo	27.6	9066		15.81	17.63	16.59	15.81	14.95	14.47
46+100	Derecho	27.9	8958		16.95	20.18	18.56	16.21	14.47	13.63
46+200	Izquierdo	28	8967		15.81	17.30	17.30	16.59	15.81	14.95
46+300	Derecho	27.2	8979		16.95	20.18	20.18	18.26	17.30	16.21
46+400	Izquierdo	27.6	8963		13.85	15.39	15.39	15.39	15.39	15.39
46+500	Derecho	27.5	8952		16.21	17.30	16.59	15.39	14.95	14.76
46+600	Izquierdo	27.6	9062		16.59	19.67	21.12	21.12	21.12	21.12
46+700	Derecho	28.2	8922		14.95	15.39	13.63	12.54	12.27	12.67
46+800	Izquierdo	27.5	8920		16.59	17.63	16.59	14.47	13.85	13.29
46+900	Derecho	27.3	8967		15.81	17.30	17.30	17.30	16.59	16.59
47+000	Izquierdo	28.8	8970		15.81	18.56	19.13	19.13	19.13	17.95
47+100	Derecho	26.8	8958		16.21	20.18	20.18	19.13	18.56	17.95
47+200	Izquierdo	29.3	9057		16.59	18.56	17.95	17.30	15.81	14.95
47+300	Derecho	27.3	8999		16.59	17.95	14.95	12.54	9.36	9.36
47+400	Izquierdo	29.4	8963		16.59	19.67	21.12	19.67	19.67	19.13
47+500	Derecho	30.9	9005		16.21	19.40	20.18	19.67	19.40	18.56

Tabla 6.10 valores de la 0.7*ae

Y en la tabla 6.11 se presenta cuáles de ellas cumplen o no con la condición de r.

Ubicación		Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Fuerza (Libras)	r >= 0,7ae						
Est.	Lateral			r 0	r 30	r 60	r 90	r 120	r 150	r 180
45+000	Izquierdo	27.7	9032		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
45+100	Derecho	27.7	9032		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
45+200	Izquierdo	28.2	8927		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
45+300	Derecho	27.6	8994		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
45+400	Izquierdo	28.2	8979		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
45+500	Derecho	27.6	9039		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
45+600	Izquierdo	28.2	9057		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
45+700	Derecho	27.3	8958		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
45+800	Izquierdo	27.9	8913		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
45+900	Derecho	27.6	9005		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
46+000	Izquierdo	27.6	9066		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
46+100	Derecho	27.9	8958		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
46+200	Izquierdo	28	8967		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
46+300	Derecho	27.2	8979		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
46+400	Izquierdo	27.6	8963		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
46+500	Derecho	27.5	8952		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
46+600	Izquierdo	27.6	9062		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
46+700	Derecho	28.2	8922		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
46+800	Izquierdo	27.5	8920		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
46+900	Derecho	27.3	8967		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
47+000	Izquierdo	28.8	8970		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
47+100	Derecho	26.8	8958		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
47+200	Izquierdo	29.3	9057		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
47+300	Derecho	27.3	8999		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
47+400	Izquierdo	29.4	8963		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple
47+500	Derecho	30.9	9005		no cumple	cumple	cumple	cumple	cumple	cumple

Tabla 6.11 valores que cumple con $r \geq 0.7ae$

6.6.2 CALCULO DE EL MODULO EFECTIVO DEL PAVIMENTO (EP)

Si el módulo resiliente de la subrasante y el espesor total de todas las capas que están ubicadas por encima de la subrasante son conocidas o asumidas, el módulo efectivo de toda la estructura del pavimento puede ser determinado de las deflexiones medidas en el centro del plato de carga mediante el despeje de la ecuación A.4:

$$do = 1.5 * Pa \left(\left(\frac{1}{MR * \sqrt{\left(1 + \left(\frac{D}{a}\right)^2 * \sqrt[3]{\frac{EP}{MR}}\right)^2}} \right) + \left(\frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a}\right)^2}}}{EP} \right) \right)$$

$$EP = \frac{(1.5 * pa) * \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a}\right)^2}} \right)}{\left(do - (1.5pa) * \left(\frac{1}{MR * \sqrt{\left(1 + \left(\frac{D}{a}\right)^2 * \sqrt[3]{\frac{EP}{MR}}\right)^2}} \right) \right)}$$

Las variables conocidas son el espesor del pavimento (D), el radio de la placa (a), el módulo resiliente (MR) y la razón EP/MR valores antes calculados quedando solamente la variable p que corresponde a la presión en el plato de carga y se calcula de la siguiente manera.

$$p = \left(\frac{9000}{\pi * 5.9^2} \right)$$

P= 82.30 psi

$$EP = \left(\frac{(1.5 * 82.30 * 5.9) * \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{12}{5.9}\right)^2}} \right)}{\left(0.00641 - \left((1.5 * 82.30 * 5.9) * \left(\frac{1}{38,103.3 * \sqrt{\left(1 + \left(\frac{12}{5.9} * \sqrt[3]{8.5}\right)^2}\right)} \right) \right) \right)} \right)$$

EP = 210,537.71 PSI

El valor de **EP = 210,537.71** PSI corresponde al valor registrado a 60 centímetros del punto de prueba y que mediante el análisis de **r ≥ 0.7 ae**, se demostró que cumple con la condición y por lo tanto podía continuarse con el análisis de las otras variables que en este caso comprende al “modulo efectivo del pavimento y al número estructural”.

En la tabla 6.12 se presentan todos los valores correspondientes a cada uno de los puntos evaluados tanto en el carril derecho como el izquierdo para todo el tramo en estudio y que su valor de módulo resiliente correspondiente cumple con la condición de “r” dado que solo de esa manera se puede calcular el módulo EP de cada punto y también el numero estructural de lo contrario como en el caso del MR₃₀ que no cumple este valor ya no se utiliza para seguir con el proceso de cálculo recomendado por la guía AASTHO 1993.

Ubicación		Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Fuerza (Libras)	EP						
Est.	Lateral			EP 0	EP 30	EP 60	EP 90	EP 120	EP 150	EP 180
45+000	Izquierdo	27.7	9032			210537.71	193430.09	176192.55	172321.86	169545.93
45+100	Derecho	27.7	9032			217218.43	222900.21	205962.99	192942.23	212261.36
45+200	Izquierdo	28.2	8927			122972.77	125573.06	122664.64	120530.33	120098.16
45+300	Derecho	27.6	8994			149984.63	148428.03	132335.11	112667.77	115281.30
45+400	Izquierdo	28.2	8979			162846.77	167422.14	144104.29	133827.34	132392.24
45+500	Derecho	27.6	9039			191004.80	177211.18	164525.37	158150.05	153193.36
45+600	Izquierdo	28.2	9057			108225.90	91785.19	84042.64	73554.17	69205.81
45+700	Derecho	27.3	8958			128333.87	115524.77	101788.36	94262.08	94122.50
45+800	Izquierdo	27.9	8913			139613.03	133416.83	115934.03	109423.84	102127.09
45+900	Derecho	27.6	9005			204156.96	192920.50	180470.23	173480.02	175707.56
46+000	Izquierdo	27.6	9066			177529.28	167638.36	152453.42	150893.41	151498.85
46+100	Derecho	27.9	8958			145997.21	139284.40	120946.57	109441.29	108236.10
46+200	Izquierdo	28	8967			159857.64	151915.86	142848.57	139063.53	143959.25
46+300	Derecho	27.2	8979			171758.18	168853.96	166638.70	155658.94	151839.49
46+400	Izquierdo	27.6	8963			165356.73	171306.49	171306.49	172139.08	162576.48
46+500	Derecho	27.5	8952			183806.08	171962.15	170276.91	169076.65	164488.34
46+600	Izquierdo	27.6	9062			299577.39	298280.00	296587.51	277851.21	266490.15
46+700	Derecho	28.2	8922			130399.55	117070.69	103454.16	102340.08	106752.12
46+800	Izquierdo	27.5	8920			181176.75	158107.24	156594.30	145839.04	142954.24
46+900	Derecho	27.3	8967			410908.43	427314.53	388532.41	410451.37	394626.61
47+000	Izquierdo	28.8	8970			393252.19	475494.32	475494.32	448750.22	548545.23
47+100	Derecho	26.8	8958			417027.45	427744.87	456693.93	475546.19	489485.21
47+200	Izquierdo	29.3	9057			151149.82	156061.39	129488.24	123022.18	117543.03
47+300	Derecho	27.3	8999			225911.44	209428.79	158354.74	160617.79	121766.10
47+400	Izquierdo	29.4	8963			520447.63	482639.52	499100.87	475069.46	447141.09
47+500	Derecho	30.9	9005			367282.26	360852.05	373994.32	376114.96	413365.73

Tabla 6.12 resumen de los valores de EP.

En los gráficos que se muestran a continuación son la representación de los valores mostrados en la tabla 6.9 que se analizan por geófono ubicado a diferentes distancias del punto de análisis en cada estacionamiento en que se realizó la medición.

Los valores del carril derecho corresponden a los estacionamientos impares y los estacionamientos pares corresponden a los valores del carril izquierdo en cada una de las gráficas.

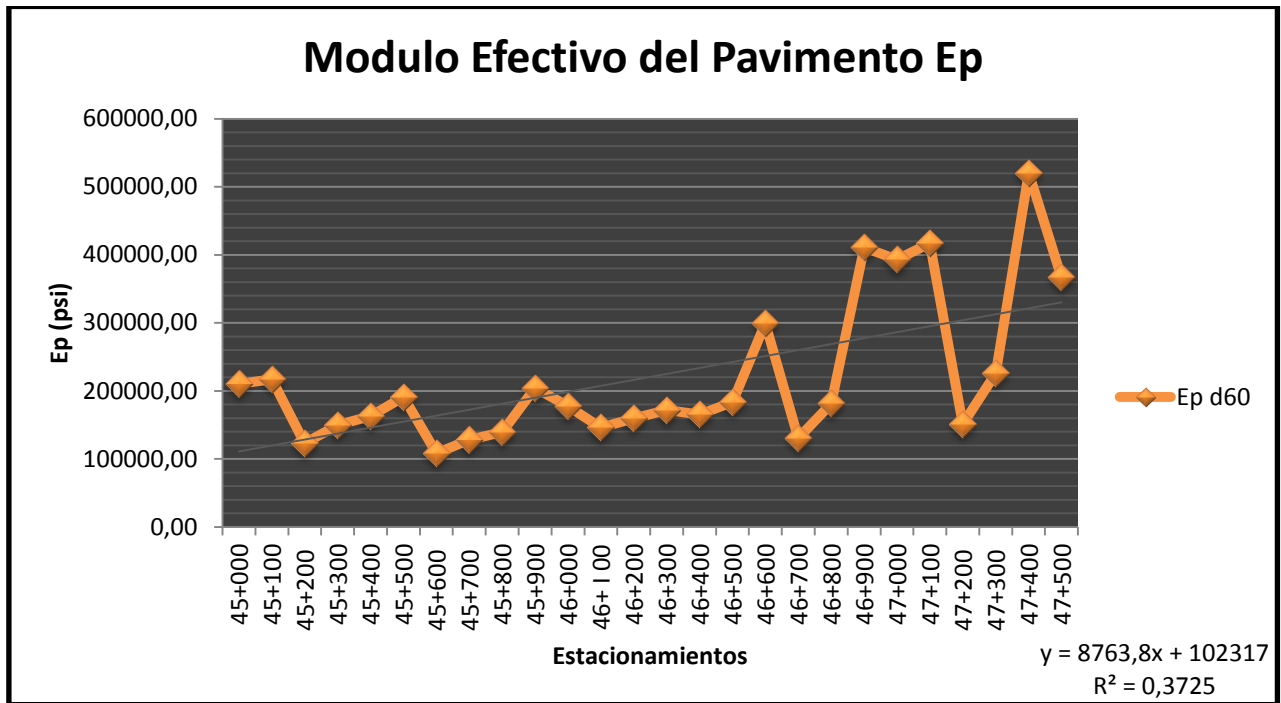


Gráfico 6.15 Módulo Efectivo correspondiente al EP60.

Se puede mostrar que en el gráfico 6.15 el comportamiento del EP es constante hasta el estacionamiento 46 + 500 dado que a partir del estacionamiento 46 +600 el valor de Ep aumenta hasta 299,577.39 psi correspondiente al carril izquierdo mientras que el valor más alto registrado para el carril derecho es el equivalente a 417,027.45 psi en el estacionamiento 47 +100 y para el carril izquierdo corresponde a un EP = 520,447.63 en el estacionamiento 47 + 400 mientras que el valor más pequeño registrado en ambos carriles es el que se encuentra en el estacionamiento 45 + 600 con un EP = 108,225.90 para el carril izquierdo mientras que en el carril derecho el EP = 130,399.55 psi registrado en el estacionamiento 46 + 700.

Lo que resulta que el valor mínimo corresponde al carril izquierdo así como el valor máximo.

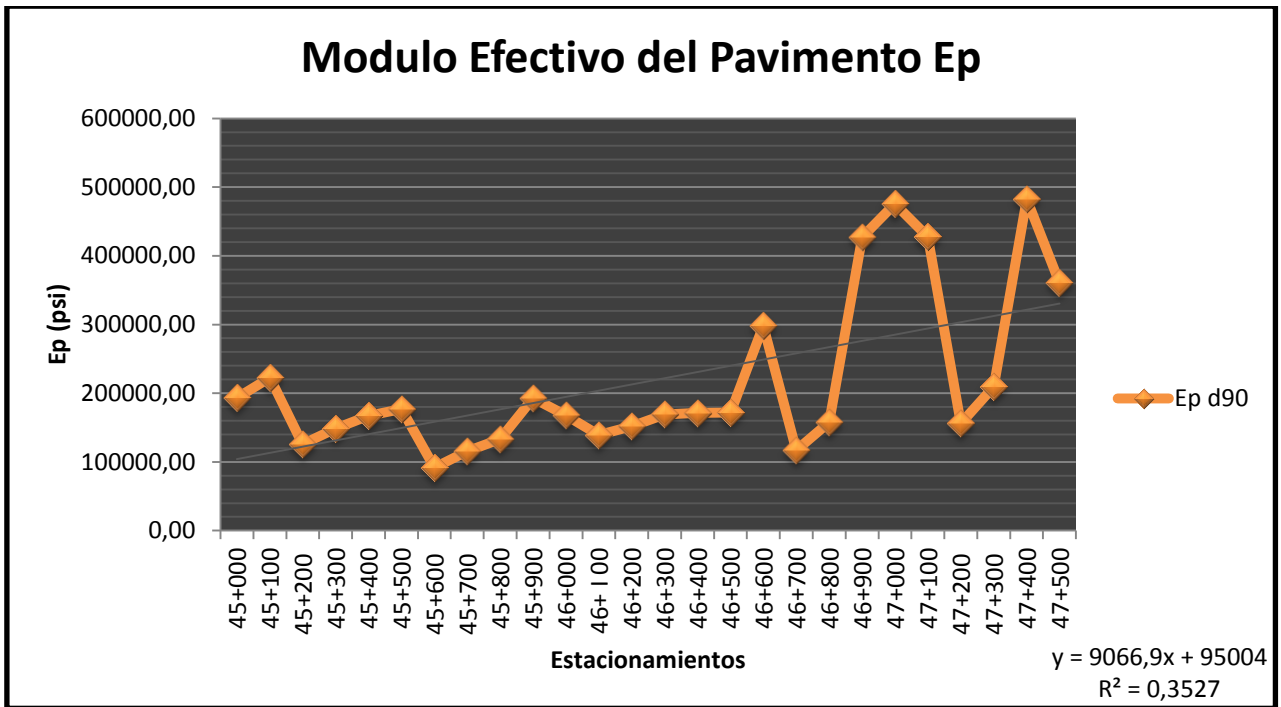


Gráfico 6.16 Módulo Efectivo correspondiente al EP90.

Los datos registrados en el geófono d90 se presenta en la gráfica 6.16 en donde los valores mínimos se registran en los primeros estacionamientos en ambos carriles registrándose para el carril izquierdo el valor de EP = 91,785.19 psi en el punto 45 + 600 mientras que para el carril derecho este corresponde a un EP = 115,524.77 psi en el punto 45 + 700 mientras que los valores más altos se registran a partir del estacionamiento 46 + 600 obteniéndose como máximos valores de EP los siguientes 482,639.52 psi y 427,744.81 psi en los estacionamientos 47 +400 y 47+ 100 respectivamente.

En este geófono el valor máximo corresponde al carril izquierdo al igual que el menor valor.

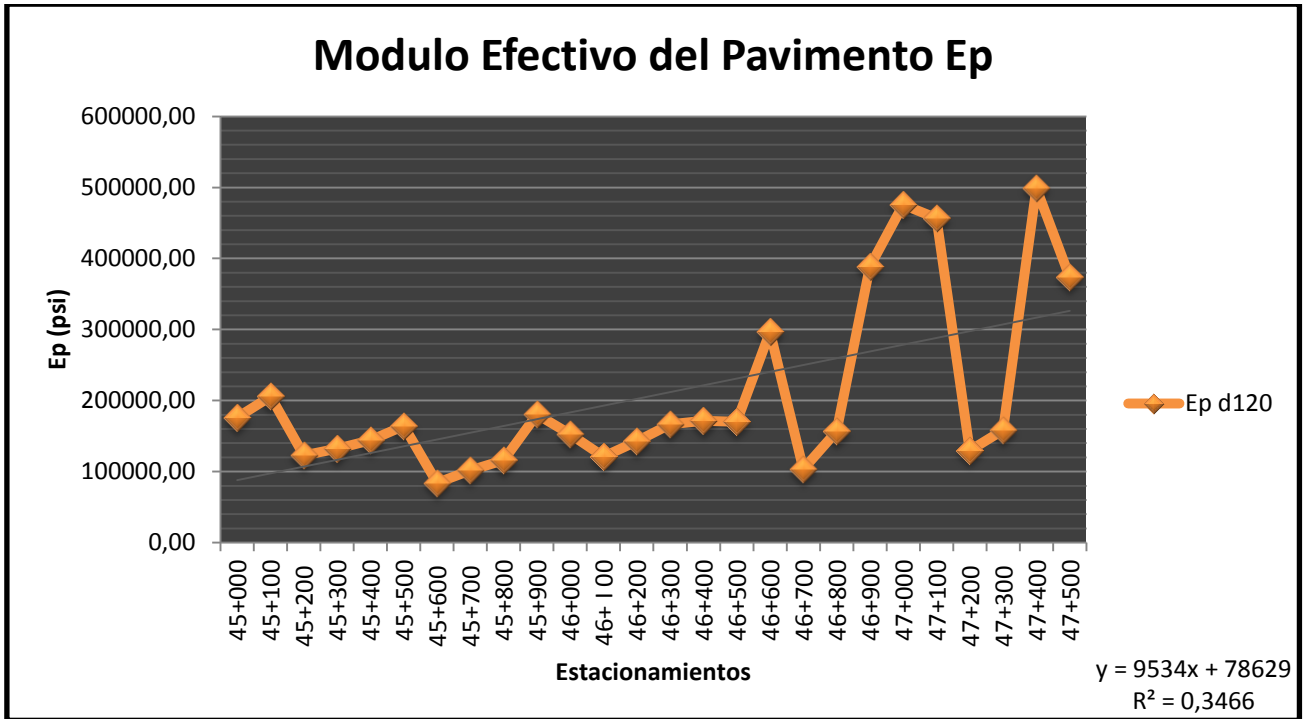


Gráfico 6.17 Módulo Efectivo correspondiente al EP120.

