



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS PROFESIONAL
PROPUESTA DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL EN
PAVIMENTOS FLEXIBLES CON MÉTODOS EMPÍRICOS
MECANICISTAS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

LUIS DANIEL ARCIGA RAMÍREZ

ASESOR:

DR. JORGE ALARCÓN IBARRA

CO-ASESOR:

M. EN I. CARLOS ADOLFO CORIA GUTIÉRREZ

A mi madre.

Por apoyarme en todo momento en mi trayectoria académica y en la vida, quien es el pilar de la familia, quien con su incansable esfuerzo nos sacó adelante y logró que todo esto se hiciera realidad. Todo lo que soy te lo debo a ti. Gracias.

A mi hermano.

Que con su apoyo siempre pude contar, y gracias por esos consejos de hermano mayor que me das.

Gracias por todo, los quiero.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas esas personas que fueron parte esencial para la elaboración de este proyecto.

A mi asesor el Dr. Jorge Alarcón Ibarra, por brindarme su amistad y darme la oportunidad de vivir una experiencia inolvidable en mi estancia en la empresa SemMaterials México.

A mi co-asesor M.I Carlos Coria, que tuvo la paciencia de enseñarme todo lo que sé y por brindarme su amistad y confianza.

A Jesús Espinosa, que gracias a su apoyo y lecturas intensas, se hizo amena mi estancia en la empresa SemMaterials México.

A Rafa Padilla que tuve la oportunidad de conocerlo en el laboratorio de SemMaterials México y por tener la confianza para compartir su proyecto y sus enseñanzas conmigo.

A la empresa SemMaterials México, por permitirme vivir esta experiencia y brindarme los conocimientos necesarios para poder realizar este proyecto, y a todos aquellos que forman esta empresa y estuvieron conmigo brindándome su ayuda.

A mi familia que siempre estuvieron para mí, apoyándome en esta etapa y que siempre contaré con ellos.

A mis amigos que siempre están ahí para mí dándome consejos y brindándome su amistad como siempre lo han hecho, también muchas gracias por ser parte de esta experiencia.

A María, Ivón y Orlando que compartimos momentos elaborando nuestros proyectos, gracias por haber hecho de esto una experiencia inolvidable.

A Julio, Imer, Juan e Iván, que pasamos tiempos memorables en Puebla, no cambiaría los momentos que vivimos juntos.

A "Tampi", por brindarme su apoyo y darme esos buenos consejos para mi proyecto, muchas gracias Dani.

A "M, I, K, S, D": en verdad gracias por estar siempre a mi lado, gracias por su apoyo, y esa amistad tan pura que tenemos.

Gracias a todos ellos por formar parte de esta experiencia.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
JUSTIFICACIÓN.....	4
1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO FLEXIBLE.....	5
1.2. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS.....	5
1.3. DEFLEXIÓN.....	7
1.4. EQUIPO NO DESTRUCTIVO (NDT) PARA LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS.....	10
1.4.1. Equipo estático o de movimiento lento.....	10
1.4.2. Equipo de carga vibratoria.....	13
1.4.3. Equipo de impacto.....	15
1.4.4. Equipos de nueva generación.....	18
1.5. HEAVY WEIGHT DEFLECTOMETER (HWD).....	19
1.6. ANÁLISIS DE LAS DEFLEXIONES OBTENIDAS.....	22
1.6.1. Tratamientos preliminares de las deflexiones.....	22
1.6.1.1. Normalización de deflexiones.....	22
1.6.1.2. Corrección de deflexiones por temperatura.....	23

1.7. METODOLOGÍAS EMPÍRICO-MECANICISTAS PARA LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS.	27
1.7.1. Metodología del área normalizada vs deflexión máxima (Ing. Manuel Zárate Aquino).	27
1.7.1.1. Área normalizada del cuenco de deflexiones.	27
1.7.1.2. Máxima deflexión.	29
1.7.1.3. Factor de forma, F2.	29
1.7.1.4. Índice de curvatura superficial, SCI.	29
1.7.1.5. Relación de deflexión, QR.	30
1.7.1.6. Módulo de rigidez dinámica, MRD.	30
1.7.1.7. Deflexión máxima y área normalizada.	31
1.7.1.8. Factor de forma y deflexión máxima.	32
1.7.1.9. Índice de curvatura superficial y deflexión máxima.	33
1.7.1.10. Relación de deflexión y deflexión máxima.	33
1.7.1.11. Módulo de rigidez y deflexión máxima.	34
1.7.2. METODOLOGÍA DEL DR. RAÚL VICENTE OROZCO.	34
1.7.2.1. Área de la cuenca de deflexiones.	35
1.7.2.2. Índice estructural (I_e).	35
1.7.2.3. Calificación estructural (C_e).	36
1.7.2.4. Expresión Boussinesq.	36
1.7.2.5. Punto de Inflexión.	37
1.8. RETROCÁLCULO O CÁLCULO INVERSO.	38
1.9. VIDA REMANENTE.	48
1.10. TRAMOS HOMOGÉNEOS.	50
1.10.1. Cálculo para delimitar tramos o segmentos homogéneos.	50
1.11. RECOMENDACIONES.	53

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	54
2.1. PROYECTO 1 (94.58 km).....	56
2.1.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.	56
2.1.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.	57
2.1.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.....	57
2.2. PROYECTO 2 (9.66 km).....	58
2.2.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.	58
2.2.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.	59
2.2.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.....	60
2.3. PROYECTO 3 (21.07 km).....	61
2.3.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.	61
2.3.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.	62
2.3.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.....	62
2.4. PROYECTO 4 (32.40 km).....	63
2.4.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.	63
2.4.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.	64
2.4.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.....	65
2.5. PROYECTO 5 (18.00 km).....	66
2.5.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.	66
2.5.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.	67
2.5.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.....	67
2.6. PROYECTO 6 (28.04 km).....	68
2.6.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.	68
2.6.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.	69
2.6.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.....	70

2.7. PROYECTO 7 (29.98 km).....	71
2.7.1. Cuerpo A.	71
2.7.1.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.....	71
2.7.1.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.....	72
2.7.1.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.	72
2.7.2. Cuerpo B.	73
2.7.2.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.....	73
2.7.2.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.....	74
2.7.2.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.	74
2.8. PROYECTO 8 (33.37 km).....	75
2.8.1. Cuerpo A.	75
2.8.1.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.....	75
2.8.1.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.....	76
2.8.1.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.	77
2.8.2. Cuerpo B.	77
2.8.2.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.....	77
2.8.2.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.....	78
2.8.2.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.	79
2.9. PROYECTO 9 (236.60 km).....	80
2.9.1. Cuerpo A (Primer tramo, 59.00 km).....	80
2.9.1.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.....	80
2.9.1.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.....	81
2.9.1.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.	81
2.9.2. Cuerpo A (Segundo tramo, 59.20 km).....	82
2.9.2.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.....	82

2.9.2.2.	Dr. Raúl Vicente Orozco.....	83
2.9.2.3.	Cálculo para delimitar zonas homogéneas.	83
2.9.3.	Cuerpo B (Primer tramo, 58.40 km).....	84
2.9.3.1.	Ing. Manuel Zárate Aquino.	84
2.9.3.2.	Dr. Raúl Vicente Orozco.....	85
2.9.3.3.	Cálculo para delimitar zonas homogéneas.	85
2.9.4.	Cuerpo B (Segundo tramo, 59.99 km).	86
2.9.4.1.	Ing. Manuel Zárate Aquino.	86
2.9.4.2.	Dr. Raúl Vicente Orozco.....	87
2.9.4.3.	Cálculo para delimitar zonas homogéneas.	87
2.10.	PROYECTO 10 (204.600 km).....	89
2.10.1.	Cuerpo A (102.200 km).	89
2.10.1.1.	Ing. Manuel Zárate Aquino.	89
2.10.1.2.	Dr. Raúl Vicente Orozco.....	90
2.10.1.3.	Cálculo para delimitar zonas homogéneas.	90
2.10.2.	Cuerpo B (102.400 km).	91
2.10.2.1.	Ing. Manuel Zárate Aquino.	91
2.10.2.2.	Dr. Raúl Vicente Orozco.....	92
2.10.2.3.	Cálculo para delimitar zonas homogéneas.	92
3.	ANÁLISIS DE LOS PROYECTOS SELECCIONADOS PARA SU EVALUACIÓN MEDIANTE RETROCÁLCULO.	94
3.1.	PROYECTO 9 (236.58 km).	96
3.1.1.	Localización geográfica.	96
3.1.2.	Clima.	97
3.1.3.	Tránsito.....	97

3.1.4.	Espesores (sondeos).....	98
3.1.5.	Inspecciones visuales.....	98
3.1.6.	Obtención de deflexiones con el HWD.	99
3.1.7.	Determinación de tramos homogéneos (AASHTO, 93. Apéndice J).	99
3.1.7.1.	Cuerpo A y Cuerpo B.....	100
3.1.8.	Normalización y corrección por temperatura (Bells) de las deflexiones. 100	
3.1.9.	Método de área normalizada vs deflexión máxima (Ing. Manuel Zárate Aquino).	101
3.1.9.1.	Cuerpo A.....	101
3.1.9.2.	Cuerpo B.....	102
3.1.10.	Retrocálculo y vida remanente (ELMOD6).....	102
3.1.11.	Metodología del Dr. Raúl Vicente Orozco.	106
3.1.11.1.	Cuerpo A (Primer tramo, km 81+812 al 87+000).	106
3.1.11.2.	Cuerpo A (Segundo tramo, km 125+601 al 133+203 y km 133+203 al 150+401).	107
3.1.11.3.	Cuerpo B (Segundo tramo, km 63+400 al km 86+608).....	108
3.2.	PROYECTO 10 (204.600 km).....	110
3.2.1.	Localización geográfica.	110
3.2.2.	Clima.	111
3.2.3.	Tránsito.....	111
3.2.4.	Espesores (sondeos).....	111
3.2.5.	Inspecciones visuales.....	112
3.2.6.	Obtención de deflexiones con el HWD.	113
3.2.7.	Determinación de tramos homogéneos (AASHTO, 93. Apéndice J). ..	113
3.2.7.1.	Cuerpo A y B.....	113

3.2.8. Normalización y corrección por temperatura (Bells) de las deflexiones.	113
3.2.9. Método de área normalizada vs deflexión máxima (Ing. Manuel Zárate Aquino).	114
3.2.9.1. Cuerpo A y B.	114
3.2.10. Retrocálculo y vida remanente (ELMOD6).	114
3.2.11. Metodología del Dr. Raúl Vicente Orozco.	117
3.2.11.1. Cuerpo A (km 21+800 al 81+000).	117
3.2.11.2. Cuerpo A (km 85+800 al 102+600).	118
3.2.11.3. Cuerpo B (km 0+600 al 103+000).	118
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	121
BIBLIOGRAFÍA	124
ANEXOS	128

ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA 1. ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE (CORIA, 2013).....	5
FIGURA 2.- PROCEDIMIENTO DE AUSCULTACIÓN PARA PAVIMENTOS (CORIA, 2015).	7
FIGURA 3.- DEFLEXIÓN POR EL PASO DE UNA CARGA VEHICULAR (OROZCO, 2005).	8
FIGURA 4.- PROGRAMAS PARA CALCULAR LA RESPUESTA MECÁNICA EN PAVIMENTOS FLEXIBLES (CORIA, 2013).	10
FIGURA 5.- VIGA BENKELMAN.....	11
FIGURA 6.- DEFLECTÓMETRO LACROIX. (IMT, 2004).....	12
FIGURA 7.- CURVIÁMETRO (IMT, 2014).	12
FIGURA 8.- DIFERENTES PESOS PARA EL CURVIÁMETRO (IMT, 2014).....	13
FIGURA 9.- DYNAFLECT (IMT, 2014).	14
FIGURA 10.- ROAD RATER (IMT, 2004).	14
FIGURA 11.- LIGHT WEIGHT DEFLECTOMETER (IMT, 2014).....	16
FIGURA 12.- FWD (FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER).	16
FIGURA 13.- FASTFWD.	17
FIGURA 14.- TRUCK MOUNTED DEFLECTOMETER (TMD).....	18
FIGURA 15.- HEAVY VEHICLE SIMULATOR EN EL INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE (IMT).....	18
FIGURA 16.- HEAVY WEIGHT DEFLECTOMETER (HWD).....	19
FIGURA 17.- SISTEMA DE CARGA Y PLACA DE CARGA HWD.....	20
FIGURA 18.- CUENCA DE DEFLEXIONES (DYNATEST).	21
FIGURA 19.- CUENCOS DE DEFLEXIONES PARA DISTINTAS RIGIDECES DE LAS CAPAS DE PAVIMENTO. (OROZCO, 2005).	21
FIGURA 20.- COMPORTAMIENTO DE LAS CAPAS ASFÁLTICAS CON LA TEMPERATURA BELLS (ELMOD).	26
FIGURA 21.- CUENCA DE DEFLEXIONES (BELTRÁN ET AL 2012).....	28
FIGURA 22.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA.....	32
FIGURA 23.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA VS FACTOR DE FORMA F2.	32
FIGURA 24.- GRÁFICO ÍNDICE DE CURVATURA SUPERFICIAL VS DEFLEXIÓN MÁXIMA.	33
FIGURA 25.- GRÁFICO RELACIÓN DE DEFLEXIÓN VS DEFLEXIÓN MÁXIMA.	33
FIGURA 26.- GRÁFICO DE VALORES DE MÓDULO DE RIGIDEZ VS DEFLEXIÓN MÁXIMA.	34
FIGURA 27.- RESPUESTAS MECÁNICAS OBTENIDAS EN EL CÁLCULO DIRECTO Y EN EL CÁLCULO INVERSO (RETROCÁLCULO).	38
FIGURA 28.- TEORÍA DE ESPESORES EQUIVALENTES DE ODEMARK UTILIZADAS EN EL ANÁLISIS DE RETROCÁLCULO (IMT, 2015).....	39
FIGURA 29.- PRIMER AJUSTE DE CUENCAS DE DEFLEXIÓN CON RMS = 9% (DYNATEST).	40
FIGURA 30.- SEGUNDO AJUSTE DE CUENCAS DE DEFLEXIÓN CON RMS = 4.9% (DYNATEST).	40
FIGURA 31.- TERCER AJUSTE DE CUENCAS DE DEFLEXIÓN CON RMS = 4.6% (DYNATEST).	41
FIGURA 32.- CUARTO AJUSTE DE CUENCAS DE DEFLEXIÓN CON RMS = 1.1% (DYNATEST).	41
FIGURA 33.- QUINTO AJUSTE DE CUENCAS DE DEFLEXIÓN CON RMS = 0.0%, TOTALMENTE AJUSTADA (DYNATEST).	42
FIGURA 34.- AJUSTE DE CUENCAS DE DEFLEXIÓN ENTRE LA MEDIDA Y LA CALCULADA (FAA).	42
FIGURA 35.- ESPESORES DE CAPAS DE PAVIMENTO OBTENIDOS DE CALAS O SONDEOS (CORTE TRANSVERSAL).	43
FIGURA 36.- LARGUILLO CON LOS ESPESORES DE CADA UNA DE LAS CAPAS DE PAVIMENTO.	43
FIGURA 37.- UNIÓN DE CAPAS ASFÁLTICAS Y GRANULARES (MAPPING LAYERS).....	45