En este grafico se registraron los valores siguientes:

Carril derecho:

EP máximo = 456,693.93 psi estacionamiento 47 +100

EP mínimo = 103,454.16 psi estacionamiento 46 +700

Carril izquierdo:

EP máximo = 499,100.87 psi estacionamiento 47 +400

EP mínimo = 84,042.64 psi estacionamiento 45 +600

Al igual que en los geófonos anteriores los valores extremos corresponde siempre al carril izquierdo donde se resume el valor más grande y más pequeño de EP registrado en este punto.

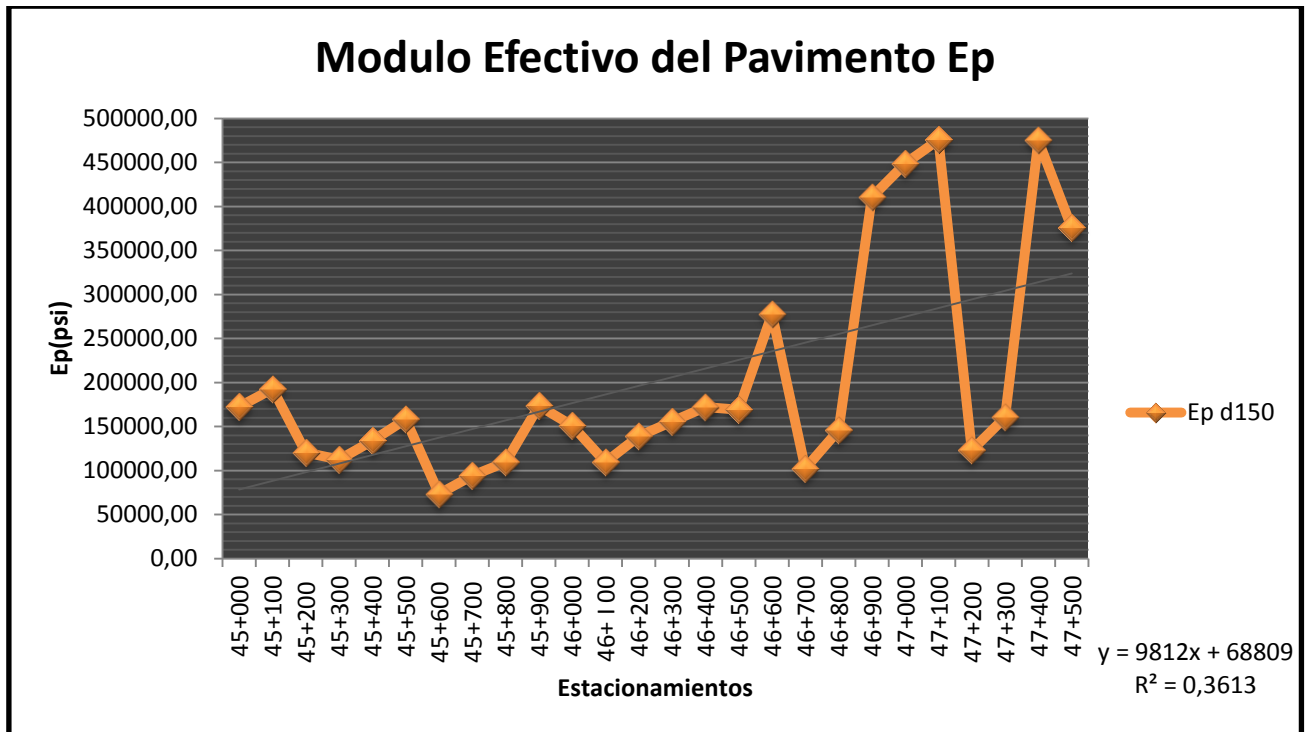


Gráfico 6.18 Módulo Efectivo correspondiente al EP150.

Los valores de EP por carril registrados en este estacionamiento por el geófono d150 para cada carril se resumen gráficamente en el grafico 6.18 y que presenta los siguientes valores:

En el carril izquierdo los valores de EP son:

EP máximo = 475,069.46 psi en el estacionamiento 47 + 400

EP mínimo = 73,554.17 psi en el estacionamiento 45 + 600

En el carril derecho los valores son:

EP máximo = 475,546.19 psi en el estacionamiento 47 + 100

EP mínimo = 94,262.08 psi en el estacionamiento 45 + 700

A diferencia de los anteriores geófonos ahora el valor máximo corresponde al carril derecho mientras que el valor mínimo siempre corresponde al carril izquierdo.

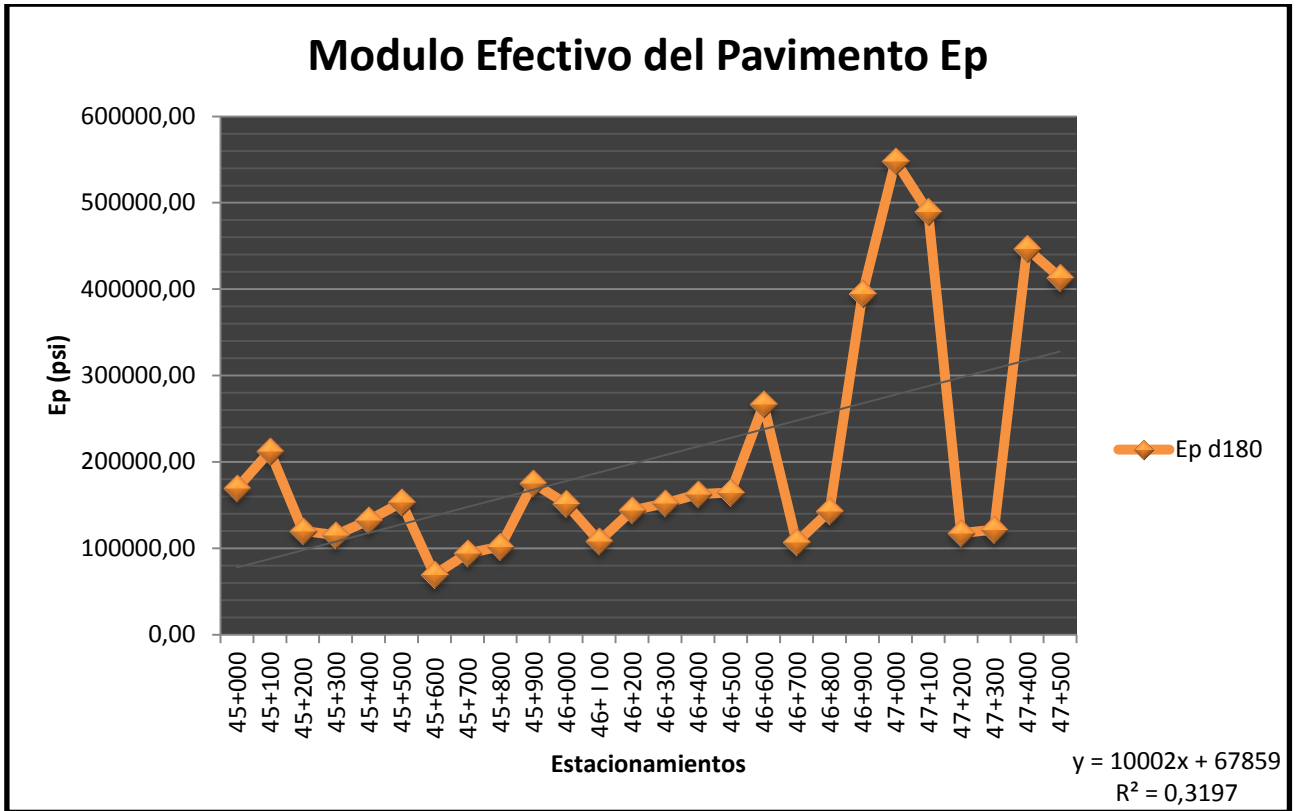


Gráfico 6.19 Módulo Efectivo correspondiente al EP180

En el geófono más alejado del punto de carga evaluado los valores que este registro se presenta en la gráfica 6.19 los cuales para el carril izquierdo son EP máximo = 548,545.23 psi y el EP mínimo = 69,205.81 psi en los estacionamiento 47 + 000 y 45 + 600 respectivamente.

Mientras que para el carril derecho estos son:

Como máximo valor el registrado en el punto 47 + 100 con un EP = 489,485.21 psi y en el punto 45 + 700 con un EP = 94,122.50 psi

El mayor y menor valor de EP corresponden al carril izquierdo.

6.6.3 CALCULO DEL NÚMERO ESTRUCTURAL

Con los valores obtenidos de EP de cada punto que fue evaluado y que cumplió con la condición de $r \geq 0.7$ ae, y los cuales pueden ser utilizados para calcular el número estructural el cual es una medida de la capacidad estructural actual (en el momento de la medida) de un firme. Y que debido a ello permite conocer la capacidad actual del pavimento y que en conjunto con el módulo resiliente completa la información estructural perteneciente a la capacidad actual registrada mediante la evaluación del proyecto.

Mediante el valor de EP calculado, la determinación del número estructural se realiza mediante la ecuación A.6. El cálculo siguiente corresponde al valor registrado en el punto 45+000. En el geófono a 60 centímetros debido a que el geófono anterior no cumple la condición de r y el geófono siguiente si lo hace por ello se presenta su cálculo mediante la ecuación A.6:

Calculo del número estructural S_{Neff}_{60} :

$$S_{Neff} = 0.0045D\sqrt[3]{EP}$$

$$S_{Neff} = 0.0045 * 12 * \sqrt[3]{210,537.71}$$

$$S_{Neff}_{60} = 3.21 \text{ pulg.}$$

El cálculo de los siguientes números estructurales sigue la misma metodología razón por la que se resumen en la tabla 6.13 para todo los puntos que satisficieron la condición que les presenta como información representativa de la capacidad estructural del firme.

Ubicación		Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Fuerza (Libras)	SNeff						
Est.	Lateral			SNeff 0	SNeff 30	SNeff 60	SNeff 90	SNeff 120	SNeff 150	SNeff 180
45+000	Izquierdo	27.7	9032			3.21	3.12	3.03	3.00	3.0
45+100	Derecho	27.7	9032			3.25	3.27	3.19	3.12	3.2
45+200	Izquierdo	28.2	8927			2.69	2.70	2.68	2.67	2.7
45+300	Derecho	27.6	8994			2.87	2.86	2.75	2.61	2.6
45+400	Izquierdo	28.2	8979			2.95	2.98	2.83	2.76	2.8
45+500	Derecho	27.6	9039			3.11	3.03	2.96	2.92	2.9
45+600	Izquierdo	28.2	9057			2.57	2.44	2.37	2.26	2.2
45+700	Derecho	27.3	8958			2.72	2.63	2.52	2.46	2.5
45+800	Izquierdo	27.9	8913			2.80	2.76	2.63	2.58	2.5
45+900	Derecho	27.6	9005			3.18	3.12	3.05	3.01	3.0
46+000	Izquierdo	27.6	9066			3.03	2.98	2.88	2.87	2.9
46+100	Derecho	27.9	8958			2.84	2.80	2.67	2.58	2.6
46+200	Izquierdo	28	8967			2.93	2.88	2.82	2.80	2.8
46+300	Derecho	27.2	8979			3.00	2.98	2.97	2.90	2.9
46+400	Izquierdo	27.6	8963			2.96	3.00	3.00	3.00	3.0
46+500	Derecho	27.5	8952			3.07	3.00	2.99	2.99	3.0
46+600	Izquierdo	27.6	9062			3.61	3.61	3.60	3.52	3.5
46+700	Derecho	28.2	8922			2.74	2.64	2.53	2.53	2.6
46+800	Izquierdo	27.5	8920			3.06	2.92	2.91	2.84	2.8
46+900	Derecho	27.3	8967			4.01	4.07	3.94	4.01	4.0
47+000	Izquierdo	28.8	8970			3.96	4.21	4.21	4.13	4.4
47+100	Derecho	26.8	8958			4.03	4.07	4.16	4.21	4.3
47+200	Izquierdo	29.3	9057			2.88	2.91	2.73	2.69	2.7
47+300	Derecho	27.3	8999			3.29	3.21	2.92	2.94	2.7
47+400	Izquierdo	29.4	8963			4.34	4.24	4.28	4.21	4.1
47+500	Derecho	30.9	9005			3.87	3.84	3.89	3.90	4.0

Tabla 6.13 número estructural. SNeff.

Los datos obtenidos mediante el análisis de las deflexiones registradas por cada geófono y que satisfacen la condición r y dicha información es utilizada para el cálculo del número estructural de cada punto evaluado y que se presentan gráficamente a continuación para cada geófono en cada estacionamiento y que los estacionamientos pares corresponde a el carril izquierdo mientras que el carril derecho está representado por los valores de los estacionamientos impares.

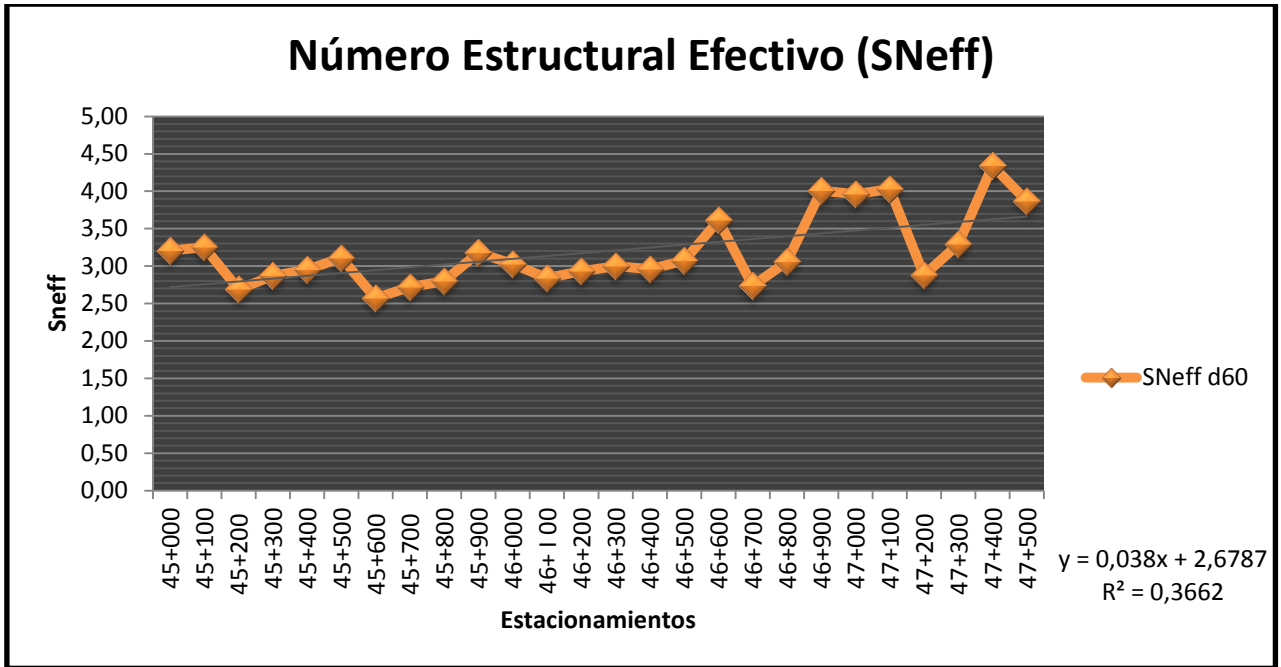


Gráfico 6.20 Número Estructural correspondiente al SNeff60.

En este grafico se presenta todos los valores que resultaron del registro y análisis de la información geófono d60 en ambos carriles y que se resume en el siguiente comportamiento:

Carril izquierdo:

SNeff máximo = 4.34 pulg. En el estacionamiento 47 + 400

SNeff mínimo = 2.57 pulg. En el estacionamiento 45 + 600.

Mientras que el carril derecho:

SNeff máximo = 4.03 pulg. En el estacionamiento 47 + 100

SNeff mínimo = 2.72 pulg. En el estacionamiento 45 + 700

El valor máximo así como el mínimo corresponden a los estacionamiento 47 + 400 y al estacionamiento 45 + 600 respectivamente del carril izquierdo.

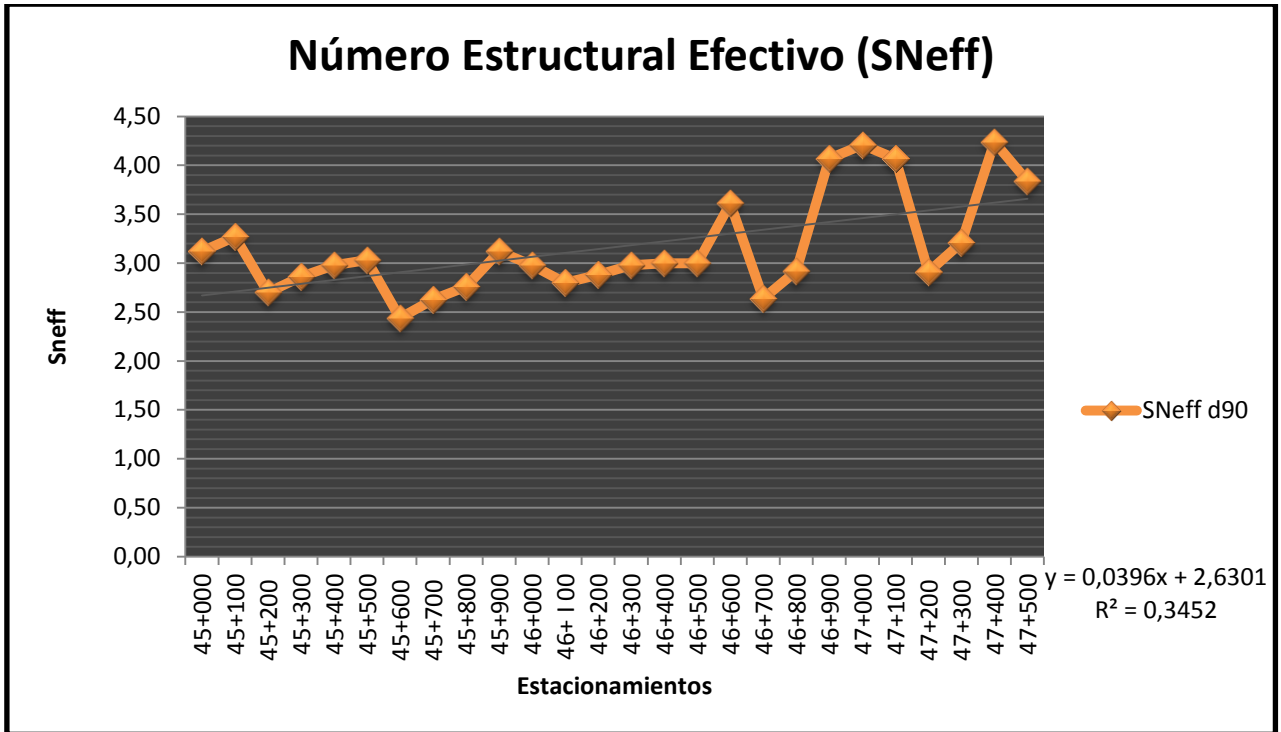


Gráfico 6.21 Número Estructural correspondiente al S_{Neff}90.

Los valores del número estructural correspondientes al análisis de la información recolectada por el geófono d90 se presentan a continuación por cada carril

Carril izquierdo:

S_{Neff} máximo = 4.24 pulg. En el estacionamiento 47 + 400

S_{Neff} mínimo = 2.44 pulg. En el estacionamiento 45 + 600.