FIGURA 38. DIFERENTES PROGRAMAS PARA EL ANÁLISIS DE RETROCÁLCULO.....	47
FIGURA 39.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS. MODIFICADO FHWA (2002).	50
FIGURA 40.- A) RESPUESTA DEL PAVIMENTO (IRI, DEFLEXIÓN, ETC.) RESPECTO A LA LONGITUD TOTAL DEL TRAMO. (AASHTO 93, CORIA, 2013).	51
FIGURA 41.- B) ÁREA ACUMULADA RESPECTO A LA LONGITUD TOTAL DEL TRAMO. (AASHTO 93, CORIA, 2013).	52
FIGURA 42.- C) VALOR DE Z_x RESPECTO A LA LONGITUD TOTAL DEL TRAMO. DONDE HAY CAMBIO DE PENDIENTE INICIA O TERMINA UN TRAMO HOMOGÉNEO (AASHTO 93, CORIA, 2013).	52
FIGURA 43. EJEMPLO DE TRAMOS HOMOGÉNEOS EN CADA CAMBIO DE PENDIENTE.	53
FIGURA 44.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 1.....	56
FIGURA 45.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 1.	56
FIGURA 46.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 1.....	57
FIGURA 47.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 1.....	57
FIGURA 48.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 2.....	58
FIGURA 49.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 2.	59
FIGURA 50.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 2.....	59
FIGURA 51.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 2.....	60
FIGURA 52.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 3.....	61
FIGURA 53.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 3.....	61
FIGURA 54.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 3.....	62
FIGURA 55.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 3.....	62
FIGURA 56.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 4.....	63
FIGURA 57.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 4.	64
FIGURA 58.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 4.....	64
FIGURA 59.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 4.....	65
FIGURA 60.-GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 5.....	66
FIGURA 61.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 5.....	66
FIGURA 62.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 5.....	67
FIGURA 63.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 5.....	67
FIGURA 64.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 6.....	68
FIGURA 65.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 6.....	69
FIGURA 66.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 6.....	69
FIGURA 67.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 6.....	70
FIGURA 68.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 7 CUERPO A.....	71
FIGURA 69.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 7 CUERPO A.....	71
FIGURA 70.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 7 CUERPO A.....	72
FIGURA 71.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 7 CUERPO A.....	72

FIGURA 72.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 7 CUERPO B.	73
FIGURA 73.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 7 CUERPO B.	73
FIGURA 74.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 7 CUERPO B.	74
FIGURA 75.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 7 CUERPO B.	74
FIGURA 76.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 8 CUERPO A.	75
FIGURA 77.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 8 CUERPO A.	76
FIGURA 78.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 8 CUERPO A.	76
FIGURA 79.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 8 CUERPO A.	77
FIGURA 80.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 8 CUERPO B.	77
FIGURA 81.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 8 CUERPO B.	78
FIGURA 82.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 8 CUERPO B.	78
FIGURA 83.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 8 CUERPO B.	79
FIGURA 84.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 9 CUERPO A (PRIMER TRAMO).	80
FIGURA 85.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 9 CUERPO A (PRIMER TRAMO).	80
FIGURA 86.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 9 CUERPO A (PRIMER TRAMO). ...	81
FIGURA 87.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 9 CUERPO A (PRIMER TRAMO).	81
FIGURA 88.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 9 CUERPO A (SEGUNDO TRAMO).	82
FIGURA 89.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 9 CUERPO A (SEGUNDO TRAMO).	82
FIGURA 90.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 9 CUERPO A (SEGUNDO TRAMO). 83	
FIGURA 91.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 9 CUERPO A (SEGUNDO TRAMO).	83
FIGURA 92.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 9 CUERPO B (PRIMER TRAMO).	84
FIGURA 93.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 9 CUERPO B (PRIMER TRAMO).	84
FIGURA 94.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 9 CUERPO B (PRIMER TRAMO). ...	85
FIGURA 95.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 9 CUERPO B (PRIMER TRAMO).	85
FIGURA 96.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 9 CUERPO B (SEGUNDO TRAMO).	86
FIGURA 97.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 9 CUERPO B (SEGUNDO TRAMO).	86
FIGURA 98.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 9 CUERPO B (SEGUNDO TRAMO). 87	
FIGURA 99.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 9 CUERPO B (SEGUNDO TRAMO).	87
FIGURA 100.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 10 CUERPO A.	89
FIGURA 101.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 10 CUERPO A.	89
FIGURA 102.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 10 CUERPO A.	90
FIGURA 103.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 10 CUERPO A.	90

FIGURA 104.- GRÁFICO DE DEFLEXIÓN MÁXIMA PARA EL PROYECTO 10 CUERPO B.....	91
FIGURA 105.- GRÁFICO DEFLEXIÓN MÁXIMA VS ÁREA NORMALIZADA PARA EL PROYECTO 10 CUERPO B.....	91
FIGURA 106.- ÍNDICE ESTRUCTURAL PARA EL PROYECTO 10 CUERPO B.....	92
FIGURA 107.- DELIMITACIÓN DE TRAMOS HOMOGÉNEOS POR DIFERENCIAS ACUMULADAS (AASHTO, 93) PARA EL PROYECTO 10 CUERPO B.....	92
FIGURA 108.- DIAGRAMA DE FLUJO PARA REALIZAR EL ANÁLISIS DEL TRAMO CARRETERO.....	95
FIGURA 109. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	96
FIGURA 110.- ESTRUCTURA BASE A LO LARGO DE LA CARRETERA.....	98
FIGURA 111.- IMÁGENES EN SITIO DE LOS CUERPOS A Y B DEL PROYECTO 9.....	99
FIGURA 112.- CAPTURA DE PANTALLA DEL PROGRAMA ELMOD6.....	101
FIGURA 113. MÓDULOS ELÁSTICOS DE REFERENCIA EN EL PROGRAMA ELMOD6.....	102
FIGURA 114. VARIACIÓN EN EL PROGRAMA ELMOD6.....	103
FIGURA 115.- CUERPO A (PRIMER TRAMO, KM 81+812 AL 87+000).....	106
FIGURA 116.- CUERPO A (SEGUNDO TRAMO, KM 125+601 AL 133+203 Y KM 133+203 AL 150+401).....	107
FIGURA 117.- CUERPO B (SEGUNDO TRAMO, KM 63+400 AL KM 86+608).....	108
FIGURA 118.- LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA PARA EL PROYECTO 10.....	110
FIGURA 119.- ESTRUCTURA BASE PARA EL PROYECTO 10.....	112
FIGURA 120.-INSPECCIONES VISUALES TOMADAS EN CAMPO DEL CUERPO A Y B PARA EL PROYECTO 10.....	112
FIGURA 121.- CAPTURA DE PANTALLA DEL PROGRAMA ELMOD6.....	114
FIGURA 122.- MÓDULOS DE REFERENCIA EN EL PROGRAMA ELMOD6 PARA EL PROYECTO 10.....	115
FIGURA 123.- CUERPO A (KM 21+800 AL 81+000).....	117
FIGURA 124.- CUERPO A (KM 85+800 AL102+600).....	118
FIGURA 125.- CUERPO B (KM 0+600 AL 103+000).....	118
FIGURA 126.- REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS REHABILITACIONES, PARA VIDA DE PROYECTO DE 10 AÑOS.....	120
FIGURA 127.- MÓDULOS DE REFERENCIA EN EL PROGRAMA ELMOD6.....	129
FIGURA 128.- ESTRUCTURA BASE PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	130
FIGURA 129.- VARIACIÓN MENOR DE LOS MÓDULOS CALCULADOS PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	132
FIGURA 130.- PANTALLA DEL PROGRAMA ELMOD6 PARA LA ESTIMACIÓN DE LA VIDA REMANENTE Y ESPESORES.....	133
FIGURA 131.- PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE LA VIDA REMANENTE Y EL ESPESOR REQUERIDO (PROGRAMA ELMOD6).....	134
FIGURA 132.- CAPTURA DE PANTALLA DEL PROGRAMA ELMOD6. VIDA REMANENTE Y ESPESORES.....	135

ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA 1.- EJEMPLO DE NORMALIZACIÓN.....	23
TABLA 2.- EJEMPLO DE NORMALIZACIÓN (CONTINUACIÓN).	23
TABLA 3.- VALORES TÍPICOS Y RANGOS DESEABLES DE LOS INDICADORES DE LA METODOLOGÍA DE ÁREA NORMALIZADA VS DEFLEXIÓN MÁXIMA.	31
TABLA 4.- DEFINICIÓN DE CONDICIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO POR CUADRANTES.	31
TABLA 5.- VALORES DE MÓDULO DE RIGIDEZ VS DEFLEXIÓN MÁXIMA.....	34
TABLA 6.- SOLUCIONES A CONSIDERAR SEGÚN LA METODOLOGÍA DEL DR. RAÚL VICENTE OROZCO.....	36
TABLA 7.- MÓDULOS ELÁSTICOS RETROCALCULADOS RECOMENDADOS POR LA FAA (BAKFAA, 2011).	46
TABLA 8.- MÓDULOS ELÁSTICOS RETROCALCULADOS RECOMENDADOS POR FHWA (FHWA, 2006).	47
TABLA 9. VALORES PARA DETERMINAR EL ESTADO DE TRAMOS CARRETEROS MEDIANTE DEFLEXIONES.	53
TABLA 10.- RESULTADOS DE LAS METODOLOGÍAS EMPÍRICAS PARA EL PROYECTO 1.	58
TABLA 11.- RESULTADOS DE LAS METODOLOGÍAS PARA EL PROYECTO 2.	60
TABLA 12.- RESULTADOS DE METODOLOGÍAS PARA EL PROYECTO 3.	63
TABLA 13.- RESULTADOS DE LAS METODOLOGÍAS PARA EL PROYECTO 4.	65
TABLA 14.- RESULTADOS DE LAS METODOLOGÍAS PARA EL PROYECTO 5.	68
TABLA 15.- RESULTADOS DE LAS METODOLOGÍAS PARA EL PROYECTO 6.	70
TABLA 16.- RESULTADOS DE LAS METODOLOGÍAS PARA LOS CUERPOS A Y B DEL PROYECTO 7.	75
TABLA 17.- RESULTADOS DE LAS METODOLOGÍAS PARA LOS CUERPOS A Y B DEL PROYECTO 8.	79
TABLA 18.- RESULTADOS DE LAS METODOLOGÍAS PARA LOS CUERPOS A Y B DEL PROYECTO 9.	88
TABLA 19.- RESULTADOS DE LAS METODOLOGÍAS PARA LOS CUERPOS A Y B DEL PROYECTO 10.	93
TABLA 20.- CLIMATOLOGÍA PARA EL PROYECTO 9.	97
TABLA 21.- ESALS PARA LOS CUERPOS A Y B PARA EL PROYECTO 9.	97
TABLA 22.- TRAMOS HOMOGÉNEOS DEL CUERPO A Y CUERPO B PARA EL PROYECTO 9..	100
TABLA 23.- METODOLOGÍA DEL ING. MANUEL ZÁRATE AQUINO DEL CUERPO A PARA EL PROYECTO 9.	101
TABLA 24.- METODOLOGÍA DEL ING. MANUEL ZÁRATE AQUINO DEL CUERPO B PROYECTO 9.	102
TABLA 25.- VALORES DE MÓDULOS DE REFERENCIA PROPUESTOS POR DYNATEST.....	103
TABLA 26. MÓDULOS ELÁSTICOS PARA LOS CUERPOS A Y B	104
TABLA 27. VIDA REMANENTE PARA LOS CUERPOS A Y B.....	105
TABLA 28. VIDA REMANENTE Y ESPESORES EN LOS TRAMOS CON VIDA REMANENTE MENOR A DIEZ.....	106
TABLA 29.- RESULTADOS FINALES PARA EL MANTENIMIENTO DEL TRAMO CARRETERO..	108
TABLA 30.- CLIMATOLOGÍA PARA EL PROYECTO 10.	111
TABLA 31.- ESALS PARA LOS CUERPOS A Y B PARA EL PROYECTO 10.	111
TABLA 32.- TRAMOS HOMOGÉNEOS DEL CUERPO A Y B PARA EL PROYECTO 10.	113
TABLA 33.- METODOLOGÍA DEL ING. MANUEL ZÁRATE AQUINO PARA EL PROYECTO 10. ...	114
TABLA 34. MÓDULOS ELÁSTICOS PARA EL PROYECTO 10.....	115
TABLA 35.- VIDA REMANENTE PARA LOS CUERPOS A Y B.	115

TABLA 36.- ESPESORES PARA LOS TRAMOS HOMOGÉNEOS MENORES A VEINTE AÑOS. ...	116
TABLA 37.- RESULTADOS FINALES PARA EL MANTENIMIENTO DEL TRAMO CARRETERO...	119
TABLA 38.- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA PRIMERA CAPA, E1 (CARPETA ASFÁLTICA).	130
TABLA 39.- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA SEGUNDA CAPA, E2 (BASE CON ASFALTO ESPUMADO).....	131
TABLA 40.- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA TERCERA CAPA, E3 (SUBBASE).	131
TABLA 41.- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA CUARTA CAPA, E4 (SUBRASANTE).	131

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	129
ANEXO 2. EJEMPLO DE VIDA REMANENTE Y ESPESOR REQUERIDO EN EL PROGRAMA ELMOD 6.	133

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con la finalidad de evaluar estructuralmente diferentes tramos carreteros que se encuentran en el país y establecer la estrategia de conservación y mantenimiento de cada uno de ellos, ya que se encuentran en mal estado y es de suma importancia que se lleven trabajos de una manera simple, rápida y económica, y no alterando el equilibrio de la estructura del pavimento mediante equipos de impacto (Heavy Weight Deflectometer) o pruebas no destructivas (Non-Destructive Test), obteniendo así una respuesta sobre la superficie del pavimento.

Una vez que se tiene la respuesta del pavimento (deflexiones) ésta es analizada mediante metodologías empírico-mecanicistas que nos ayudan a obtener diferentes parámetros para conocer la capacidad estructural, la estimación de vida remanente y los espesores correspondientes del pavimento.

De esta manera se determinan las actividades de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción que son necesarias para que la estructura resista a las cargas vehiculares para las que será diseñado.

Palabras clave: Evaluación estructural, respuesta del pavimento, equipos de impacto, pruebas no destructivas, metodologías empírico mecanicistas.

ABSTRACT

The present work was carried out with the purpose of evaluating structurally the different road sections that are in the country and establish the strategy of conservation and maintenance of each one of them, since they are in poor condition and it is highly important to develop the works in a simple, fast and economical way, and not altering the balance of the pavement structure by the impact equipment (Heavy Weight Deflectometer) or non-destructive tests, obtaining a response on the surface of the pavement.

Once the pavement response (deflections) is obtained, it is analyzed by empirical-mechanistic methodologies that help us to obtain different parameters to know the structural capacity, the remaining life estimate and the corresponding thickness of the pavement.

In this way, the maintenance, rehabilitation and reconstruction activities determine what is necessary for the structure to withstand the vehicle loads for which it will be designed.