Mientras que el carril derecho:

S_{Neff} máximo = 4.07 pulg. En los estacionamientos 46 + 900 y 47 + 100

S_{Neff} mínimo = 2.63 pulg. En el estacionamiento 45 + 700

Los valores del carril izquierdo son los correspondientes al mayor y menor valor calculado.

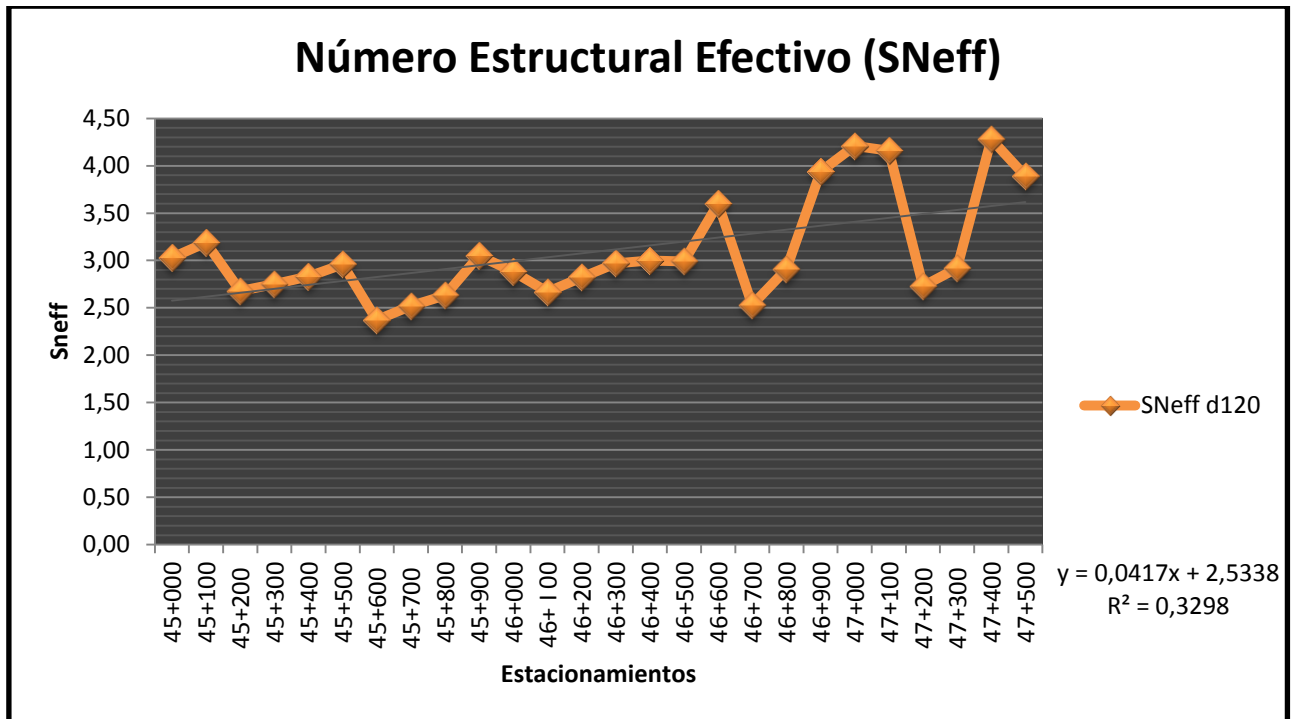


Gráfico 6.22 Número Estructural correspondiente al SNeff120.

Los valores del número estructural correspondientes al análisis de la información recolectada por el geófono d120 se presentan a continuación por cada carril

Carril izquierdo:

SNeff máximo = 4.28 pulg. En el estacionamiento 47 + 400

SNeff mínimo = 2.37 pulg. En el estacionamiento 45 + 600.

Mientras que el carril derecho:

SNeff máximo = 4.0 Pulg. En los estacionamientos 47 + 100

SNeff mínimo = 2.52 pulg. En el estacionamiento 45 + 700

En resumen el valor más alto calculado del SNeff corresponde al carril izquierdo así como también el valor más pequeño.

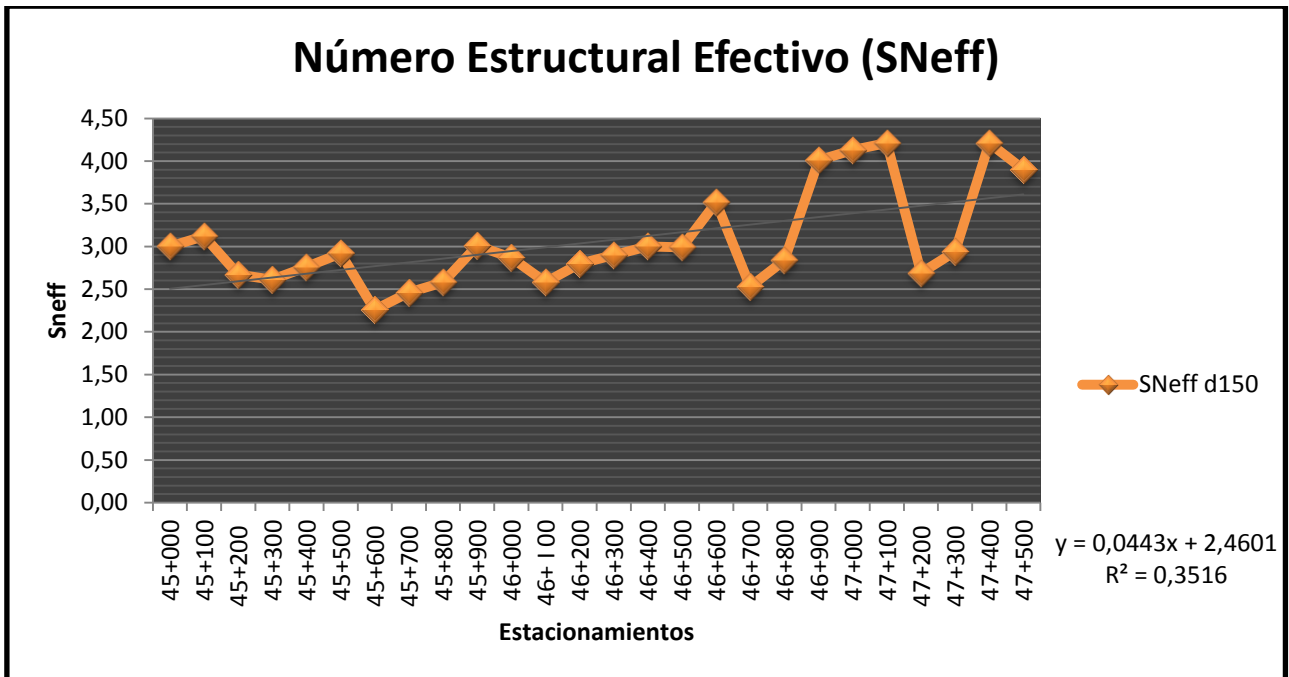


Gráfico 6.23 Número Estructural correspondiente al SNeff150.

Los valores del número estructural correspondientes al análisis de la información recolectada por el geófono d150 se presentan a continuación por cada carril

Carril izquierdo:

SNeff máximo = 4.21 pulg. En los estacionamientos 47 + 400

SNeff mínimo = 2.26 pulg. En el estacionamiento 45 + 600.

Mientras que el carril derecho:

SNeff máximo = 4.21 Pulg. En el estacionamiento 47 + 100

SNeff mínimo = 2.46 pulg. En el estacionamiento 45 + 700

En relación al valor máximo de SNeff fue calculado mediante los datos recolectados por el geófono d150 ubicado en los estacionamientos 47 + 100 y 47 + 400 para los carriles derecho e izquierdo respectivamente. Mientras que el valor más pequeño solo es para el carril izquierdo en el estacionamiento 45 + 600.

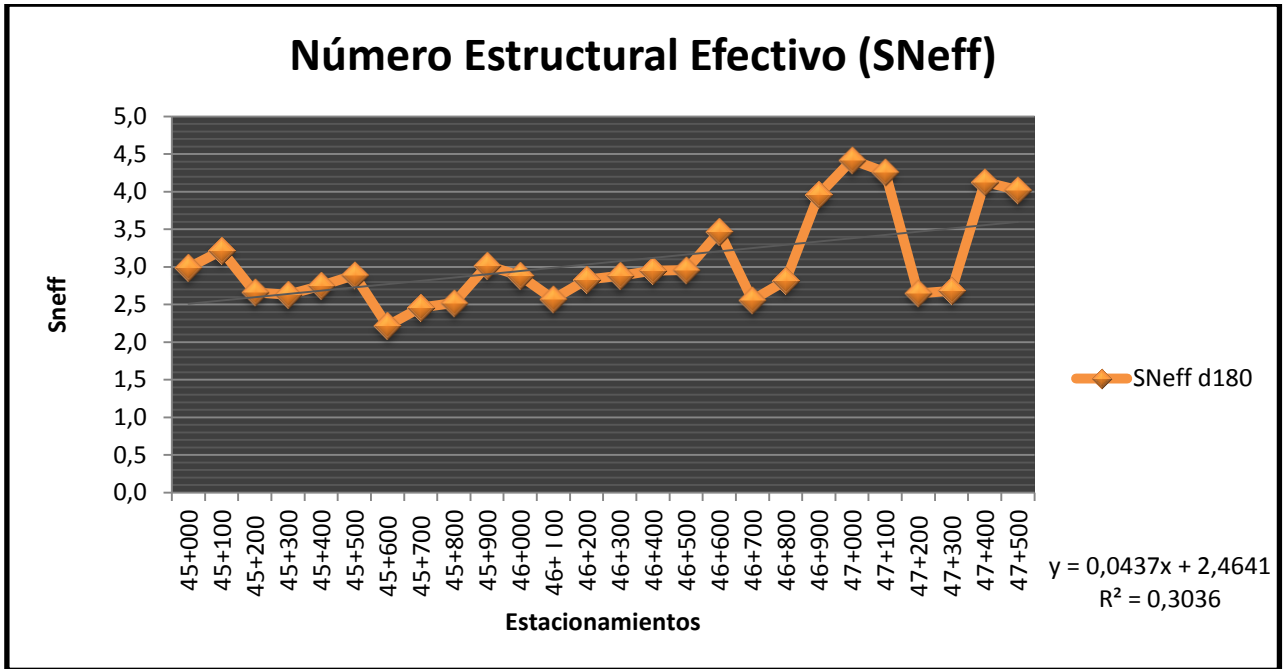


Gráfico 6.24 Número Estructural correspondiente al SNeff180.

El número estructural representado en la gráfica 6.24 es el resumen del análisis hecho a los datos recolectados por el geófono d180 por cada carril en diferentes estacionamientos, por lo que para el carril izquierdo los datos son los siguientes:

Carril izquierdo:

SNeff máximo = 4.4 pulg. En los estacionamientos 47 + 000

SNeff mínimo = 2.2 pulg. En el estacionamiento 45 + 600.

Y para el carril derecho son:

SNeff máximo = 4.3 Pulg. En el estacionamiento 47 + 100

SNeff mínimo = 2.5 pulg. En el estacionamiento 45 + 700

El SNeff del carril izquierdo es levemente mayor que el obtenido para el carril derecho mientras que los valores mínimos existe una diferencia de 0.3 pulgadas, obteniéndose para el carril izquierdo tanto el valor más alto y más pequeño de SNeff.

6.6.4 CALCULO DE MR DE DISEÑO

El procedimiento de diseño requiere de la introducción de un valor “efectivo”, que considere el efecto combinado de todos los módulos estacionales que se producen a lo largo del año por diferentes condiciones de humedad. El procedimiento para establecer el Módulo Resiliente Efectivo es el siguiente:

Se determina el módulo resiliente in situ en función de las deflexiones medidas en pavimentos en servicio para diferentes condiciones de humedad. Este módulo resiliente se debe ajustar para reflejar la posible diferencia entre resultados de laboratorio y valores medidos in situ.

El MR de diseño corregido por el factor de 0.33 recomendado por la guía AASHTO 1993 permite caracterizar la subrasante y éste es el valor a considerar en el diseño de un pavimento flexible como medida de seguridad para brindar un diseño que satisfaga todos los requerimientos para funcionar y brindar un servicio de calidad a los usuarios de la misma.

El cálculo del valor del módulo de diseño siguiente es el correspondiente al proceso del valor de deflexión registrado en el geófono d60 ya que este cumplió con la condición definida en la misma guía AASTHO.

Calculo de MR_{C60}

$$MR_c = c * MR \text{ Ecuación A.6}$$

Dónde:

C: factor de corrección establecido en la guía AASTHO 1993

MR: calculado mediante los valores registrados por cada geófono en cada estacionamiento.

$$MR_c = 0.33 * 38,103.30$$

$$MR_c = 12,574.09 \text{ PSI.}$$

Tabla 6.14 módulo resiliente de diseño (MRc)

Ubicación		Temperatura de la Superficie del Pavimento (°C)	Fuerza (Libras)	MODULO RESILIENTE DE DISEÑO (PSI)						
Est.	Lateral			MR 0	MR 30	MR 60	MR 90	MR 120	MR 150	MR 180
45+000	Izquierdo	27.7	9032		14003.6259	12574.089	14578.6542	17343.5724	19157.2722	19342.0227
45+100	Derecho	27.7	9032		10109.8206	7678.8327	7620.6603	8200.4934	8745.7128	9061.1268
45+200	Izquierdo	28.2	8927		10701.3522	10264.5642	10874.8893	11176.968	11279.5155	11300.9589
45+300	Derecho	27.6	8994		7838.3943	6146.1939	6866.3958	8026.0158	9074.4984	9488.5395
45+400	Izquierdo	28.2	8979		13502.379	12679.755	14167.989	16765.452	18567.8196	18287.0028
45+500	Derecho	27.6	9039		11054.1453	9371.9934	10212.4572	11606.8524	12571.9605	13234.0164
45+600	Izquierdo	28.2	9057		9445.326	9734.7789	11496.309	13593.6108	15473.1819	16488.2817
45+700	Derecho	27.3	8958		8359.5072	7797.8835	9719.1039	11606.8524	12442.353	12731.4594
45+800	Izquierdo	27.9	8913		10496.6301	10299.597	12119.6031	14101.7844	15473.1819	16488.2817
45+900	Derecho	27.6	9005		13382.622	12071.1261	13323.5388	14234.8173	14900.1006	15011.7198
46+000	Izquierdo	27.6	9066		11540.2749	10092.9147	10993.7388	12071.1261	12839.4486	13234.0164
46+100	Derecho	27.9	8958		7572.8532	6209.4285	6866.3958	8336.4138	9812.2629	10476.9291
46+200	Izquierdo	28	8967		11323.7586	9734.7789	9959.6739	10701.3522	11385.9273	11832.7671
46+300	Derecho	27.2	8979		9386.5662	7544.4534	7591.9041	8429.5563	9143.244	9860.6409
46+400	Izquierdo	27.6	8963		15717.6129	13843.0347	13593.6108	13593.6108	13560.7659	13969.2399
46+500	Derecho	27.5	8952		11629.2165	10478.4075	11239.4106	12168.4728	12571.9605	12894.684
46+600	Izquierdo	27.6	9062		12706.4487	9342.9765	8709.327	8721.9132	8874.3237	8980.224
46+700	Derecho	28.2	8922		9862.0302	9641.4747	11496.309	13472.2401	13872.507	13062.1458
46+800	Izquierdo	27.5	8920		11834.4369	10514.9187	11904.4629	13717.1892	14900.1006	15715.3953
46+900	Derecho	27.3	8967		19282.9494	15636.1722	15475.8021	15883.0617	16309.5702	16488.2817
47+000	Izquierdo	28.8	8970		22605.1056	16581.2163	15241.3206	15241.3206	15473.1819	15715.3953
47+100	Derecho	26.8	8958		24837.7074	19724.0637	19532.568	20118.5424	20456.073	20953.8582
47+200	Izquierdo	29.3	9057		8536.8657	7001.8146	7159.6239	7983.5481	8940.0597	9671.013
47+300	Derecho	27.3	8999		13717.1892	12023.0352	14902.6251	20669.7381	27429.732	34682.2509
47+400	Izquierdo	29.4	8963		20459.5347	14939.5125	14167.989	15088.9068	15277.3203	15964.8456
47+500	Derecho	30.9	9005		18979.7586	14649.426	14167.989	14370.3879	14541.0639	14790.9597

6.7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Con la información recolectada en el levantamiento de campo con el deflectómetro de impacto se registraron las deflexiones en cada punto evaluado según la metodología de campo y para cada una de las estaciones en todo el tramo de análisis y mediante estos valores se realizó el cálculo del módulo resiliente, modulo efectivo del pavimento, y el numero estructural.

Mediante cada una de las variables encontradas se logra realizar la evaluación estructural del pavimento que permitirá establecer si la técnica de reciclado realmente brinda las condiciones necesarias no solo económicamente sino también técnicamente como una alternativa adicional a las ya existentes.

Esta evaluación estructural que ayude a establecer el nivel de funcionalidad registrado por el proyecto mediante su respectiva evaluación funcional, en la cual se utilizó equipo de última tecnología como lo es el perfilómetro laser.

En las secciones siguientes se evaluará y establecerá la condición analizada mediante el procesamiento de la información recolectada en la actividad de campo realizada por profesional capacitado del Ministerio de Obra públicas específicamente la sección de Unidad de Investigación y Desarrollo Vial (MOP-UIDV) y que mediante el módulo resiliente conocer las propiedades de la subrasante y con el modulo efectivo del pavimento, el número estructural definir las condiciones de las capas arriba del a subrasante, completando con ello la información obtenida en la condición funcional.

6.7.1 MÓDULO RESILIENTE

La capacidad de la subrasante de soportar las condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño del afirmado, que se colocará encima.

El método de diseño de estructuras de pavimentos propuesto por AASHTO, incorpora al módulo resiliente como parámetro representativo de la capacidad de soporte del suelo de fundación del camino. Para el desarrollo del modelo de comportamiento de los pavimentos flexibles, el módulo resiliente (MR)

Mediante la interpretación de los valores obtenidos del módulo resiliente se puede llevar a cabo la caracterización de la subrasante, y con esto permite realizar diseños de proyectos nuevos (pavimentos rígidos y/o flexibles), también diseño de rehabilitación y en este caso el estado estructural del suelo de fundación lo que sienta las bases para un diseño más confiable.

El análisis de los resultados del módulo resiliente se llevaran a cabo por carril mediante la interpretación del grafico correspondiente al tramo en análisis, y el valor promedio correspondiente al carril en análisis y el valor que presenta de acuerdo al valor de MR que se obtuvo permitirá definir su estado estructural de la subrasante.

En la tabla 6.3 se presenta todo los valores calculados correspondientes al módulo resiliente y a cada uno de los puntos evaluados en el tramo de estudio para cada carril, pero en los gráficos siguientes se analizara por carril.

6.7.1.1 MÓDULO RESILIENTE CARRIL IZQUIERDO (MR)

En la evaluación correspondiente a este carril se llevaron a cabo la toma de 13 puntos de análisis a lo largo de los 2.5 km de análisis en la cual se registraron 7 valores que corresponde a cada uno de los sensores utilizados en la medición y que cada uno de estos forma parte de tabla 6.6 y que mediante la interpretación del grafico 6.25 se deducirá el estado estructural actual del tramo izquierdo correspondiente al sentido Zacatecoluca-Comalapa.

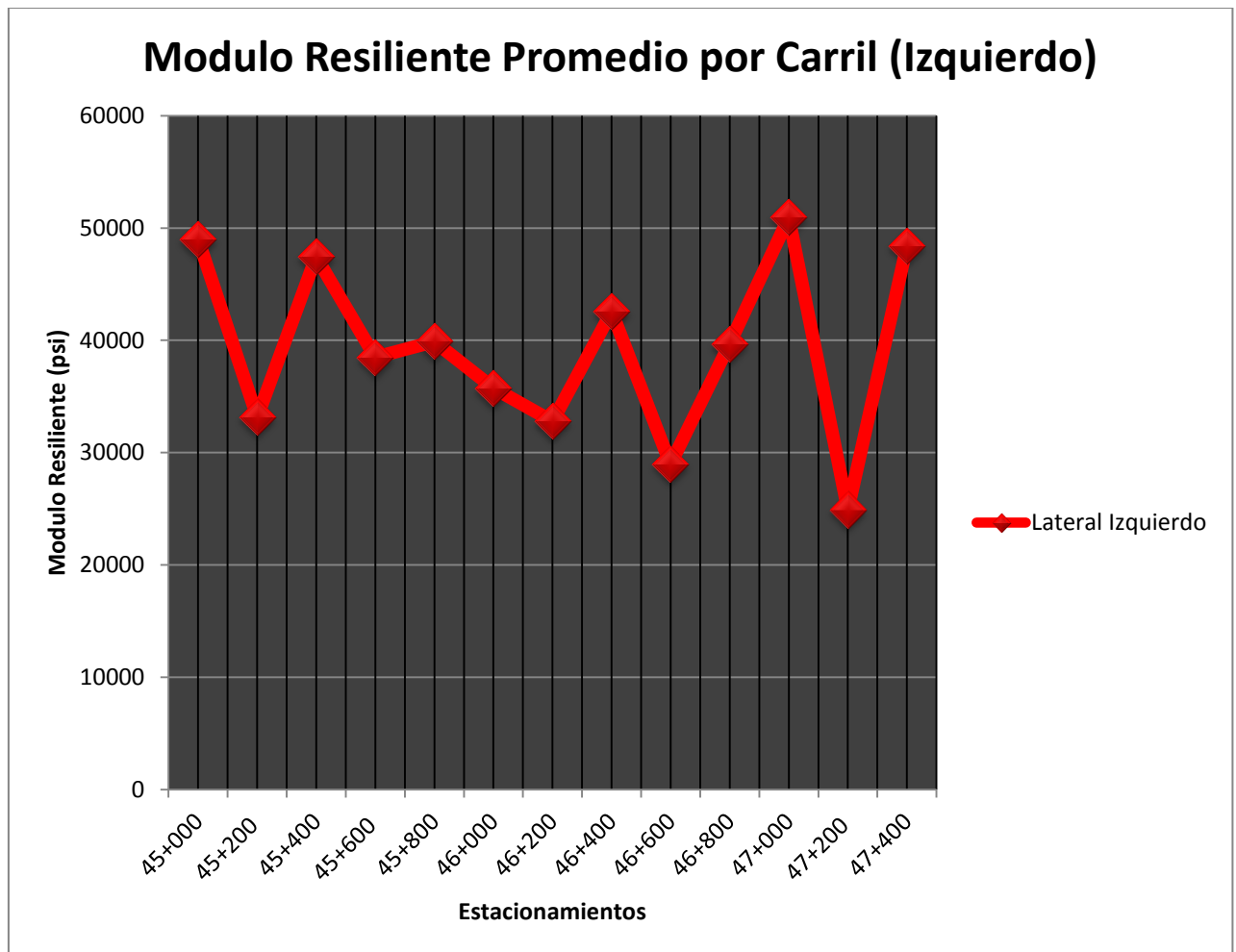


Gráfico 6.25 Modulo resiliente del carril izquierdo.

Los valores más altos se registraron en los estacionamientos 45 + 000, 45 + 400, 47 + 000, 47 + 400 con valores de MR = 48,989.51 psi, 47,459.79 psi, 50,938.15 psi 48,433.39 psi respectivamente. Siendo el mayor en obtenido en el estacionamiento 47 + 000

Mientras que los valores más bajos se obtuvieron en los estacionamientos 46 + 600 con un valor de MR = 28, 957.17 psi y 47 + 200 con un MR = 24,895.41 psi, en los otros estacionamientos los valores mantuvieron un rango entre 30,000 y 43,000 psi.

Los valores más pequeños se traducen a una condición regular de la capacidad misma de la subrasante focalizada en estos puntos mientras que los puntos evaluados en los estacionamientos 45 + 000, 45 +600 al 46 + 200 y el 46 + 400 representa un nivel intermedio en comparación con los valores mínimos y máximos lo que generaliza que el estado de la subrasante en cada punto evaluado representa un nivel de condición estructural.

El módulo resiliente promedio que representa la capacidad estructural de la subrasante de este carril es MR PROMEDIO= **39,383.70 psi**

Lo que se traduce que este carril soporta 39,383.70 libras fuerzas por pulgada cuadrada a lo largo de su tramo en estudio lo que convierte al sector de la subrasante correspondiente a este carril con una capacidad estructural buena para soportar las cargas.

En correlación con algunos criterios de clasificación que se utilizan con el concepto de CBR donde mediante fórmulas de correlación ubicarían este valor de módulo resiliente junto a un CBR de aproximadamente 13.12% que se clasifica como buena subrasante³⁷.

³⁷ Para referencia ver anexo A

6.7.1.2 MÓDULO RESILIENTE CARRIL DERECHO (MR)

Al igual que para el carril izquierdo en este carril se evaluaron 13 puntos repartidos en cada estacionamiento impar comenzando en el estacionamiento 45 + 100 y finalizando en el estacionamiento 47 + 500 que establece el último punto de análisis de todo el proyecto en estudio y que mediante el gráfico 6.26 en donde se presenta cada uno de los valores obtenidos en la evaluación estructural de cada punto en estudio en el sentido que va de Comalapa hacia Zacatecoluca.

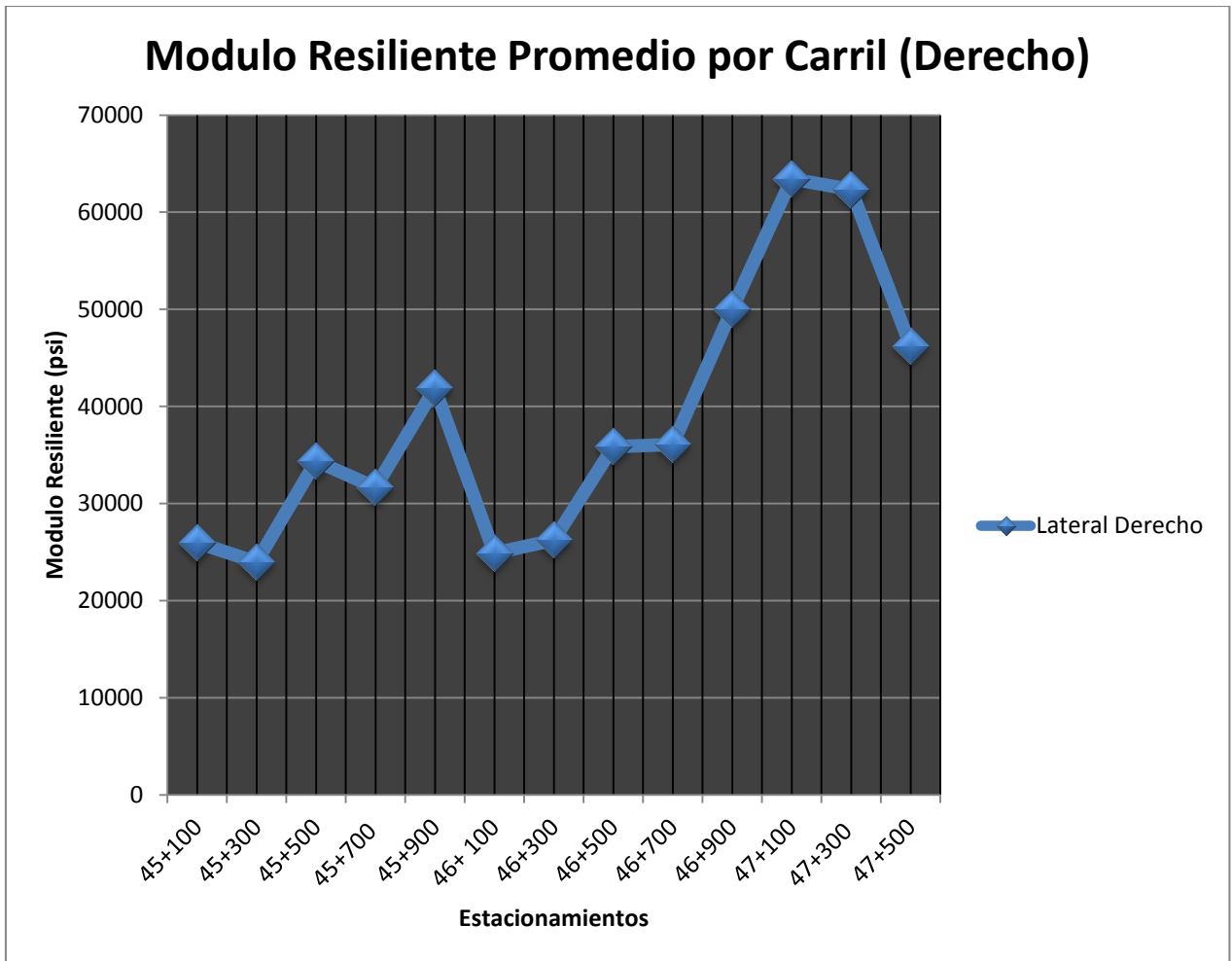


Gráfico 6.26 Módulo resiliente carril derecho.

El comportamiento del módulo resiliente en este carril muestra una línea con tendencia ascendente y que solo en ciertos estacionamientos hace un cambio de dirección que luego de ese cambio regresa hacia el sentido ascendente comenzando desde el primer estacionamiento.

Los valores más altos corresponde al MR= 63,445.865 psi en el estacionamiento 47 + 100 y MR= 62,335.63 en el estacionamiento 47 + 300 mientras que los valores más bajos de MR corresponde a tres estacionamientos, comenzando con el 45 + 300 con un MR= 23,959.615 psi, continuando por en el estacionamiento 46 + 100 con un MR = 24,886.00 psi y terminando con el estacionamiento 46 + 300 con un MR = 26, 240. 588 psi

El valor de MR que representa este carril viene dado por el promedio de los valores obtenidos mediante el análisis del módulo resiliente correspondiente a este carril y el cual es igual a MR PROMEDIO = 38,684.21 PSI.

Este valor representa la capacidad de presión actual de la subrasante la cual es de 38,684.21 libras por cada pulgada cuadrada y que permite establecer mediante este valor que la capacidad estructural de la subrasante se considera buena al igual que para el carril izquierdo cuyo resultado varía por un pequeño margen que no es suficiente para clasificar de menor nivel estructural la subrasante de este carril.

En correlación con algunos criterios de clasificación que se utilizan con el concepto de CBR donde mediante fórmulas de correlación ubicarían este valor de módulo resiliente junto a un CBR de aproximadamente 12.89% que se clasifica como buena subrasante³⁸.

Por tanto la capacidad estructural existente a la fecha del estudio establece que la evaluación estructural de este pavimento pueda ser considerada como buena.

³⁸ Para referencia ver anexo A

6.7.2 MÓDULO EFECTIVO DEL PAVIMENTO

Los valores de las capas sobre la subrasante forman parte integral del concepto del módulo del pavimento el cual es de suma importancia al momento de calcular el número estructural, cuando se ha realizado un estudio no destructivo mediante la utilización de equipo de deflectometría.

El valor del módulo efectivo del pavimento representa las capas superiores a la subrasante(base, carpeta de rodamiento) para que sea posible en este caso por medio de las pruebas de deflectometría encontrara el valor del numero estructural el cual permite realizar la evaluación correspondiente a estas capas para saber si están en condiciones óptimas estructuralmente hablando.

6.7.2.1 MODULO EFECTIVO DEL PAVIMENTO CARRIL IZQUIERDO

Los valores correspondientes al módulo efectivo del pavimento para cada estacionamiento del carril izquierdo se resumen en el grafico 6.27.



Gráfico 6.27 Modulo Efectivo del pavimento para el carril izquierdo.

Los valores de EP más altos calculados son los que se muestran en los estacionamientos siguientes:

En el estacionamiento: 47 + 000 un EP = 284,974.49 psi

Estacionamiento: 47 + 400 un EP = 298,953.18 psi

Los valores más pequeños de EP se registraron en:

El estacionamiento: 45 +600 con un EP =65,729. 80 psi

Los demás estacionamientos se encuentran en un valor medio dentro de los dos valores máximo y mínimo obtenido en el calculado del EP para cada punto y que juntos permiten establecer un valor representativo de esta variable característica de la condición estructural de las capas superiores a la subrasante.

El valor promedio correspondiente al EP para este carril es igual a **EP PROMEDIO = 205,365.987 PSI**, las capas sobre la subrasante están representadas por este valor en lo que respecta al carril izquierdo que luego se establece en su correspondiente numero estructural y por medio del cual se evaluara la condición estructural de dichas capas.

6.7.2.2 MODULO EFECTIVO DEL PAVIMENTO CARRIL DERECHO

La presentación de EP para el carril derecho se realiza mediante el grafico 6.28 el cual muestra los valores representativos de dicha variable para cada uno de los puntos en estudio.

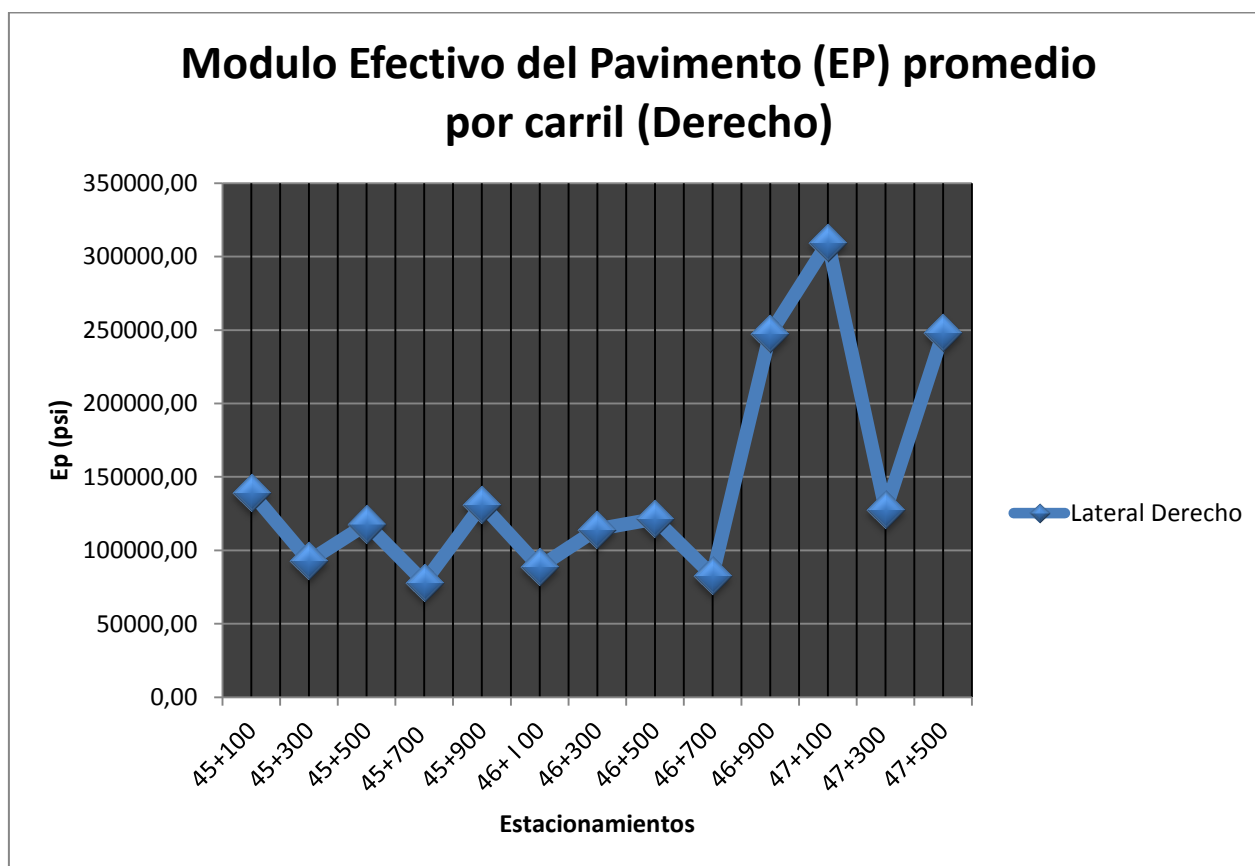


Gráfico 6.28 EP carril derecho.

Los estacionamientos 46 + 900 con un EP = 247,569.92 psi, 47 +100 con un EP= 309,652.99 psi y 47 + 500 con un valor de EP = 248,281.86 psi son los tres valores más grandes registrados en este carril.

Y los estacionamientos con los valores más bajos son: 45 + 300 con un EP = 92,885.81 psi, 45 + 700 y su EP = 78,210.85 PSI, 46+100 EP =88,663.66 PSI, y por último el estacionamiento 46 + 700 con un EP = 82,823.97 psi.

Los valores en los primeros estacionamientos, específicamente hasta el estacionamiento 46 +700 presenta un comportamiento similar debido a que toman como valor mínimo el del estacionamiento 45 + 700 y como máximo el registrado en el primer estacionamiento 45 + 100 que corresponden a UN EP =139,263.09 psi, posteriormente hace un cambio brusco de valor subiendo hasta los valores máximos obtenidos y que únicamente el valor del estacionamiento 47 + 300 tiene un valor dentro del rango que existe para los primeros estacionamientos.

Por lo tanto este carril posee un valor de **EP PROMEDIO = 214,448.22 PSI** como valor característico y representativo para las capas del carril derecho que se encuentran sobre la subrasante y que mediante su utilización se obtiene el numero estructural correspondiente.

6.7.3 NUMERO ESTRUCTURAL

Número estructural efectivo, se obtiene del retroanálisis de los pavimentos asfálticos y considera tanto las capas asfálticas como las granulares. El número estructural es un concepto introducido en la prueba AASHO para caracterizar la capacidad estructural de los pavimentos asfálticos y utilizados por el método AASHTO para el diseño de pavimentos de asfalto.

Y que mediante la utilización de la tabla³⁹ 6.15 se realizara la clasificación para cada valor del número estructural de cada carril.

Tabla 6.15 clasificación según su valor del número estructural para análisis estructural.

Concepto	Valor	Clasificación
NUMERO ESTRUCTURAL	< 3	Malo
	3 – 4	Regular
	> 4	Bueno

³⁹ “Auscultación, calificación del estado superficial y evaluación económica de la carretera sector puente de la libertad – maltería desde el k0+000 hasta el k6+000 (código 5006)”, Ing. Julián Andrés Pinilla Valencia, Universidad Nacional de Colombia.

6.7.3.1 NUMERO ESTRUCTURAL CARRIL IZQUIERDO. (S_{Neff})

En la evaluación del carril derecho que conduce de Zacatecoluca hacia Comalapa los estacionamientos que se evaluaron corresponden a los estacionamientos pares que inician en el estacionamiento 45 + 000 y finaliza en el estacionamiento 47 + 400 y que se registró en cada geófono y que se resumen en el siguiente gráfico.