INTRODUCCIÓN

Las Vías Terrestres son las más importantes, ya que generan desarrollo social y un fuerte crecimiento económico al país, por lo tanto, se debe dar seguridad, confort y un bajo costo de operación a los usuarios, por eso es necesario mantener la red carretera en buenas condiciones. Para esto, se necesita de equipos que den una respuesta del pavimento más rápida y eficaz que se acerque a la realidad de cómo se encuentra y poder llevar a cabo la conservación y el mantenimiento que se requiera para que esté en óptimas condiciones. También es de suma importancia mencionar que las Vías Terrestres son una de las ramas de la ingeniería en donde más se invierte dinero para su conservación, es por eso, que se debe llevar una constante revisión durante la vida útil del pavimento para que el mantenimiento sea de bajo costo, ya que si el pavimento se encuentra muy deteriorado o ha llegado al final de su vida útil, será necesaria una inversión mayor para la rehabilitación de dicha carretera.

Generalmente para obtener el estado del pavimento, se requería de la extracción de núcleos o procesos destructivos, alterando la estructura del pavimento, sin embargo, con el paso de los años y con la evolución de la tecnología, se fueron implementando equipos de impacto o pruebas no destructivas (Non-Destructive Test, NDT) para obtener un resultado más real de los parámetros característicos del pavimento y así hacer que tenga un buen rendimiento estructural y no alterar su configuración, disminuyendo el tiempo y costo para su evaluación.

La evaluación estructural de pavimentos consiste en revisar o auscultar la capacidad resistente del pavimento para saber en qué condiciones se encuentra y determinar si requiere de algún tipo de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción para que su estructura tenga un buen comportamiento y resista las cargas vehiculares para las que fueron diseñados. Para llevar a cabo el proceso de obtención de la respuesta del pavimento (deflexiones) se puede utilizar el HWD (Heavy Weight Deflectometer) que genera, mediante impacto, una carga sobre la superficie del pavimento que simula las cargas vehiculares por la que éste es

sometido al ser puesto en operación. El sistema de medición del deflectómetro de impacto consiste en una serie de transductores o geófonos que permiten obtener los valores de la deflexión que genera la carga sobre el pavimento.

Existen metodologías que ayudan a procesar los datos que se obtienen de la medición con el deflectómetro de impacto para que sea más fácil representar la respuesta sobre el pavimento, entre las cuales se encuentran:

- *Metodologías mecanicistas*, que consisten en obtener una respuesta física de la superficie del pavimento, como son las deflexiones o deformaciones, para determinar cómo se comportan los materiales que conforman su estructura mediante un impacto.
- *Metodologías empíricas*, que se basan en la experiencia de campo, y vincula variables de diseño e indicadores de comportamiento, como son el tráfico, materiales, configuración de las capas y condiciones ambientales.

Por lo tanto, se necesitan de los dos tipos de metodologías para determinar una respuesta concreta del pavimento y obtener su capacidad estructural. A estas metodologías se les llama metodologías empírico-mecanicistas.

El presente trabajo se conforma del análisis de diez proyectos de los cuales dos de ellos se analizarán más a fondo para llevar a cabo el retrocálculo y pronosticar su vida útil para determinar la conservación y mantenimiento que sea necesaria para que la carretera esté en las condiciones adecuadas.

Para la ejecución del análisis se recaudó información de cada una de las carreteras, la cual fue proporcionada por la empresa SEM Materials México y por cuestiones de confidencialidad no es posible mencionar la ubicación exacta de los tramos carreteros.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL.

Llevar a cabo la revisión estructural de pavimentos flexibles de varios tramos carreteros del país utilizando cuencas de deflexión obtenidas con el deflectómetro de impacto HWD y proponer una metodología de análisis y revisión mediante conceptos de tipo empírico-mecanicista, tales como, retrocálculo, módulos de superficie, vidas remanentes, índices estructurales, áreas normalizadas, etc. Con ello se sabe si estas estructuras de pavimento se encuentran en buenas o malas condiciones para poder determinar si requiere de algún tipo de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción para que cumplan con el diseño que permita soportar las cargas vehiculares que se presentan.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Realizar la evaluación estructural obteniendo una respuesta de la superficie del pavimento en deflexiones mediante pruebas no destructivas con el deflectómetro de impacto HWD (Heavy Weight Deflectometer).
- Analizar las deflexiones mediante métodos empíricos para determinar si la estructura del pavimento y el apoyo de esta se encuentra en buenas o malas condiciones, su índice estructural y delimitar tramos homogéneos.
- Determinar los módulos elásticos que corresponden a cada capa de la estructura del pavimento mediante retrocálculo con el programa ELMOD6. Así mismo, obtener una estimación de la vida remanente y de los espesores que se requiera para la rehabilitación.

JUSTIFICACIÓN

El deflectómetro de impacto es un equipo que aplica una carga sobre la superficie del pavimento sin hacer una alteración en la estructura, por eso es de suma importancia la implementación de estos equipos para la auscultación de pavimentos.

Mediante el deflectómetro de impacto (HWD) o pruebas no destructivas es más fácil, rápido y de bajo costo obtener una respuesta del pavimento en deflexiones y por medio de las deflexiones, encontrar los módulos elásticos que corresponden a la estructura del pavimento utilizando la metodología del retrocálculo, que nos permite obtener su capacidad estructural.

La implementación de metodologías empírico-mecanicistas nos ayuda a determinar si la estructura del pavimento se encuentra en buenas o malas condiciones y establecer qué tipo de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción se debe realizar para que trabaje de una manera eficaz con las cargas vehiculares que se presentan.

1. MARCO TEÓRICO.

1.1. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO FLEXIBLE.

Son estructuras conformadas por capas de diversos materiales asfálticos y granulares con una resistencia a la deformación y esfuerzos normalmente decrecientes con la profundidad, derivada de las acciones repetidas de las cargas de tránsito. Ver Figura 1.

El pavimento está caracterizado por las propiedades, espesores y disposición de los materiales que forman un conjunto de capas superpuestas, así como por la calidad de la construcción, en la que tienen gran importancia las especificaciones, la supervisión de la obra y el control de calidad (Coria, 2013).

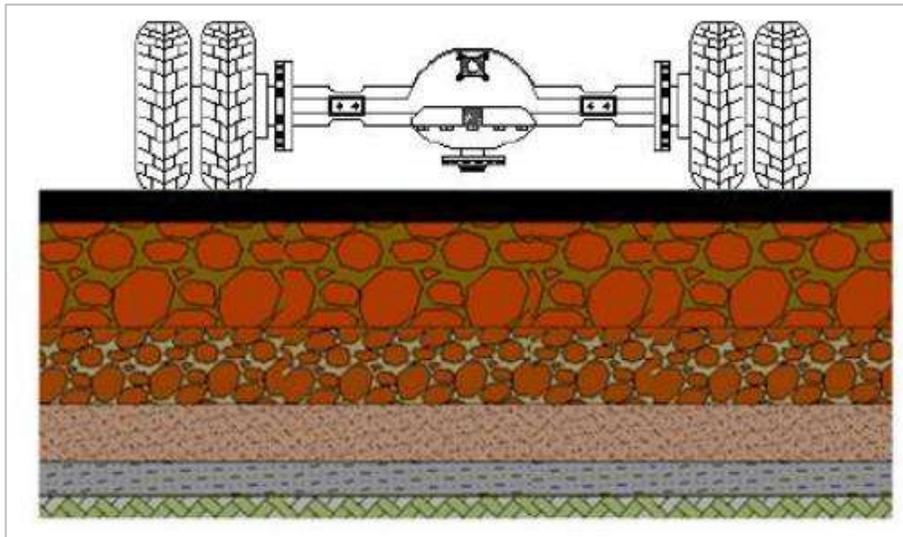


Figura 1. Estructura de pavimento flexible (Coria, 2013).

1.2. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS.

La evaluación estructural en carreteras es una forma de revisar o auscultar el pavimento flexible para determinar la capacidad estructural de éste, el cual está

sometido constantemente a cargas vehiculares y saber si es necesario algún tipo de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción de su estructura.