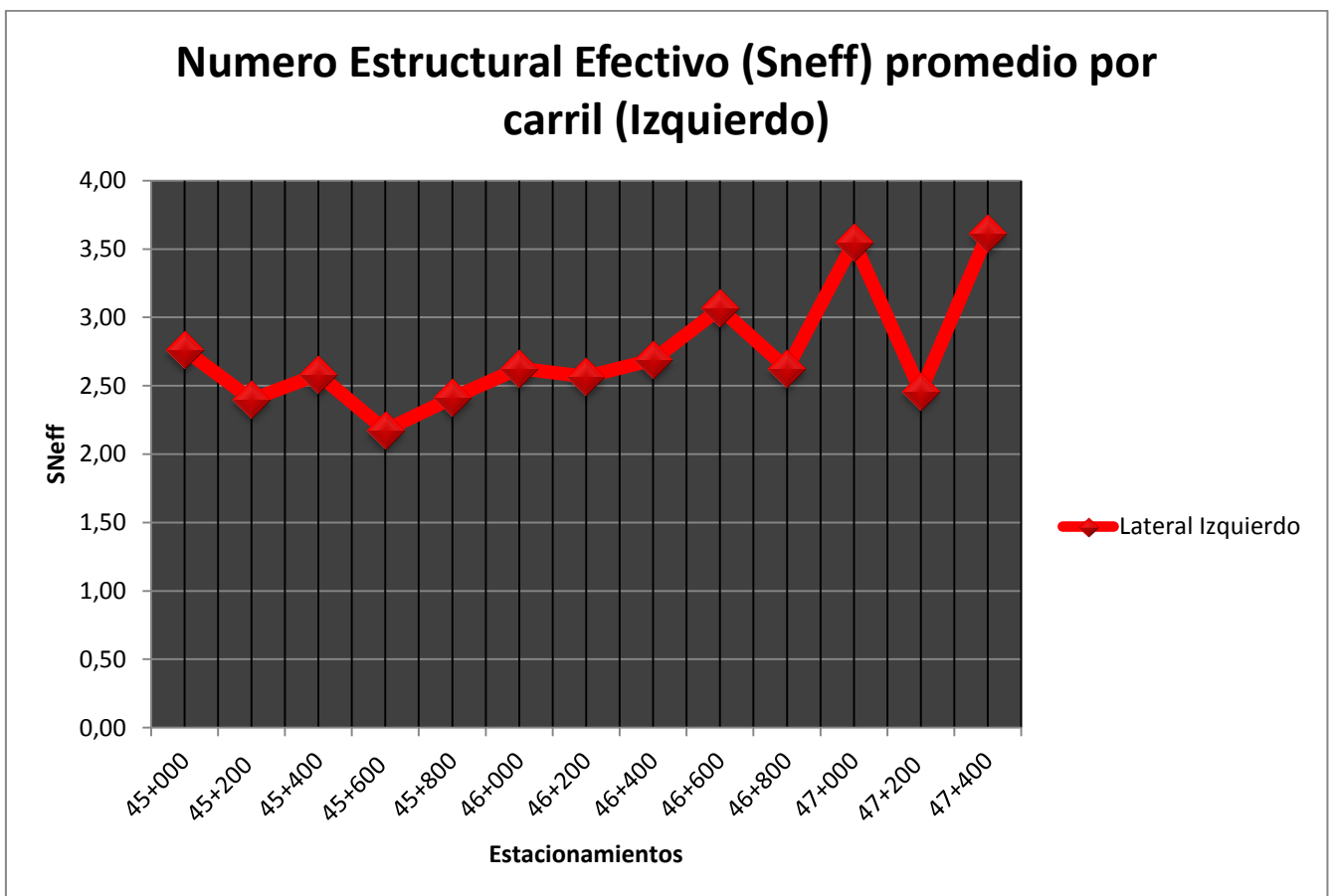


Gráfico 6.29 número estructural carril izquierdo

El comportamiento estructural del carril izquierdo de las capas superiores está representado el número estructural para cada punto evaluado en cada estacionamiento y que se presentan el grafico 5656

El mayor valor de S_{Neff} es 3.61 pulg. En el estacionamiento 47 + 400 el segundo valor es el obtenido en el estacionamiento 47 + 000 y equivale a $S_{Neff} = 3.55$ pulg.

Y el menor valor registrado es el $S_{Neff} = 2.18$ pulg. En el estacionamiento 45 + 600

Los demás valores mantienen un rango de valores que oscila entre 2.41 y 3.07 desde el estacionamiento 45 + 000 hasta el estacionamiento 46 + 600, quedando como excepción a este comportamiento el valor del estacionamiento 45 + 600.

Por lo tanto el valor promedio que representa la condición estructural presente actual en este carril está dado por el siguiente valor **$S_{Neff} = 3.08$ pulg. = 3.0 pulgadas** y es este valor el que por medio de EP que representa las capas superiores define finalmente la condición estructural del pavimento razón por la cual y mediante la recomendación hecha por la tabla 6.312 este valor se clasifica como un valor regular estableciendo de tal manera que la capacidad estructural actual de este carril se encuentra evaluado y definido como regular.

El valor $S_{Neff} = 4.0$ es utilizado en el diseño de pavimentos nuevos y que por lo tanto que el carril izquierdo tenga 3.0 a 11 años aproximadamente de su rehabilitación significa que este posee una buena condición estructural que a su vez también se traduce a su condición funcional.

6.7.3.2 NUMERO ESTRUCTURAL CARRIL DERECHO (S_{Neff})

En la evaluación del carril derecho que conduce de Comalapa hacia Zacatecoluca los estacionamientos que se evaluaron corresponden a los estacionamientos impares que inician en el estacionamiento 45 + 100 y finaliza en el estacionamiento 47 + 500 y que se registró en cada geófono y que se resumen en el siguiente gráfico.

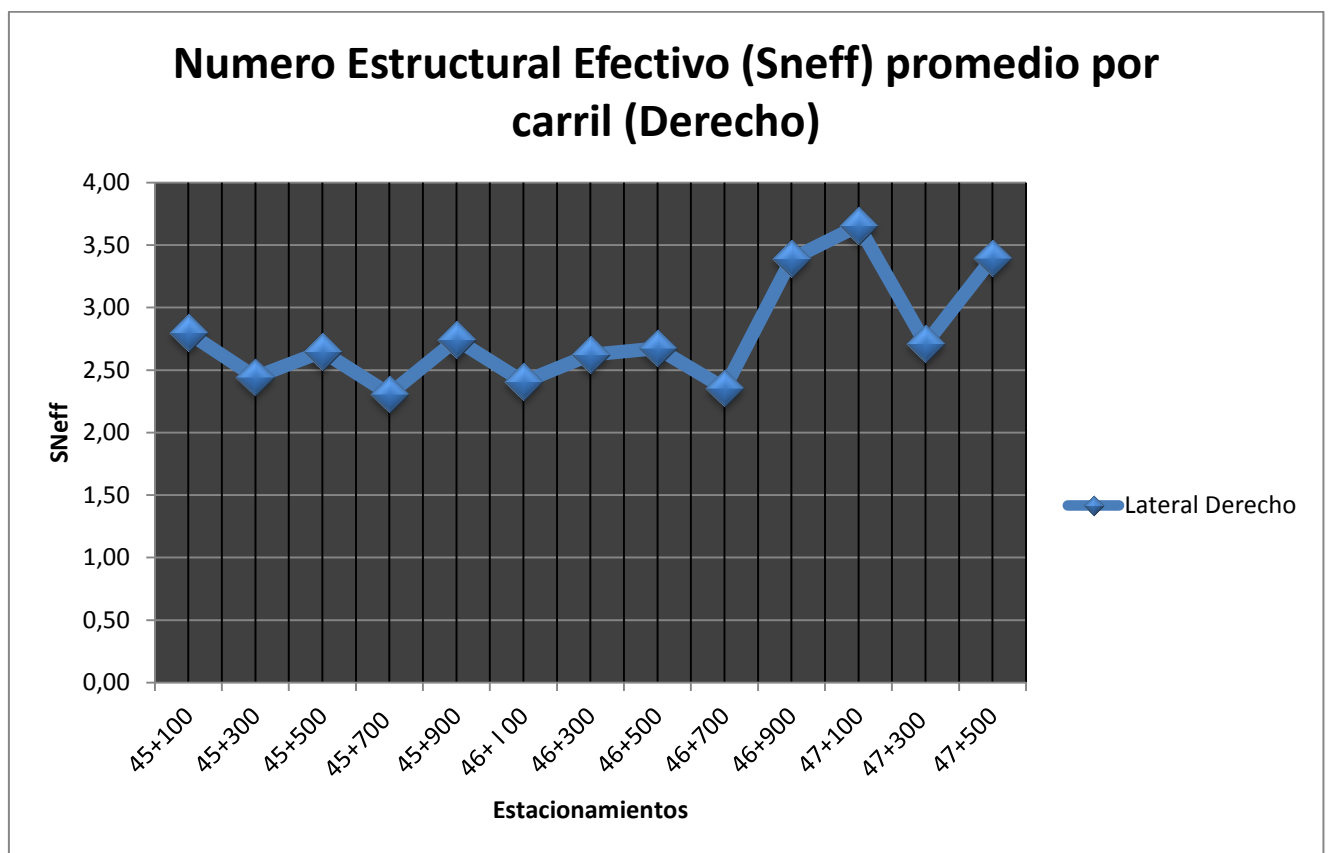


Gráfico 6.30 número estructural carril derecho.

Los valores correspondientes al carril derecho se resumen a continuación:

S_{Neff} máximo = 3.65 pulg. En el estacionamiento 47 + 100

S_{Neff} mínimo = 2.31 pulg. En el estacionamiento 45 + 700

Los valores de los otros estacionamientos no se salen del rango de los S_{Neff} expuestos anteriormente por lo que si se catalogara individualmente estos estarían clasificados desde una subrasante mala hasta una catalogada como regular.

Mientras tanto el valor promedio del S_{Neff} correspondiente a todo el carril derecho equivale a **$S_{Neff} = 3.14$ pulg. = 3.0 pulg.** Este valor es el que permite identificar la condición estructural actual del proyecto que mediante la tabla 6.15 la clasifica como una subrasante con condición estructural regular.

Condición estructural de las carpetas superiores del carril derecho se establece como regular siendo este un valor que igualmente es utilizado para el diseño de muchos proyectos viales nuevos de pavimentos flexibles y que en correspondencia con ello se define que el proyecto en estudio posee características estructurales muy buenas a 11 años aproximadamente desde que se llevó a cabo su reciclado, la colocación del micropavimento hasta esta investigación.

6.7.4 ANÁLISIS DEFLEXIÓN MÁXIMA

Deflexión máxima: representa la deflexión vertical de la superficie del pavimento, bajo el punto donde se aplica la carga. Este parámetro es un indicador general de la condición estructural de los pavimentos, cuyo principal uso es definir tramos que presenten diferentes características estructurales.

El análisis de la deflexión máxima se realizara por la temperatura registrada en cada punto evaluado de cada estacionamiento, para determinar las zonas con diferente condición estructural así como también aquellas que compartan esa condición en cada uno de los carriles en el tramo en estudio.

6.7.4.1 DEFLEXIÓN MÁXIMA CARRIL IZQUIERDO. (d0)

Las valores de la deflexión máxima en el carril izquierdo corresponde a los presentados en el gráfico 6.31 en el que se evalúan mediante la temperatura existente a la hora de la medición en el pavimento y más específicamente en el estacionamiento evaluado. Los estacionamientos para el carril izquierdo son los estacionamientos pares que inicia en el estacionamiento 45 +000 correspondiente al valor de 27.7 °C hasta el estacionamiento 47 + 400 para el valor de 29. 4 °C

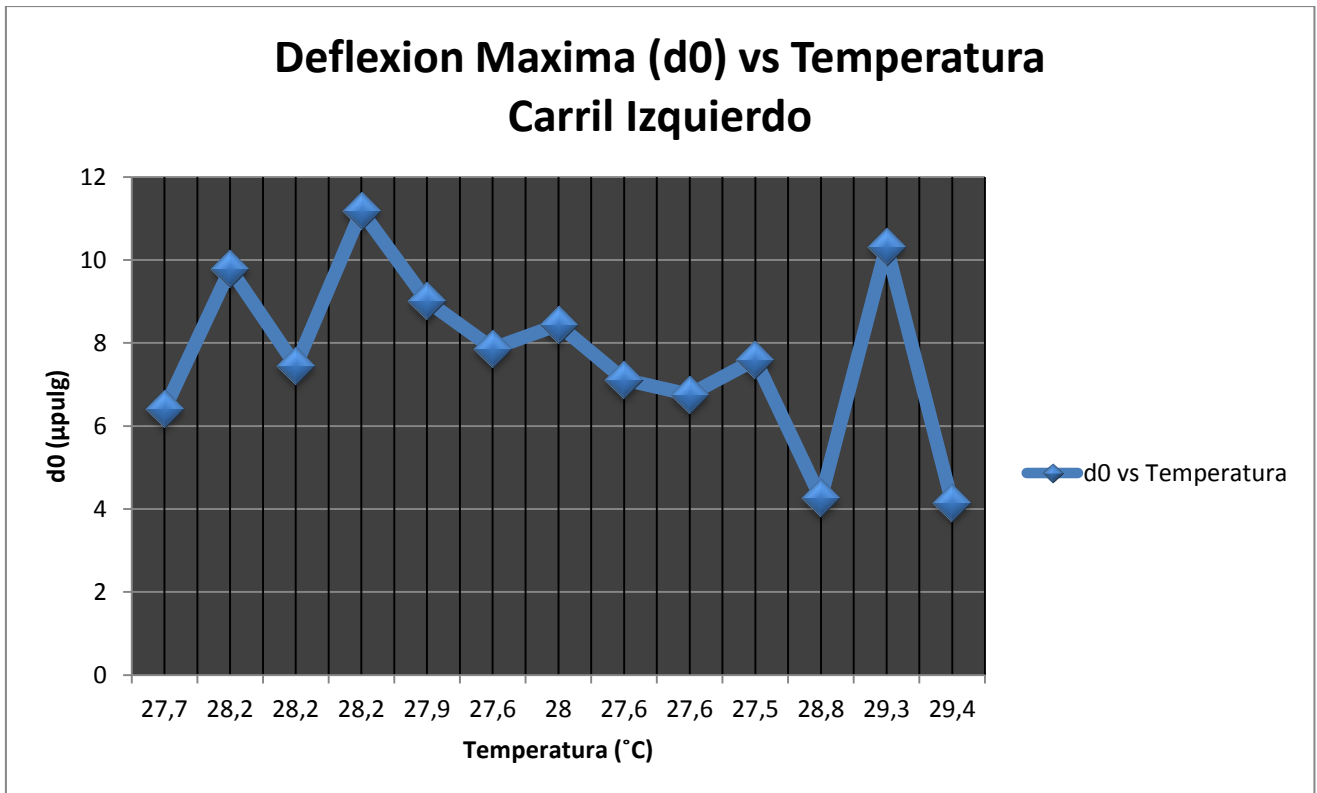


Gráfico 6.31 deflexión máxima carril izquierdo.

El comportamiento de la deflexión con respecto a la temperatura es variable debido a que no se establece que a mayor temperatura mayor deflexión o viceversa. Como se muestra en el punto 45 + 000 con una temperatura de 27.7° C se tiene un valor de 6.41 pulg. Y en el estacionamiento 47 + 400 con una temperatura de 29.4° C un valor de 4.16 pulg.

Para las zonas con una condición estructural similar se da no en estacionamientos seguidos si no alejados entre ellos por ejemplo las zonas con misma condición estructural son las siguientes:

- Para los estacionamientos 45 + 000 y 46 + 400 con $do = 6.41$ y 6.76 pulg.
- Para los estacionamientos 45 + 200, 45 + 800, 46 + 200 y 47 + 200 con valores de $do = 9.78$ pulgadas, 9.01 pulgadas, 8.44 pulgadas y 10.33 pulgadas.
- Los estacionamientos 45 + 400, 46 + 000, 46 + 400, 46 + 800 con valores do correspondientes a 7.45 , 7.87 , 7.12 y 7.60 pulgadas respectivamente.
- Y los últimos puntos son 47 + 000 y 47 + 400 con $do = 4.26$ y 4.16 pulgadas respectivamente, quedando únicamente solo el valor correspondiente al estacionamiento 45 + 600 que registra el valor más alto de deflexión con un $do = 11.18$ pulgadas.

Estableciéndose 4 zonas con diferente condición estructural en este carril.

6.7.4.2 DEFLEXIÓN MAXIMA CARRIL DERECHO. (do)

Las valores de la deflexión máxima en el carril izquierdo corresponde a los presentados en el gráfico 6.32 en el que se evalúan mediante la temperatura existente a la hora de la medición en el pavimento y más específicamente en el estacionamiento evaluado. Los estacionamientos para el carril derecho son los estacionamientos impares que inician en el estacionamiento 45 + 100 correspondiente al valor de 27.7 °C hasta el estacionamiento 47 + 500 para el valor de 30.9 °C

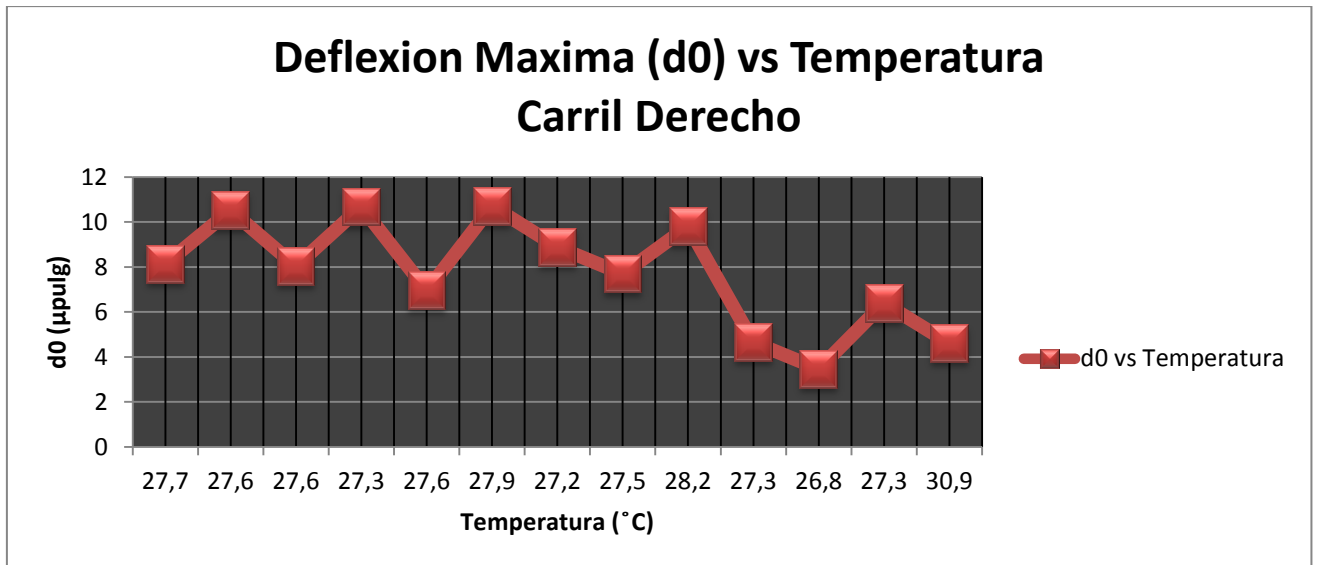


Gráfico 6.32 deflexión máxima carril derecho.

Al igual que para el carril izquierdo el comportamiento de este carril sigue la misma tendencia en función de la temperatura debido a que de igual manera no se puede establecer una relación directa o inversa debido a que la temperatura de 27. 6° C tiene dos valores de deflexión en dos puntos distintos en el estacionamiento 45 + 300 con un d0 = 10. 53 pulgadas mientras que en el estacionamiento 45 + 500 registra un valor d0 = 8.03 pulgadas.

En relación a las zonas con similar condición estructural son las siguientes:

- Los estacionamientos 45 + 100(d0 = 8.13 pulg.), 45 + 500(d0 = 8.03 pulg.), 46 + 300(d0 = 8.89 pulg) y 46 + 500(d0 = 7.69 pulg.) poseen una condición estructural similar con pequeñas diferencias en cuanto al sus respectivos valores de d0.
- Para los estacionamientos 45 + 300 (d0= 10.53 pulg.), 45 + 700(d0 = 10.68 pulg.), 46 + 100 (d0 =10.71 pulg.) y 46 + 700(d0= 9.81 pulg.) que presenta una misma condición estructural.
- Mientras que para los estacionamientos 45 + 900 con un (d0 = 6.95 pulg.), 46 + 900 (d0= 4.66 pulg.), 47 + 100 (d0 = 3.47 pulg.), 47 + 300 (d0= 6.4 pulg.) y finalizando en el último estacionamiento con un d0 = 4.6 pulgadas.

Para este carril se tienen tres zonas con diferente condición estructural.

6.7.5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL COMPARATIVO ENTRE CARRILES

Para cada uno de los carriles estudiados los resultados mostraron cierta similitud en cuanto a los valores obtenidos mediante el análisis de retrocálculo propuesto por la guía AASTHO 1993 que mediante la incorporación del módulo resiliente y el número estructural.

En relación con la condición de la subrasante que es caracterizada por medio del módulo resiliente entre ambos carriles, en el carril izquierdo se obtuvo **MR = 39,383.70 psi** y en el carril derecho **MR= 38,684.21 psi** en la que solo hay una diferencia de **699.49 psi** uno con respecto al otro carril, definiéndose que el carril izquierdo muestra un valor un poco mejor que el derecho en términos puntuales, pero que para clasificación ambos determinan que la condición de cada subrasante es buena.

Mientras que la condición estructural de las capas sobre la subrasante lo determina el número estructural que para el carril izquierdo es de **S_{Neff} = 3.08 = 3.0 pulgadas** y para el carril derecho el valor es **S_{Neff} = 3.14 = 3.0 pulgadas** numéricamente existe una muy pequeña diferencia entre ambos que situaría con una mejor condición al carril derecho en estas capas pero que no obstante en la clasificación del estado estructural medido por esta variable realmente esa diferencia es despreciable razón por la cual al igual que con la condición de la subrasante ambos comparte un mismo estado estructural de estas capas determinado por un valor de **S_{Neff} = 3.0 pulgadas** para cada uno y que los clasifica como un condición estructural regular.

Por lo que ambos en toda su estructura poseen una condición estructural aceptable para el proyecto consideran el tiempo que lleva prestando su servicio a la sociedad.

6.7.6 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PROYECTO

Por los resultados obtenidos en cuanto a la evaluación de la subrasante y del número estructural el proyecto posee en síntesis un módulo resiliente que determina que la subrasante perteneciente al proyecto completo tiene un valor que le permite establecer una condición de buena para la subrasante que en un valor promedio de MR obtuviera **39,033.96 psi** que la igual que para cada uno de los carriles que conforman el proyecto, este como un todo obtendría un valor que caracteriza de una buena condición estructural después de aproximadamente 10 años de su rehabilitación mediante la técnica de reciclado con cemento.

En cuanto al valor de su número estructural este en promedio tendría el valor igual a 3.0 pulgadas que le merece una clasificación de regular para cada una de las capas que están sobre la subrasante y que tiene la capacidad suficiente para soportar las cargas a la que es sometido a diario por cada uno de los usuarios de la misma que van desde vehículo clasificados como livianos hasta aquellos de transporte de carga.

El proyecto se presenta como un proyecto que aún conserva niveles aceptables de funcionamiento estructural en cada uno de los elementos que lo integran y que ha sido evaluado mediante la deflectometría de impacto siguiendo los lineamientos respectivos de la guía de diseño de estructuras para pavimentos AASTHO 1993 y las respectivas normas AASTHO Y ASTM.

CAPITULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

El estado funcional del proyecto establecido mediante el análisis del IRI y el Ahuellamiento establece la condición funcional actual del proyecto que se representa por medio de los resultados obtenidos en cada carril que posteriormente permiten promediar un resultado representativo para todo el proyecto y en cuanto a los resultados obtenidos en la investigación se concluye lo siguiente.

El estado funcional correspondiente al carril izquierdo de acuerdo a la rugosidad dio como resultado un valor de **IRI = 2.17 m/km** que mediante su interpretación lo establece en una condición funcional regular, aun cuando ese valor es aceptado en proyectos viales nuevos.

Mientras que el estado funcional del carril derecho obtuvo como valor de **IRI = 1.97 m/km** que posee una diferencia pequeña con respecto al valor del carril izquierdo presentado una calidad un poco mayor que el carril izquierdo, pero que no obstante se encuentra en el mismo rango de clasificación por lo tanto se concluye que su estado es regular al igual que a la condición funcional del carril izquierdo.

La diferencia del IRI entre ambos carriles es mínima pero representa que ha tenido un mayor desgaste la carpeta de rodamiento del carril izquierdo en comparación con la del carril derecho que sus causas puede ser diversas desde soportar mayor cantidad de tráfico, deficiencia estructural, o mal proceso constructivo.

Por lo tanto el estado de todo el proyecto como un conjunto se resume en su valor de rugosidad que es igual a **IRI= 2.07 m/km** siendo este valor el promedio de ambos carriles y que al igual se encuentra en el mismo nivel de clasificación de estado funcional con respecto a la rugosidad y que se define como regular.

El ahuellamiento, es un fenómeno que tiene su origen en una combinación de factores que se conjugan en el diseño, construcción y servicio. Los análisis realizados muestran que una de las principales causas tiene que ver con los parámetros volumétricos, caracterización de los materiales y la granulometría de la mezcla, además de factores ambientales como la temperatura del pavimento.

Por lo tanto al analizar el ahuellamiento del carril que conduce de Comalapa hacia Zacatecoluca se puede obtener un valor promedio de **0,982 mm** lo cual nos indica que se encuentran en un buen estado funcional y no representa problemas en cuanto a comodidad y serviciabilidad se refiere.

En el carril que conduce de Zacatecoluca hacia Comalapa se obtuvo un valor promedio de ahuellamiento de **1,132 mm** Realizando un análisis comparativo entre carriles, presenta un leve aumento, pero que es imperceptible, con una diferencia despreciable.

Al calcular un valor promedio del tramo de proyecto en análisis se obtiene un valor de **1.057 mm**, este valor representa el ahuellamiento de toda la carretera CA02E, se puede decir que la capa de micropavimento ha cumplido hasta el día de hoy un papel fundamental en el desempeño funcional del firme.

La evaluación estructural del proyecto determinó mediante el análisis de las variables módulo resiliente y número estructural se define de la siguiente manera:

Para el carril izquierdo la condición estructural de la subrasante evaluada mediante el Módulo Resiliente permite concluir que su condición actual es representada por un **MR = 39,383.70 PSI** que mediante una clasificación empírica se le define su condición estructural como regular.

Mientras que el carril derecho presenta un valor de **MR = 38,864.21 PSI** mostrando una diferencia de condición estructural de la subrasante con respecto a la del carril izquierdo pero que también se clasifica con una condición estructural regular.

La diferencia existente entre ambos carriles presenta que el carril derecho a sufrido una leve disminución en su condición estructural, pero que no es lo suficiente para definirla con una condición mala, y que igual que el carril izquierdo tiene la condición suficiente para soportar las cargas a la que es sometida.

Y con esto se concluye que el estado estructural del tramo en estudio a pesar de ser regular debido a que tiene un valor promedio de **MR = 39,033.96 PSI** que también lo define con un estado estructural regular.

En cuanto a la condición estructural de las capas sobre la subrasante y que es determinado mediante el número estructural se define para cada carril de la siguiente manera:

Para el carril izquierdo este valor de **S_{Neff} = 3.08 pulgadas** que lo clasifica en una condición regular, estableciendo que posee aun un nivel estructural aceptable según los criterios de diseño⁴⁰ de pavimentos flexibles que se presenta en la tabla 6.15.

Y para el carril derecho este valor que representa las capas sobre su subrasante tiene un valor igual a **3.14 pulgadas** y que también se encuentra dentro del mismo rango que el carril izquierdo concluyendo por lo tanto su condición estructural en regular y que al igual sigue los mismos criterios de tomados por la guía AASTHO 1993.

En base a esos criterios de diseño es donde se define un número estructural de diseños los cuales se toman con números enteros y que se encuentran en el mismo rango razón por la cual el valor de S_{Neff} de cada carril queda con S_{Neff} = 3.0 pulg.

Por lo tanto al igual que para cada carril el valor promedio que representa a todo el proyecto como un conjunto es **S_{Neff} = 3.0 pulgadas** definiendo aún más su condición estructural de las capas sobre la subrasante se concluye como regular.

⁴⁰ Según guía para el diseño de estructuras de pavimentos, AASTHO 1993 y de la cual también se basa el manual centroamericano SIECA para diseño de pavimentos

En relación entre el estado funcional y estructural se concluye:

La condición funcional y estructural del carril izquierdo posee las siguientes características comunes:

El valor más alto obtenido en este carril de IRI fue en el estacionamiento 46 + 000 que corresponde a $IRI = 3.03$ m/km y los valor registrado de MR en ese punto es igual a $MR = 35,743.19$ psi y su número estructural es igual a 3.07 pulgadas. Demostrando así que hay concordancia entre los valores obtenidos el valor de IRI es clasificado como regular al igual que el del número estructural mientras que el valor del módulo resiliente en comparación con los obtenidos mantiene el rango medio siendo clasificado como bueno.

Mientras que el valor más pequeño de IRI obtenido por este carril es $IRI = 1.6$ m/km y su $MR = 50,938.15$ psi mientras que su número estructural $S_{Neff} = 3.55$ pulgadas todo esto registrado en el estacionamiento 47 + 000, acá existe una diferencia el número estructural es regular mientras que el IRI es bueno y el valor del módulo resiliente lo clasifica como bueno.

Mientras que para el carril derecho se define de la siguiente manera:

El valor de IRI más grande fue registrado en el estacionamiento 47 +000 con un $IRI = 2.72$ m/km mientras que el MR es igual a $36,063.99$ psi y el número estructural $S_{Neff} = 3.55$ pulg. Clasificando funcionalmente este punto con el peor valor de rugosidad con una subrasante regular y un número estructura regular aun así permite establecer que según todos los resultados en este carril fue donde se tuvo los registros con menor clasificación.

Mientras que el valor más pequeño de $IRI = 1.97$ m/km en el estacionamiento 47 + 500 y en este mismo punto se registran un $MR = 46,211.91$ psi y $S_{Neff}=3.40$ pulg. Siendo su clasificación en regular tanto en su valor de IRI como de número estructural a excepción del MR que presenta una mejor condición estructural

Por lo tanto esto permite deducir que en los puntos donde se tuvo menor calidad funcional fue seguida por la misma condición estructural.

En relación al ahuellamiento medido en ambos carriles es clasificado como bueno y que es igual al de todo el proyecto y que en relación con ello los valores obtenidos son despreciables ya que todo el proyecto tiene como valor 1.057 mm cuyo valor es pequeño e imperceptible.

Razón por la cual la técnica de reciclado con cemento empleada en esta carretera presenta como condición estructural regular que al mismo tiempo es igual en su condición superficial, mas sin embargo a pesar de clasificarse como regular este presenta valores que son aceptados incluso para pavimentos nuevos y sin disminución de sus capacidades por el desgaste debido al tráfico y que por ello se determina que la técnica de reciclado ha tenido un desempeño optimo y aceptable a 11 años aproximadamente de haber sido rehabilitada mediante la aplicación esta técnica.

Los resultados obtenidos en este tramo de estudio son representativos de todo el proyecto desde su inicio en la desviación Comalapa hacia Zacatecoluca hasta que finaliza en la rotonda que de acceso a la ciudad de Zacatecoluca y viceversa.

El uso del deflectómetro de impacto y el perfilómetro laser son herramientas que permiten, realizar evaluaciones estructurales y funcionales a los pavimentos y que ha diferencias de las otras metodologías de evaluación en esta se lleva a cabo sin realizar intervenciones que afectan la estructura del pavimento, y además de ello se puede procesar más rápidamente.

A diferencia de los otros métodos no destructivos, esta metodología permite sectorizar un pavimento en zonas con diferentes condiciones estructurales y funcionales dentro del mismo tramo en estudio.

La realización de las pruebas se realizan en mucho menor tiempo que las pruebas destructivas y sin necesidad de detener el tráfico por completo.

7.2 RECOMENDACIONES

- Realizar estudios periódicos para evaluar las condiciones funcionales y estructurales de las carreteras existentes en el país, determinando para ello un periodo de 2 años entre cada inspección para poder determinar futuras intervenciones ya sean mantenimiento, reconstrucciones, rehabilitaciones, y/o reciclado y para que pueda ser utilizado para realizar estudios de factibilidad técnica-económica y, de esta forma, poder asignar prioridad a las obras y así optimizar los recursos.
- Debido a los resultados obtenidos se recomienda el uso de la técnica de reciclado como una alternativa económica debido al aprovechamiento de los recursos y que técnicamente brinda muy buenos resultados para la rehabilitación de carreteras que hayan o estén por cumplir con su periodo de diseño.
- Incentivar el uso del reciclado en el país para la rehabilitación de pavimentos flexibles dañados como una política de protección al medio ambiente y sus recursos pétreos existentes.
- El uso de capas de micropavimento para brindar una mejor protección y drenaje a la carpeta de rodamiento, que asegura directamente la comodidad y seguridad de la carretera.
- El uso de técnicas no destructivas para evitar realizar intervenciones en las estructuras del pavimento como se llevan a cabo mediante las pruebas destructivas para obtener información que lleve a determinar la condición estructural.
- Un estudio económico comparativo entre la técnica de reciclado con cemento y las técnicas de reconstrucción de pavimentos flexibles en El Salvador.

- Aun con la facilidad que estos equipos presentan en la realización de pruebas y su posterior análisis se recomienda que para futuras investigaciones de aspectos estructurales y funcionales considerar que en nuestro país la única institución que posee tal equipo es el MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS específicamente la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial “MOP-UIDV” y no hay ninguna institución privada que la posea debido a su alto costo y que por la agenda de trabajo de dicha institución se hace realmente muy difícil que el equipo esté disponible para la realización de investigaciones de carácter científico.
- En El Salvador hace falta incentivar el uso del deflectómetro de impacto como herramienta de diseño de pavimentos, ayudando a disminuir los tiempos de toma de muestras en campo y en la elaboración de diseños.
- Incorporar el tema de reciclado de pavimentos como temática de estudio dentro del contenido de las materias relacionadas con ingeniería de pavimentos.
- Llevar un control de calidad al construir la carretera, realizando mediciones sobre las distintas capas que conforman la estructura de un pavimento, cuando éstas sean capas estabilizadas, pavimentos flexibles o de concreto rígido, para poder hacer las correcciones necesarias a tiempo y que las lecturas del IRI en la carpeta de rodadura puedan estar dentro del rango requerido.
- Aplicar sanciones a los contratistas si no se cumple con un IRI máximo requerido, asimismo, otorgar premios o bonificaciones si le logra un buen IRI. Este procedimiento es utilizado en Estados Unidos, Europa y otras partes del mundo.

BIBLIOGRAFÍA

- Fredy Omar Pulido Tarazona, 2011, cbr vs deflectómetro de impacto (fwd) para determinar el módulo de resiliencia en la subrasante en el diseño de estructura de pavimento, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.
- Aldo Rene Figueroa Reyes, julio 2009, trabajo de grado “auscultación del monolitismo de pavimentos multicapas mediante deflectómetro de impacto”, Universidad de Chile.
- Ing. Paul Lavaud, Importancia de la regularidad superficial (iri) en la construcción de pavimentos asfálticos en caliente, Director Internacional para Latinoamérica y El Caribe ROADTEC, INC.
- Kyungwon Park, Natacha E. Thomas, and K. Wayne Lee (University of Rhode Island, USA). *Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition*. Technical note. Journal of Transportation Engineering. Vol 133, N° 12, December 1, 2007. ASCE.
- Gillespie, T.D., Septiembre 22-24, 1992 “Everything you always wanted to know about the IRI, but were afraid to ask!”. **Meeting of the Road Profile Users Group**. (Lincoln, Nebraska).
- Sayers, M.S., T.D. Gillespie, C. Queiroz. “International Experiment to Establish Correlations and Standard Calibration Methods for Road Roughness Measurements”. **World Bank Technical Paper 45**. Washington D.C. 1986.
- Montejo Fonseca, 2002, Alfonso, Ingeniería de pavimentos para carreteras, 2ª edición, Universidad Católica de Colombia.

- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, asociación española de la carretera, 2001, Ponencias del 1er Simposio Internacional sobre estabilización de explanadas y reciclado in situ de pavimentos con cemento, salamanca (España), 1 al 4 de octubre de 2001, Madrid (España).
- Universidad Mayor de San Simón, Facultad de Ciencia y Tecnología, 2004, Pavimentos.
- Pérez Loarca, Karla Giovanna Judith, 2005, Uso del perfilómetro inercial con sensores láser para la determinación del IRI y sus aplicaciones en la ingeniería vial, Guatemala.
- USAID/SIECA, 2002, Manual Centroamericano para el diseño de pavimentos, Guatemala.
- SHRP-P-661, 1993, Manual for FWD Testing in the Long-Term Pavement Performance Program, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC.
- 1993, AASHTO Guide for the design of pavement structures, publicada por the American Association of the State Highway and Transportation Officials, Washington DC. USA.
- ASTM D4694-96. "Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device".
- ASTM D4695-96. "Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements".