La evaluación estructural tiene por objeto revisar o auscultar la estructura del pavimento una vez que este ha sido abierto a la circulación. Con ello se puede determinar en qué condiciones se encuentra la estructura del pavimento y si es necesario llevar a cabo trabajos de conservación rutinaria, rehabilitación o reconstrucción. Todas estas actividades conforman lo que se denomina Gestión o administración de pavimentos (Coria, 2015). Ver Figura 2.

La auscultación estructural de carreteras es una técnica que proporciona un conocimiento detallado del estado de los pavimentos, lo que permite efectuar el monitoreo de su comportamiento a través del tiempo y programar el mantenimiento de un modo racional y más económico (Solminihac, 2005). De modo que se pueden obtener los siguientes resultados:

- Evaluar capacidad de soporte.
- Parámetros de resistencia de las diversas capas.
 - Módulo elástico de las capas o curva de tensión deformación.
 - Propiedades de fatiga.
 - Propiedades de deformación.
 - Tensiones residuales.
- Evaluar la condición de la estructura del pavimento.
 - Realizar predicciones realistas de la vida remanente de los pavimentos.
 - Diseño de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción.
 - Monitorear cambios de las propiedades de las capas con el tiempo.
 - Evaluar transferencia de carga entre las losas.
 - Pérdida de soporte en las esquinas de la losa.

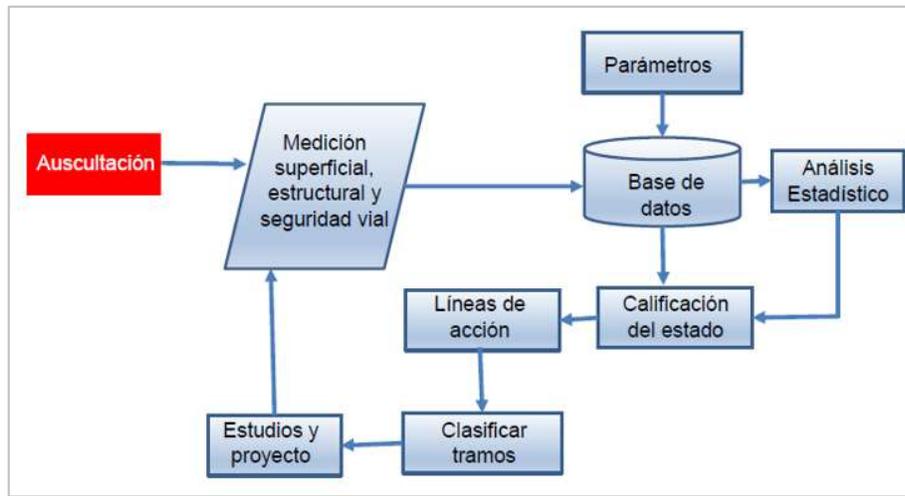


Figura 2.- Procedimiento de auscultación para pavimentos (Coria, 2015).

La función estructural depende de la propia capacidad resistente (materiales y espesores), así como del estado de envejecimiento del pavimento, por lo que la auscultación estructural debe incluir mediciones de deflexión y una inspección visual (Solminihaç, 2005).

1.3. DEFLEXIÓN.

La deflexión es un desplazamiento vertical que experimenta el pavimento al paso de una carga vehicular sobre la superficie del pavimento y este parámetro normalmente se obtiene mediante métodos no destructivos. Cuando se aplica una carga en la superficie no solo se desplaza el punto bajo ella, produciendo una deflexión máxima, sino también se desplaza una zona alrededor del eje de aplicación de carga, que se denomina cuenco de deflexión (Higuera, 2007). Ver Figura 3.

La deflexión permite ser correlacionada con la capacidad estructural de un pavimento, de manera que, si la deflexión es alta la capacidad estructural del pavimento es débil o deficiente y si la deflexión es baja quiere decir que el pavimento tiene buena capacidad estructural.

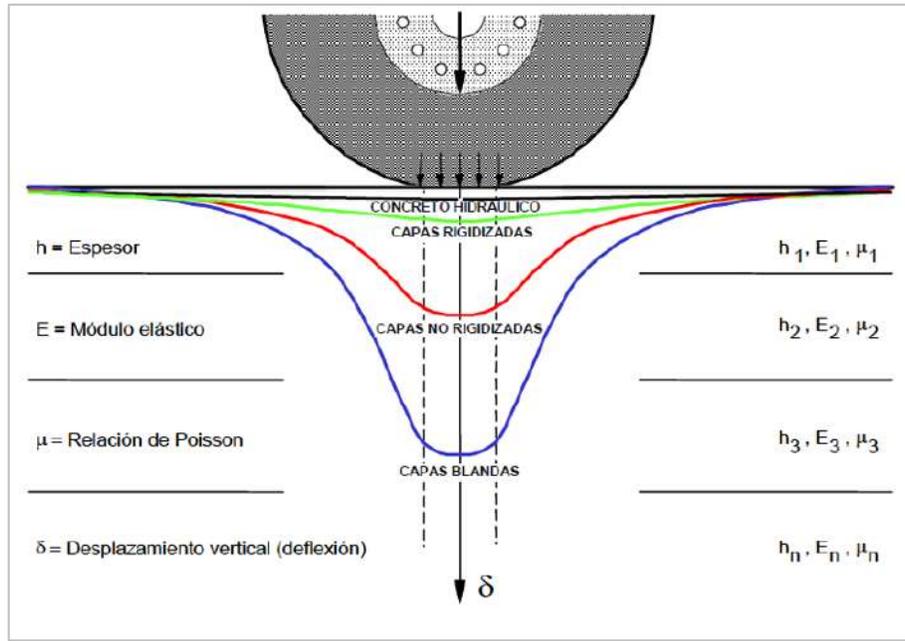


Figura 3.- Deflexión por el paso de una carga vehicular (Orozco, 2005).

Las características de la deflexión y del cuenco de deflexiones según Higuera (2007), son las siguientes:

- La deflexión máxima se presenta en el eje de aplicación de carga.
- El cuenco de deflexión presenta un valor máximo en el eje de aplicaciones de carga, y a medida que se aleja de este, el valor de la deflexión se hace menor, hasta en punto que tiende a cero.
- Con la información del cuenco de deflexión se puede determinar el parámetro AREA que permite dar una idea del espesor y la capacidad de soporte del modelo estructural del pavimento.
- Con la deflexión máxima y la deflexión determinada a 25 cm del eje de carga, es posible determinar el parámetro denominado radio de curvatura, que también da una idea de la capacidad de soporte del modelo estructural.
- La magnitud de la deflexión en estructuras de pavimentos es muy pequeña, generalmente menor a 1.5 mm. Para el diseño, la deflexión máxima es menor de 1 mm.

- La deflexión se mide en milímetros o pulgadas y se expresa generalmente en 1/100 de mm o en 1/1000 de pulgada.

Con una dirección hacia un análisis y diseño mecanicista de los pavimentos el cual se basa en los principios fundamentales de la física, el uso de la información de deflexión ha empezado a ser más sofisticado. En la actualidad, las mediciones de deflexiones tienen diversos usos (Orozco, 2005):

- Identificación de las secciones de los pavimentos que son estructuralmente uniformes.
- Identificación de las zonas débiles y/o deterioradas.
- Cálculo de la capacidad estructural.
- Diseño de recarpeteos o de rehabilitación.
- Restricciones de carga (estacionales y permanentes).
- Procedimientos para permitir sobrecarga.
- Aplicación en la gestión de pavimentos.
- Evaluación de anomalías.