ANEXOS

ANEXO A

Correlación CBR VS MR

Convenientemente se han reportado factores que pueden ser usados para estimar el Módulo Resiliente (MR) con el CBR, se han dado correlaciones para encontrar el valor del MR con la siguiente ecuación⁴¹:

$$MR = B * CBR$$

Dónde:

Las ecuaciones de correlación recomendadas son las siguientes:

1. Para materiales de sub-rasante con CBR igual o menor a 7,2%

$$MR = 1500 * CBR$$

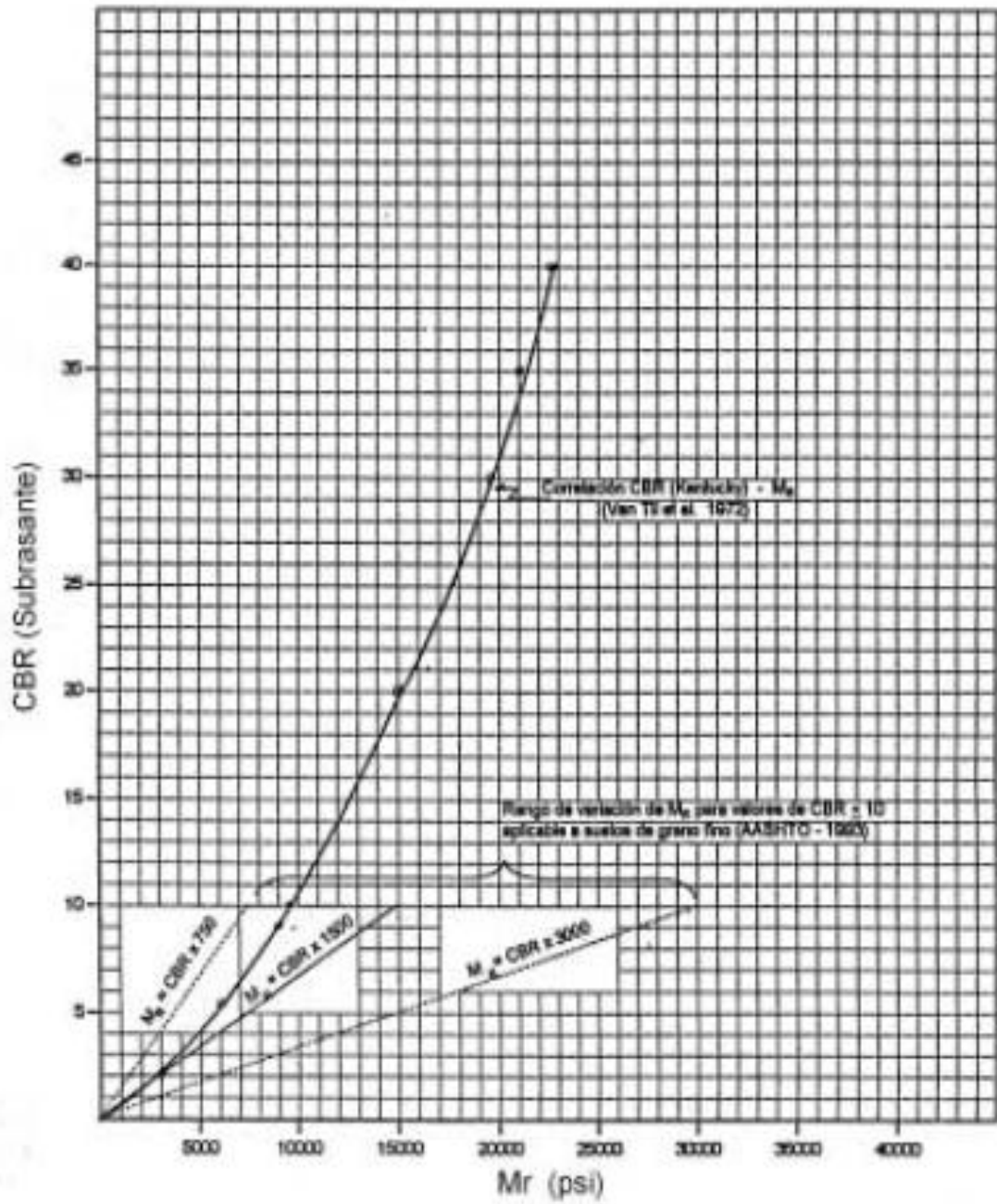
2. Para materiales de sub-rasante con CBR mayor de 7,2% pero menor o igual a 20,0%

$$MR = 3000 * CBR^{0.65}$$

3. Para materiales de sub-rasante con valores de CBR mayores a 20,0%, se deberán emplear otras formas de correlación, tal como la recomendada por la propia Guía de Diseño AASHTO-93:

$$MR = 4326 * \ln CBR + 241$$

⁴¹ Fuente: Van Til, C. J. B. F. McCollough, B. A. Vallerga, and R. G. Hicks. 1,972. Evaluation of AASHTO interim Guides for Design of Pavement structures. NCHRP report 128 [7].



Correlación CBR – MR gráfica de Kentucky

Valores para subrasantes según su CBR⁴².

Concepto	Clasificación según CBR
Subrasante muy pobre	CBR < 3%
Subrasante pobre	3 - 5 %
Subrasante regular	6 – 10 %
Subrasante buena	11 – 19 %
Subrasante muy buena	> 20 %

⁴² Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, Lima, Perú.

ANEXO B

VICEMINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS UNIDAD DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO VIAL Ref. MOPTVDU-VMOP-UIDV-OIR-003/04/2013

San Salvador, 12 de abril de 2013

INFORMACIÓN SOLICITADA POR OFICINA DE INFORMACIÓN Y RESPUESTA (OIR) SOLICITUD DE INFORMACIÓN No. 168

· Software utilizados en los equipos Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD) marca Dynatest, modelo 8000, y Perfilómetro de Referencia Inercial (RSP) marca Dynatest, modelo 5051 Mark III. a. Software: FwdWin, Versión: 2.6.20 Por medio de este programa, se realiza la configuración del equipo Deflectómetro de Impacto (FWD), en el cual se establece entre otros aspectos los siguientes: Carga de impacto que se aplicará a la estructura de pavimento que será evaluada, Disposición de los geófonos que registran las deflexiones de la superficie del pavimento, Número de impactos de la carga establecida, entre otros. b. Software: RspWin, Versión: 2.6.20 Por medio de este programa, se realiza la configuración del equipo Perfilómetro Inercial (RSP), en el cual se establece entre otros aspectos los siguientes: Cantidad de láser que se utilizarán en las mediciones, Intervalo de almacenamiento de los registros (desde 25 mm hasta 1.6 km), Registro de Índice de Regularidad Superficial (IRI), Ahuellamiento, Escalonamiento, Perfil longitudinal, Índice de

Perfil, entre otros. · Manera y método de calibración de los equipos RSP y FWD, antes de cada prueba Los equipos Perfilómetro Inercial y Deflectómetro de Impacto, son calibrados anualmente por personal de

La empresa fabricante (Dynatest). a. En general, la calibración del equipo Perfilómetro Inercial (RSP), se realiza con base en la norma ASTM E950M “Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference”. Cabe indicar que previo a la ejecución de un ensayo, no es necesario realizar calibraciones

adicionales; sin embargo, antes de comenzar la recolección de datos, se realizan verificaciones del buen funcionamiento de sus componentes principales (odómetro, láser, acelerómetro, otros). b. La calibración del equipo Deflectómetro de Impacto (FWD), se realiza con base en la AASHTO R32 "Practice for Calibrating the Load Cell and Deflection Sensors for a Falling Weight Deflectometer". No es necesario realizar calibraciones adicionales al equipo, antes de iniciar la ejecución de los ensayos; no obstante lo anterior, se realizan verificaciones periódicas del buen funcionamiento de cada uno de los componentes del equipo (geófonos, celda de carga, odómetro, otros).

- Altura de caída del peso en el Deflectómetro de Impacto. El principio de funcionamiento del Deflectómetro de Impacto se basa en la generación de un impulso de carga sobre la estructura de pavimento, lo cual se obtiene mediante el impacto provocado por la caída libre de una masa sobre un sistema de amortiguación instalado sobre una placa de carga en contacto con el pavimento; la altura de caída de la masa es variable, y depende de la carga que se requiera aplicar en la estructura de pavimento, dicha altura puede variar entre 50 mm y 390 mm. La información indicada en este documento, debe ser utilizada por el solicitante únicamente para los fines académicos correspondientes, en calidad de Estudiante Universitario.

VICEMINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS UNIDAD DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO VIAL Ref. MOPTVDU-VMOP-UIDV-OIR-002/01/2013

San Salvador, 07 de enero de 2013

INFORMACIÓN SOLICITADA POR OFICINA DE INFORMACIÓN Y RESPUESTA (OIR) SOLICITUD DE INFORMACIÓN No. 93

- FOTOGRAFÍAS E INFORMACIÓN GENERAL SOBRE LOS EQUIPOS PERFILÓMETRO INERCIAL (RSP) Y DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD)



- Marca: Dynatest
- Modelo: 5051 RSP Mark III
- Sensores Láser: 5
- Clase 1

Equipo Perfilómetro Inercial (Road Surface Profiler)



- Marca: Dynatest
- Modelo: FWD 8000
- Geófonos: 9
- Rango de carga: 7-120 KN

Equipo Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer)

NOTAS: · Los equipos Perfilómetro Inercial y Deflectómetro de Impacto, son calibrados anualmente por personal de la empresa fabricante Dynatest. · Información adicional sobre este tipo de equipos, puede ser descargada gratuitamente de sitios web de organismos internacionales de carreteras, tales como la Federal Highway Administration (www.fhwa.dot.gov), FWD User's Groups (pms.nevadadot.com), Departamentos de Transporte de los Estados Unidos de

América, Transportation Research Board (www.trb.org); así como en el sitio web del fabricante Dynatest (www.dynatest.com). -

MANTENIMIENTO RUTINARIO DE VÍAS TIPO ESPECIAL NO PAVIMENTADAS	
PROYECTO (CONTRATISTA):	MANTENIMIENTO PERIÓDICO DE LA RUTA CA02E TRAMO RN05 INCLUYE ROTONDA, UBICADO EN ZACATECOLUCA, DEPARTAMENTO DE LA PAZ.
CONTRATISTA:	DISA, S.A. DE C.V.
MONTO TOTAL:	\$1,674,200.84
PROYECTO (SUPERVISOR):	SUPERVISIÓN DEL MANTENIMIENTO PERIÓDICO DE LAS RUTAS: EJE CERO NUEVE, EJE CUARENTA Y DOS (AMSS) Y RN CERO SIETE W , TRAMO DV.SAL TREINTA Y SIETE N -ZONA EL JABALÍ, CA CERO DOS E, TRAMO: RN CERO CINCO- ZACATECOLUCA
SUPERVISOR:	CONSULTA, S.A. DE C.V.
MONTO TOTAL:	\$229,104.94 (PARA TRES PROYECTOS)
PLAZO CONTRACTUAL:	7 MESES
ORDEN DE INICIO:	18 DE ENERO DEL 2011
FECHA FINALIZACIÓN:	15 DE AGOSTO DEL 2011
LONGITUD O UBICACIÓN:	25.35 KMS



DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto lo conforma el tramo carretero de la ruta CA02E, iniciando en la intersección de la ruta RN05, aproximadamente en el km 40.215 de la CA02E, y finalizando en la rotonda de entrada de Zacatecoluca, incluyendo la rotonda en el km 64.300 de la CA02E.

La longitud del proyecto de acuerdo al levantamiento topográfico de la vía es de 24.989 km, incluyendo la rotonda.

El tramo carretero del proyecto es una vía de dos carriles, uno por sentido de circulación, de 3.50 mts. De ancho por carril. La topografía del terreno es de plana a ondulada, con alineamiento predominante recto, encontrándose alrededor de 10 curvas.

La estructura de pavimento existente es de concreto asfáltico, conformada por una base estabilizada con cemento de aproximadamente veinte (20) cms de espesor, y una carpeta de rodaje de concreto asfáltico variando entre 8.5 y 9 cms de espesor. El mantenimiento periódico del tramo de carretera del presente proyecto, consiste en: La colocación de un micropavimento, definiéndose por micropavimento como "una mezcla compuesta por emulsión asfáltica modificada por polímeros, 100% agregados triturados, finos minerales, agua y otros aditivos, debidamente proporcionados y tendidos en una superficie apropiadamente preparada". El espesor del micropavimento es de 15 mm, de acuerdo a especificaciones técnicas del proyecto, de granulometría tipo III. La temperatura del micropavimento es ambiente. Las zonas con presencia de daños que a criterio del contratista y aprobación de la supervisión, no fueron solventadas con la aplicación del micropavimento, si no por el contrario afectan el buen desempeño del micropavimento colado, fueron reparadas con la aplicación de una mezcla asfáltica para bacheo y base para bacheo. En el subtramo comprendido entre las estaciones 22+305 y 22+560, se realizó un perfilado de la carpeta asfáltica existente y la colocación de una nueva carpeta, también de concreto asfáltico.

ANEXO C

Deflectómetro de impacto

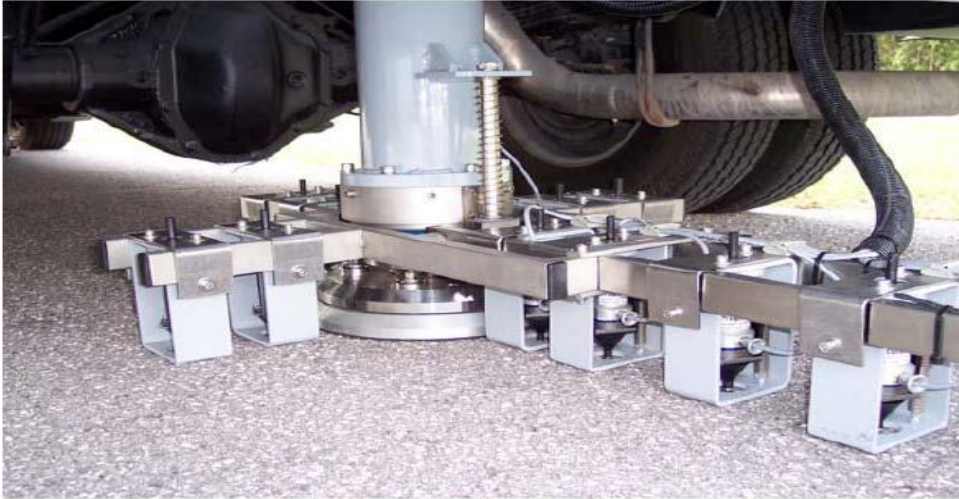
Dynatest ha ampliado su producción del Deflectómetro montado en un vehículo (Vehicle Mounted Deflectometer, VMD), para incluir ahora el modelo 8000 de Deflectómetro Montado en Camioneta (Truck Mounted Deflectometer, TMD). Para optimizar la vida útil del producto, Dynatest evolucionó el diseño para permitir la futura conversión y hacer relativamente sencillo el proceso de intercambiar a un nuevo vehículo al finalizar el ciclo de vida del vehículo original, o el montaje a un carro si así lo prefiere. El TMD Dynatest es particularmente adecuado para entornos que requieren plataformas de ensayo más cortas (sin reducir el cuenco de deflexiones) o cuando la compra de un vehículo independiente para el FWD o las operaciones con vehículo-remolque son problemáticos.

Al igual que con todos los miembros de la línea de productos Deflectómetro y Deflectómetro Pesado (FWD y HWD), el TMD ofrece mediciones totalmente automatizadas, rápidas, de alta precisión y adecuadas para su uso con procedimientos estándar de análisis y diseño, incluyendo especialmente riguroso análisis mecanicista-empírico de las estructuras de pavimento, tales como el programa ELMOD de Dynatest (*Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design*).



El TMD Dynatest provee todas las capacidades de un FWD montado en tráiler integradas en una camioneta

El TMD es parte de la línea de productos y servicios Dynatest, fiable y probada, siempre en evolución y con todo el apoyo que permite una comprensión y manejo analítico/empírico de sistemas de pavimento y redes conocido como la Metodología Dynatest. Esta metodología apunta científicamente a entender y modelar las estructuras de pavimento en un forma similar a otras estructuras de ingeniería civil. El uso de un TMD Dynatest permite al ingeniero determinar el cuenco de deflexión generado por una carga de tráfico simulado controlado con un nivel de precisión en la medición absoluta y relativa de carga / deformación sin igual en la industria y que son garantizados medición tras medición. Para la sociedad es de una importancia económica considerable la selección a implementar en un cierto pavimento, o en toda una red de pavimentos, de entre los muchos tipos posibles de rehabilitación. Llegar a esas decisiones sin un conocimiento adecuado de las condiciones estructurales y de funcionamiento del sistema de pavimento bajo cargas de tráfico, como se hace con el TMD Dynatest, puede tener consecuencias muy costosas en el tiempo



Ventajas

- Se ajusta a una camioneta Ford F-350 estándar de rueda trasera simple o doble, agregándole una caja pickup de trabajo.
- Energizado con el alternador del vehículo (s).
- Cumple con el protocolo de calibración FHWA
- Son estándar en el Dynatest TMD: la temperatura del aire, la temperatura de la superficie del pavimento, el instrumento de medición a distancia (DMI) y placa de carga de 4 segmentos y 300 mm de diámetro, con rotación (para ensayar superficies de pavimento irregular o ahuelladas).

Reducción de datos TMD

Datos generados por TMD/FWD/HWD combinados con los espesores de capa, pueden ser utilizados con confianza para obtener los módulos resiliente E "in-situ" de una estructura de pavimento. Esta información a su vez puede ser utilizada en un análisis estructural para determinar la capacidad de carga, la estimación de vida útil, y calcular el recapeo requerido, si corresponde (para la vida de diseño deseada).

Productos de software para análisis y diseño estructural

Para fines de análisis de rutina, Dynatest ha desarrollado un sistema de software, ELMOD, para pavimentos flexibles y rígidos. Esta aplicación de software permite la reducción de datos extremadamente rápida y el análisis de mediciones TMD/FWD/HWD, el cálculo de E-módulos de las capas para una serie de caídas típicas en un segundo o menos. También se calculan en cuestión de segundos los módulos E ajustados por estacionalidad, la vida residual, y los recapeos necesarios (si procede). Para el análisis de pavimentos para aviación, Dynatest ofrece un programa que calcula rápidamente los valores de PCN de acuerdo con el método ACN / PCN, como se describe en los manuales de diseño de la OACI.

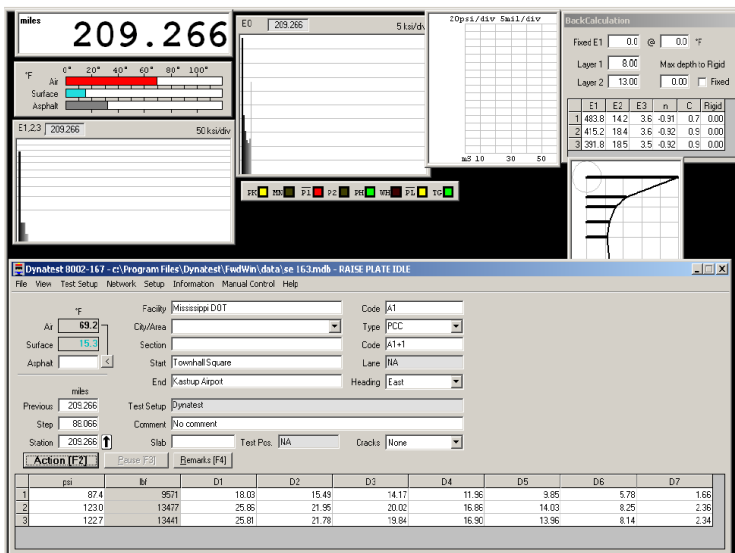


Figura d-1. ELMOD software para el procesamiento de los datos.

FWDWin para Windows™ Múltiples idiomas (incluido español)

Archivos de datos:

Los datos se guardan en bases de datos Access™ (.mdb) para facilidad de procesamiento.

El programa puede generar simultáneamente varios formatos:

- fwd, *.f20, *.f25, *.PDDX Pavement Deflection Data eXchange (PDDX by AASHTO) , *.XML eXtensible Markup Language (XML by W3C).
- 15 sensores de deflexión activos (piezas adicionales)
- Gráficos del módulo de superficie pueden ser generados en tiempo real a lo largo de la via evaluada
- Retroanálisis en tiempo real
- Base de datos de la red de pavimentos

Ventajas

- Un dispositivo de ensayo no destructivo.
- Operable por una sola persona.
- Preciso y rápido (hasta 60 puntos de prueba / hr).
- Amplia gama de carga: FWD / TMD: (7-120 kN) o (1,500-27,000 lbf).
- Diseñado para aplicaciones de pavimentos de usos múltiples, que van desde caminos sin pavimentar a aeropuertos.
- Excelente repetibilidad.
- Ideal para análisis mecanicistas/empíricos.