Una manera teórica de obtener las deflexiones en sistemas estructurales de pavimentos, es a través de programas de respuesta estructural multicapa utilizados en el medio. Entre los programas más conocidos tenemos el WESLEA (WES), KENPAVE (Universidad de Kentucky), BISAR (Shell), EVERSTRESS (DOT Washington), DAMA (Instituto del Asfalto), WinJULEA (MEPDEG), 3D-MOVE Analysis (Universidad de Nevada EE.UU), me-PADS (Sudáfrica), WINDEPAV (Universidad del Cauca, Colombia), ALIZÉ III (LCPC de Francia), AMADEUS (RRC, Bélgica), GAMES (Japón), Cedem -KENPAV (Escuela Colombiana de Ingeniería), CIRCLY (Mincad Australia), ICAFIR (España), entre muchos otros (Coria, 2014). Ver Figura 4.



Figura 4.- Programas para calcular la respuesta mecánica en pavimentos flexibles (Coria, 2013).

1.4. EQUIPO NO DESTRUCTIVO (NDT) PARA LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS.

Para llevar a cabo la medición de las deflexiones de un pavimento existen diversos equipos, cuyo procedimiento general es el de aplicar una carga sobre el pavimento, midiendo la deformación producida en la superficie de él en diversos puntos ubicados a distintas distancias de la carga.

Dentro de la clasificación de este tipo de equipos, según la carga se tienen los siguientes:

1.4.1. Equipo estático o de movimiento lento.

Carga estática o de movimiento lento corresponde a la primera generación originada, básicamente, con el desarrollo de la viga Benkelman en la WASHO Road Test. Estos equipos proveen la medida de deflexión en un punto, bajo una carga fija o de movimiento lento (Huang, 1993, citado por Solminihac, 2005).

Para su uso, generalmente, necesitan un vehículo cargado para lograr la sollicitación del ensayo. Consumen mucho tiempo y una labor intensiva. Entre estos equipos se encuentran (Solminihac, 2005).

- Base profunda. La base profunda corresponde a un pozo de tres metros de profundidad, desde la superficie del pavimento, en el cual se instala un medidor de deflexión anclado al fondo de él. Su objetivo es obtener una medición de deflexión absoluta del pavimento. (MOP, 1986, citado por Solminihac, 2005).
- Viga Benkelman. Este equipo opera en base al principio de palanca, debe ser usada con un camión cargado, normalmente 80 kN en un eje, con las ruedas infladas a una presión de 0,48 a 0,55 MPa. Las mediciones se realizan colocando la punta de la viga entre las dos ruedas y midiendo el rebote cuando el vehículo se aleja. Los resultados de las deflexiones se leen en un dial indicador (método canadiense). En el método WASHO, la punta de la viga se coloca a 1,20 m adelante del par de ruedas, se toma una lectura inicial. Al cruzar el camión se toma la lectura máxima y una final del parámetro. Ver Figura 5.



Figura 5.- Viga Benkelman.

- Deflectómetro Lacroix. El deflectómetro Lacroix consiste en un camión con un peso estándar en su eje posterior, cuya separación entre ejes es de 6.75 m.

En él, van montadas dos vigas similares a la Benkelman. La forma de medir es similar a la Viga Benkelman. Ver Figura 6.



Figura 6.- Deflectómetro Lacroix. (IMT, 2004).

- Curviámetro. Consiste en un equipo para medir deflexión sobre una longitud de cuatro metros, él va montado sobre un camión de dos ejes, con el cual se puede aplicar una carga entre 80 y 130 kN. Las medidas se realizan a una velocidad de 18 km/h y se repiten cada 5 m. Ver Figura 7 y Figura 8.



Figura 7.- Curviámetro (IMT, 2014).

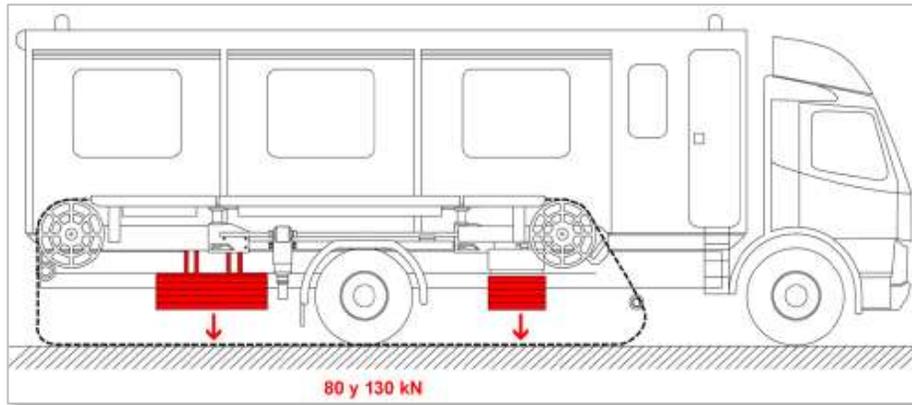


Figura 8.- Diferentes pesos para el curviámetro (IMT, 2014).

1.4.2. Equipo de carga vibratoria.

La siguiente generación de equipos involucró la aplicación de cargas dinámicas vibratorias. Estos equipos son más móviles y más productivos que los equipos estáticos e hicieron de la medición de deflexiones una faena de rutina para inspeccionar el pavimento (Dynatest y SME, 1994, citado por Solminihac, 2005).

Las deflexiones son generadas por elementos vibratorios que imponen una fuerza sinusoidal dinámica sobre un peso estático. La magnitud de la carga dinámica entre los puntos más altos es menor que dos veces la carga estática; por lo tanto, estos equipos siempre aplican una carga de compresión de magnitud variable sobre el pavimento. La deflexión se mide a través de acelerómetros o sensores de velocidad (geófonos). Estos sensores se colocan normalmente debajo de la carga y a distancias regulares del centro. (Dynatest y SME, 1994, citado por Solminihac, 2005).

Una ventaja de este tipo de equipos sobre los estáticos, es que no se requiere un punto de referencia. La desventaja principal de este método es que las cargas reales que transitan por los pavimentos no tienen el mismo comportamiento que las que aplican ellos (De Solminihac, H.E., 1994, citado por Solminihac, 2005). Entre los equipos más característicos se encuentran (Dynatest y SME, 1994, citado por Solminihac, 2005):

- Dynalect (electro-mecánico). Produce la vibración a través de unos pesos rotatorios con los cuales aplica un rango de fuerzas entre picks de 1.000 lbs. Para medir las deflexiones cuenta con cinco transductores de velocidad ubicados a 0,12, 24, 36 y 48 pulgadas respectivamente. Es fabricado por Geolog Inc. Ver Figura 9.



Figura 9.- Dynaflect (IMT, 2014).

- Road Rater (electro-hidráulico). Genera las vibraciones a través de un sistema hidráulico que mueve unas masas, con el produce un rango de frecuencias entre 5 y 60 Hz. Para medir las deflexiones utiliza transductores de velocidad. Es fabricado por Foundation Mechanics, Inc.

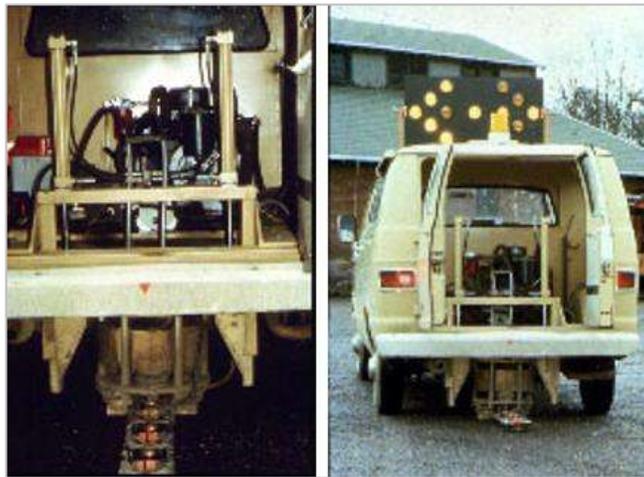


Figura 10.- Road Rater (IMT, 2004).