Opcionales:

- Sistema de posicionamiento global DGPS
- Imágenes del derecho de via y/o pavimento en definición estándar o alta definición
- Barra de extensión de sensores hacia adelante o adelante y al lado, para ensayar juntas
- Seguros automáticos de transporte
- 15 sensores de deflexión activos (7 es lo estándar)
- Luz de advertencia/seguridad

PERFILOMETRO LASER

GENERAL:

El Sistema de Prueba (el "Sistema") del Perfilómetro de Superficie de Rodamiento (RSP, por las siglas en inglés de "*Road Surface Profiler*") deberá ser un modelo nuevo que corresponderá a la producción anunciada actualmente. El fabricante del Sistema deberá tener un inventario completo de refacciones y un historial bien establecido de soporte técnico. El Sistema deberá incluir todo el equipo estándar anunciado, independientemente de que éste sea citado en el presente documento, y la garantía estándar del fabricante. El Sistema consistirá en al menos un acelerómetro y un láser óptico de para la medición de distancias (denominado "Transductor"), sistema de montaje, (por ejemplo, Barra de Transductores), incluyendo un paquete electrónico adaptado apropiadamente para el registro de las señales del transductor, incluyendo un paquete de hardware y software para la grabación automática y procesamiento de datos preliminar en terreno. El Sistema será capaz de ser montado en un vehículo de tamaño razonable, como por ejemplo, minivan o van tamaño completo (furgón o furgoneta).

El sistema deberá ser capaz de medir, calcular en tiempo real, mostrar en pantalla, y almacenar (en el disco duro del computador) los datos de perfil longitudinal y rugosidad de carretera en ambas trazas de rueda o también llamadas huellas, y/o los datos de ahuellamiento (en el caso de tres o más sensores láser), además de la posición del vehículo (metraje) y velocidad (opcionalmente datos de textura en una o las dos trazas de rueda o huellas) como se describe en el en las secciones siguientes.

El Sistema deberá cumplir con los requisitos para un dispositivo perfilométrico de la "Clase 1", de acuerdo con lo estipulado en la norma ASTM E 950-94, "*Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with An Accelerometer Established Inertial Profiling Reference*" ("*Método Estándar de Prueba para Medir el Perfil Longitudinal de Superficies Recorridas por Medio de*

Un Perfil Inercial Establecido con Un Acelerómetro) y el Artículo Técnico Núm. 46 del Banco Mundial “*Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*” (“*Lineamientos para Realizar y Calibrar Mediciones de la Irregularidad Superficial de los Caminos*”).

El sistema se diseñará como un producto modular, ampliable de manera tal que futuras actualizaciones pueden realizarse sin modificación significativa en las partes mecánicas y electrónicas o el paquete de software. Actualizaciones se definen como la adición de combinaciones de sensores acelerómetro/láser para permitir medición del perfil (y, opcionalmente, textura) en ambos wheelpaths, o la adición de sensores de láser (para obtener un total de hasta 13 (o hasta 21 mediante pedido especial)) para permitir la medición de Perfil transversal. Además, un IMS (sensor de movimiento inercial, para medición de la pendiente transversal, la pendiente longitudinal y el grado de curvatura) y se pueden agregar un DGPS (sistema de posicionamiento global diferencial).

DETALLADAS:

1 Requisitos generales operacionales

- 1.1 El sistema deberá ser operable por una sola persona (es decir, el conductor del vehículo).
- 1.2 El sistema deberá ser operable en carretera velocidades de hasta 115 km/h (70 m.p.h.), para permitir su operación segura en terreno en medio del tránsito vehicular.
- 1.3 El sistema deberá estar diseñado y construido para operar satisfactoriamente en el ambiente adverso de un vehículo de prueba.
- 1.4 El sistema funcionará satisfactoriamente bajo todas las condiciones típicas de clima seco dentro de los rangos de temperatura especificados a continuación.
- 1.5 El sistema deberá ser capaz de operar en un rango de temperatura de 0°C a + 40°C (+ 32°F a +105°F) fuera del vehículo y +5° C a + 40°C (+40°F a +105°F) dentro del vehículo, siempre que no se presente humedad por condensación.

- 1.6 El único requisito de alimentación eléctrica del sistema deberá ser disponer de una tensión eléctrica nominal de 12 VDC (10.5 to 14.5 VDC), suministrada desde el sistema eléctrico del vehículo motriz.

2 Barra de Transductores

- 2.1 La Barra de Transductores deberá ser una viga de uso rudo, desde el punto de vista mecánico, hecha con material resistente a la corrosión, tal como el aluminio pintado o anodizado y ésta deberá alojar un (1) sensor láser, opcionalmente hasta once (11) sensores láser (o hasta veintiuno (21) mediante orden especial) y un (1) acelerómetro, opcionalmente hasta tres (3).
- 2.2 Los transductores serán en la forma de módulos fácilmente extraíbles / intercambiables.
- 2.3 Dos de los módulos de sensores láser se colocarán sobre las huellas de la rueda izquierda y derecha, a una distancia lateral de 700 a 965 mm (27,5 a 38,0 pulgadas) de la línea (longitudinal) central del vehículo, con el fin de proporcionar datos de desplazamiento necesarios para el cálculo de perfiles longitudinales, IRI (Índice de Rugosidad Internacional) y RN (Ride number) en una (opcionalmente dos) huella(s).
- 2.4 La Barra de Transductores deberá tener la capacidad de alojar dos acelerómetros de alta precisión para registrar con precisión el movimiento vertical de los dos sensores láser en las huellas (y, opcionalmente, el láser de centro) respectivamente.
- 2.5 Serán los acelerómetros fácilmente desmontables para calibración o reemplazo.
- 2.6 La Barra de Transductores deberá proporcionar protección para los sensores láser, los acelerómetros y las conexiones de cables/enchufes contra condiciones climatológicas normales, tales como la lluvia (véase también 1.5 y 6.4).

- 2.7 La distancia nominal vertical libre entre la base de la Barra de Transductores y la superficie del pavimento no deberá ser menor de 280 mm (11 pulgadas) en la posiciones de transporte y medición.

3 Transductores

- 3.1 Los sensores láser de desplazamientos deberán tener un intervalo de medición de cuando menos 200 mm (7-7/8 pulgadas); es decir, ± 100 mm ($\pm 3-15/16$ pulgadas), a partir de la posición intermedia (la cual es la posición nominal de medición; es decir, la posición a largo plazo de promedio igual a "cero"). El o los sensores láser opcionales para la textura deberán tener un intervalo vertical de medición de cuando menos 180 mm (7 pulgadas).
- 3.2 La resolución para la medición del desplazamiento vertical de los sensores láser deberá ser menor que o igual a 0.05 mm (± 2 milésimas de pulgada).
- 3.3 Los sensores láser deberán tener la capacidad de realizar cuando menos dieciséis mil (16,000) mediciones de desplazamiento por segundo. El o los sensores opcionales de textura deberán tener la capacidad de efectuar cuando menos sesenta y dos mil (62,000) mediciones de desplazamiento por segundo.
- 3.4 Los acelerómetros verticales deberán tener un intervalo de medición de ± 4 g en un rango de frecuencias mínimo de cero (0) Hz a 300 Hz (-3 dB). Por debajo de 50 Hz, la precisión de medición estará en un rango de ± 1 % del valor medido o $\pm 0,003$ g máx., el que resulte mayor de los dos
- 3.5 Se deberá suministrar un conjunto digital de codificación (odómetro), enlazado mecánicamente a una de las ruedas del vehículo, cuya función será la de proporcionar información digital adecuada de distancia/velocidad al procesador electrónico de señal.

4 “Hardware/Software” para el Procesamiento de la Señal

- 4.1 Se deberá suministrar junto con el Sistema un paquete electrónico que conste de una Unidad de Procesamiento Electrónico (Data Processing Unit, DPU) autónoma y un TPM (Transducer Power Module). La UPE debe incluir dentro una computadora tipo PC de una sola tarjeta y un Procesador de Señal Digital (PSD) con acondicionador de señal de multi-procesos y placa(s) de expansión ISA de circuitos integrados, en adelante llamados PSB(s) (Profiler System Board(s)).
- 4.2 Para hasta 5 sensores láser en total, una sola PSB deberá ser necesarios en el DPU. Para casos con hasta 13 sensores láser (hasta 13 en total), se añadirá otro PSB y un SCM (Secondary Connection Module)). Un tercer PSB y un segundo SCM se añadirán en el caso de tener más de 13 de sensores láser (hasta 21).
- 4.3 El TPM, PCM (y SCM(s), si fuera necesario) se montarán en la Barra de Transductores. Sólo la pequeña unidad independiente DPU deberá ser necesarios en el vehículo (es decir, no se necesita un rack electrónico), aparte del operador del equipo y un PC portátil, consulte la sección 5.
- 4.4 El TPM deberá proporcionar toda la energía eléctrica necesaria para el (los) sensor(es) láser y el (los) acelerómetro(s).
- 4.5 El PCM y DPU deberán proporcionar el acondicionamiento de señal y los elementos para muestreo (hardware y firmware) para todos los láser, acelerómetros y el codificador de distancia.
- 4.6 El DPU tomará muestras de la señales de los sensores láser y acelerómetros a una tasa de no menos de 16 kHz (correspondiente a menos de 2 mm (0,08 ") de distancia viajada por el vehículo entre muestras a cualquier velocidad hasta 110 Km/h (70 mph)). La señal de el (los) sensor(es) opcional(es) de textura se tomará con láser con frecuencia de muestra de 62,5 kHz.

- 4.7 El DPU deberán se comunicará con el PCM (y SCM(s), si se aplica) en la Barra de Transductores por medio de cable(s) estándar SCSI, uno para cada PSB.

5 Sistema de grabación de datos

- 5.1 El Sistema deberá incluir una computadora personal (PC) compatible con la IBM, ya sea de escritorio, portátil, “laptop” o “notebook” con Windows XP®, con un mínimo de 256 MB de memoria RAM, un mínimo de 30 GB de disco duro, una unidad para grabar discos compactos y un puerto Ethernet.
- 5.2 Se deberá suministrar el Programa de Recolección de Datos RspWin, basado en Windows® (incluidos todos los archivos requeridos de parámetros y los programas de configuración), el cual deberá facilitar el control total de las operaciones de prueba y de los procedimientos de calibración desde el teclado de la PC.
- 5.3 La PC conjuntamente con RspWin deberán tener la capacidad de comunicarse con la DPU sólo mediante el cable de red Ethernet y deberá transmitir todos los datos necesarios de configuración a la DPU cuando inicie el Sistema. Durante las pruebas con el Sistema deberá recibir todos los datos procesados de la medición de la UPE para procesamiento posterior, mostrarlos en la pantalla de la PC y almacenarlos en el disco duro de la PC. Con base en el denominado “Método de Dakota del Sur”, la DPU/PC deberá calcular – en tiempo real – el perfil longitudinal de una rodada de medición (opcionalmente ambas rodadas y la línea central) a partir de las señales muestreadas de los sensores láser y acelerómetros que se encuentran instalados para tal fin en la Barra de Transductores. Se deberá poder seleccionar el intervalo de presentación de resultados a aproximadamente 25 mm (1 pulgada) o más (típicamente 100 mm (4 pulgadas) o 150 mm (½ ft)).

- 5.4 La DPU/PC deberá realizar cálculos en tiempo real del IRI (Índice Internacional de Irregularidad Superficial) de acuerdo con los lineamientos del Banco Mundial y del RN (Número de Calidad de Manejo), para ambas rodadas. Los datos de IRI y RN deberán ser mostrados en la pantalla de la PC y almacenados durante las pruebas.
- 5.5 La DPU/PC deberá (opcionalmente) efectuar cálculos en tiempo real de índices de la macrotextura, tales como la MPD (Profundidad Media del Perfil) y la RMS (Raíz Cuadrada de la Media de los Cuadrados). Los índices deberán ser mostrados en la pantalla de la PC y almacenados durante las pruebas.
- 5.6 El DPU/PC deberá (opcionalmente) proporcionar cómputo en tiempo real de grado (tono), Cruz Slope (Roll), Turn Rate (Tasa de guiñada), encabezado y Crossfall de Pavement. Índices se mostrarán en la Pantalla de PC y almacenados durante las pruebas.
- 5.7 El DPU/PC (opcionalmente, deberá mediante la adición de un sistema de receptor de GPS) proporcionará almacenamiento de información en tiempo real de Datos GPS.
- 5.8 Una célula fotoeléctrica (opcional) Dispositivo permitirá el inicio y/o parada automáticos de la recolección de datos mediante la colocación de cinta reflectante en el pavimento. También deberá habilitar grabación de ubicaciones de cinta reflectante en el pavimento durante la recopilación de datos.
- 5.9 El Programa de Campo deberá permitir al operador del Sistema el ingreso de parámetros de operación y de otros datos, tales como:
- Metraje inicial y final de la estación de la sección de pavimento a evaluar
 - Metraje creciente o decreciente durante las pruebas.
 - Longitud de onda del filtro de perfil longitudinal
 - Intervalo de informes del IRI
 - Intervalo de informes de ahuellamiento (para sistemas con 3 sensores láser o más)
- Nombres de archivo de datos

- 5.10 Deberá ser posible la selección de un filtro para el perfil longitudinal con una longitud de onda de cuando menos 150 m (500 ft).
- 5.11 Deberá ser posible seleccionar el intervalo de presentación de resultados del IRI y RN desde 10 m (o 30 ft) hasta 1 km (o 1 milla).
- 5.12 Deberá ser posible seleccionar (opcional) intervalos de informe de ahuellamiento en el rango de 1 m (o 3 pies), hasta 1 km (o 1 milla).
- 5.13 Durante la recolección de datos, el operador deberá tener la opción de ingresar “Marcas de Observaciones” desde el teclado de la PC. Las teclas oprimidas deberán quedar almacenadas junto con su ubicación respectiva.
- 5.14 Todos los datos se almacenarán en formato ASCII.

6 Precisión de Desempeño y Calibración

- 6.1 Típicamente, el Sistema deberá cumplir con un error de repetición de los datos del IRI menor al 5% (coeficiente de variación) o de 0.1 m/km (6 in/milla) (desviación estándar de la muestra), el que resulte mayor, para 10 mediciones, en tramos de prueba con una longitud mínima de 160 m (0.1 millas).
- 6.2 La distancia mostrada y almacenada con los datos de las pruebas deberá tener una precisión dentro de $\pm 0.1\%$ o 1.6 m (5.3 ft) de la distancia real, la que resulte mayor, para un tramo de prueba de 1,610 m (5,280 ft) de longitud, bajo la condición de que la medición comience exactamente en el Cadenamiento inicial predefinido. La distancia deberá ser mostrada en la pantalla de la PC con dígitos agrandados, a una resolución de 1 m (0.001 km) o 1 ft.
- 6.3 La velocidad de circulación deberá ser mostrada en la pantalla de la PC con dígitos agrandados, con una resolución de 0.1 km/h (o 0.1 m.p.h.) y deberá tener una precisión de ± 0.5 km/h (± 0.3 m.p.h.).

- 6.4 Equipos, procedimientos y software necesarios para realizar la calibración (estática) de los sensores de láser y acelerómetros y calibración de campo de medición de distancia serán incluido con el sistema.
- 6.5 Se deberán incluir con el Sistema el equipo, los procedimientos y el “software” necesarios para realizar la calibración (estática) de los sensores láser y acelerómetros, así como la calibración en campo de la medición de distancias.

7 Documentación

- 7.1 Se deberán suministrar dos (2) juegos completos de los Manuales del Usuario, por parte del fabricante, los cuales deberán incluir un juego de dibujos y diagramas, con excepción de la computadora seleccionada y cualquier componente electrónico con derechos especiales. Este requisito deberá hacerse extensivo a todo el equipo, de tal manera que el comprador pueda operar y mantener el Sistema apropiadamente.
- 7.2 Todas las piezas electrónicas con derechos especiales deberán estar disponibles de inmediato por parte del fabricante como refacciones y deberán ser intercambiadas en forma sencilla.
- 7.3 El Sistema descrito en las Secciones previas deberá cumplir en todos los aspectos con las Especificaciones y Estipulaciones citadas en las mismas.

8 Garantía

- 8.1 Con excepción del computador portátil para grabación/reproducción especificado en la Sección 5, el Sistema deberá tener una garantía expresa para encontrarse libre de defectos en materiales y mano de obra durante un período de un (1) año a partir de la fecha de aceptación de la entrega por parte del comprador. Esta garantía expresa deberá estar limitada a la pronta reparación y reemplazo de piezas y la mano de obra necesaria y servicios requeridos para reparar el Sistema, con excepción del computador portátil para grabación/reproducción especificado en la Sección 5. En caso de que los componentes grandes o pesados, con excepción del computador portátil para grabación/reproducción especificado en la Sección 5, resulten

defectuosos durante el período cubierto por esta garantía, los fabricantes pueden, a discreción suya, efectuar las reparaciones necesarias en alguno de sus lugares comerciales o en el lugar en que se encuentre el Sistema. Esta garantía expresa se deberá extender al comprador sin costo adicional, exceptuando que (a) el comprador deberá ser responsable de todos los costos de flete y de los gastos asociados con la entrega de cualesquiera piezas pequeñas del Sistema al fabricante y (b) en caso de que el fabricante elija reemplazar o reparar cualesquiera piezas grandes o pesadas del Sistema en alguno de sus lugares comerciales durante el período cubierto por esta garantía expresa, el fabricante deberá absorber todos los costos del flete y los gastos asociados con la entrega de los componentes defectuosos al fabricante y el envío de los componentes reparados o reemplazados al comprador. El computador portátil para grabación/reproducción especificado en la Sección 5 no deberá quedar cubierto por esta garantía expresa sino por la garantía estándar suministrada por el fabricante de la microcomputadora.

Esta garantía expresa, además de la reparación general y del reemplazo como medida de remedio, incluye una opción de regresar el equipo a cambio de la devolución del precio de compra, si el mismo no cumple con las especificaciones descritas en la Sección 6 (arriba). La opción de devolución es aplicable solamente si dentro de los 12 meses posteriores a la fecha de entrega, el equipo, bajo condiciones de uso normales y previstas, y sometido al mantenimiento recomendado, no funciona de manera significativa de acuerdo con las especificaciones de desempeño de la Sección 6. Para hacer efectiva la opción de devolución, el comprador deberá demostrar claramente al fabricante una deficiencia general de desempeño con respecto a la precisión de las mediciones, según las definiciones de la Sección 6 de estas especificaciones del equipo.

- 8.2 La garantía expresa planteada en la Sección 8 es la garantía exclusiva y única extendida por el fabricante al comprador. El fabricante no proporciona garantía alguna de comerciabilidad del sistema adquirido ni de que el

sistema adquirido es adecuado para algún propósito particular. No hay garantías que se extiendan más allá de la descripción aquí proporcionada.

- 8.3 La garantía expresa planteada en la Sección 8 no deberá ser aplicada a cualesquiera defectos en el Sistema causados por la negligencia o su uso incorrecto por parte del comprador o sus agentes, empleados o representantes durante la operación del Sistema.
- 8.4 En caso de incumplimiento o repudio del contrato por parte del fabricante en relación con la venta del Sistema, el comprador no deberá tener derecho a recuperar cualesquiera daños incidentales o consecuenciales, según las definiciones del Código Comercial de California.
- 8.5 El Sistema descrito en las Secciones previas deberá cumplir en todos los aspectos con las Especificaciones y Estipulaciones planteadas en las mismas.

ANEXO D