- WES Heavy Vibrator. Fue desarrollado por la Corps of Engineers USA, para la evaluación de pavimentos de aeropuertos. El aplica una precarga de 71 kN con una carga vibratoria de 130 kN a una frecuencia de 15 Hz. Este equipo no está disponible en el mercado.

1.4.3. Equipo de impacto.

El dispositivo generador de impacto debe ser del tipo de masa en caída libre con un sistema de guía. El dispositivo generador de impacto tiene que ser capaz de levantar una o varias masas predeterminadas, y soltarlas en caída libre (IMT, 2004).

Variando el peso y la altura de caída se pueden generar diferentes cargas de impacto. La ventaja principal de estos equipos es su mecanismo de carga, ya que permite modelar bastante bien la magnitud como la duración de una carga real de tránsito (Solminihac, 2005).

- Light Weight Deflectometer (LWD). El LWD (Light Weight Deflectometer) es una versión portable del FWD (Falling Weight Deflectometer). El LWD usa una celda de carga y geófonos con la misma precisión que el FWD. El LWD puede ser usado para probar pavimentos asfálticos delgados, materiales reciclados ligados con asfalto espumado y probar directamente la sub-base y sub-rasante. El LWD puede producir una carga de hasta 15 kN (3,300 lbf), y pesa aproximadamente 22 kg.

La información obtenida del LWD puede ser usada para calcular el espesor de las múltiples capas del pavimento. El LWD se encuentra normado con el ASTM 2583, el modelo IAN73 (Reino Unido), el modelo Danés y el modelo italiano para la determinación del módulo y la compactación de un material.



Figura 11.- Light Weight Deflectometer (IMT, 2014).

- Falling Weight Deflectometer (FWD). Los FWD aplican un impulso que simula medio seno, con un pico mínimo de fuerza de 50 kN, con una duración del impulso de 20 a 60 ms y un tiempo de caída libre en el rango de 10 a 30 ms. Para realizar las mediciones de deflexiones se utilizan geófonos o transductores de velocidad (Dynatest, Phoenix, Foundation Mechanics) y sismómetros o una combinación de LVDT/acelerómetros (KUAB) (Dynatest y SME, 1994, citado por Solminihac, 2005).



Figura 12.- FWD (Falling Weight Deflectometer).

- FASTFWD. El FastFWD es cinco veces más rápido que el FWD (Falling Weight Deflectometer) está diseñado para impartir una carga a la superficie del pavimento simulando la carga producida por el paso de un vehículo. La carga es medida por una celda de carga con una resolución de 0.1 kPa, y la respuesta del pavimento es registrado por 15 sensores de deflexión con una resolución de 0.1 μm . Ver Figura 13.



Figura 13.- FastFWD.

- Truck Mounted Deflectometer (TMD). Para optimizar la vida útil del producto, Dynatest evolucionó el diseño del vehículo para permitir que fuera relativamente sencillo la conversión/intercambiabilidad para la finalización del ciclo de vida del vehículo original, o de un remolque de montaje, si se prefiere. El camión TMD (Truck Mounted Deflectometer) es particularmente adecuado para entornos de prueba que requieren plataformas más cortos de pruebas de longitud (sin perder la cobertura cuenco de deflexión) o en el que las compras de vehículos autónomos o las operaciones de vehículo-remolque son problemáticos. Al igual que con todos los miembros del modelo Dynatest 8000 y modelo 8081 Falling y Heavy Weight Deflectometer (FWD y HWD), el TMD proporciona totalmente mediciones rápidas y altamente exactas y precisas para un análisis estándar y procedimientos de diseño, incluyendo especialmente el análisis empírico-mecanicista de las estructuras de pavimento.



Figura 14.- Truck Mounted Deflectometer (TMD).

1.4.4. Equipos de nueva generación.

- Heavy Vehicle Simulator (HVS). El Heavy Vehicle Simulator es un equipo para realizar ensayos acelerados de pavimentos. Con una longitud total de 32 m y un peso de 48 ton, permite aplicar un rango de cargas que van desde media tonelada hasta 11 ton, en dos ruedas (medio eje dual) para camiones pesados y hasta 20 toneladas en una rueda de aeronave, así mismo el equipo puede ser operado en dos versiones, una corta con una viga central de 12 metros y una larga con una extensión hasta de 18 metros, esto permitiría aumentar la sección de prueba de 9 a 15 metros, y también la velocidad, de una máxima de 12 km/h en la versión corta hasta 20 km/h en la versión larga. Ver Figura 15.



Figura 15.- Heavy Vehicle Simulator en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

1.5. HEAVY WEIGHT DEFLECTOMETER (HWD).

Tradicionalmente, y con la finalidad de conocer las características estructurales, los ingenieros han recurrido a sondeos de exploración directa, mediante los cuales obtiene muestras que posteriormente son ensayadas en el laboratorio para conocer sus propiedades mecánicas y posteriormente incorporarlas en el modelo del pavimento, con lo cual deduce las características estructurales del mismo. Esta metodología es costosa, lenta y de carácter destructivo.

La alternativa que se presenta es una propuesta con ensayos no destructivos y considera las deflexiones que se generan en el pavimento al utilizar el deflectómetro de impacto, HWD (Heavy Weight Deflectometer). Ver Figura 16.



Figura 16.- Heavy Weight Deflectometer (HWD).

El deflectómetro de impacto es conocido generalmente como Falling Weight Deflectometer o Heavy Weight Deflectometer de acuerdo al modelo utilizado, el dispositivo generador de impacto es del tipo de masa en caída libre con un sistema de guía. El sistema debe ser capaz de levantar masas determinadas y soltarlas en caída libre. La onda generada por el impacto es transmitida al pavimento. La onda debe tener aproximadamente la forma haversine y aplicarse con una amplitud de pico a pico que varía según los propósitos del proyecto. La duración del impulso de

fuerza habrá de permanecer entre 20 y 60 ms o un tiempo de incremento de la carga de 0 a 30 ms.



Figura 17.- Sistema de carga y placa de carga HWD.

La placa de carga, en la parte inferior del sistema, debe ser capaz de distribuir uniformemente la carga sobre la superficie del pavimento. Los diámetros de las placas comúnmente son de 300 y 450 mm para mediciones en carreteras y aeropuertos respectivamente (ver Figura 17). Se cuenta con transductores de deflexión que miden el desplazamiento vertical máximo, para cada punto del pavimento evaluado, obteniéndose así la cuenca de deflexiones (Figura 18 y Figura 19). El número de estos transductores o geófonos depende del tipo de prueba que se realice y está en función del pavimento en estudio. La distribución típica, y utilizada en este proyecto, es de: 0, 200, 300, 450, 600, 900 y 1200 mm de distancia respecto a la placa de aplicación de carga.

La celda de carga es la que permite la medición de las cargas y esfuerzos aplicados sobre la superficie y debe ser resistente al agua y a los impactos durante el desarrollo de los trabajos.

Los impactos que se aplican producen esfuerzos sobre el pavimento, que simulan a los que son transmitidos por el tránsito, el equipo HWD (Heavy Weight Deflectometer) puede generar un impulso de carga que puede variar desde 30 hasta 320 kN, para este trabajo se aplicaron 40 kN que equivalen a un eje equivalente. Las metodologías de evaluación dependen de las condiciones específicas del pavimento y de la longitud por estudiar; por ejemplo, para fines de diseño de sobrecarpetas o

de rehabilitación de tramos carreteros, pueden realizarse las mediciones a intervalos desde 50 hasta 200m, para análisis de red pueden ir desde 500m hasta cada 5km dependiendo de la extensión de esta. Existen algunas limitaciones para la medición de las deflexiones, entre estas la más importantes es la pendiente longitudinal del tramo, ya que el equipo no puede realizar las mediciones en pendientes mayores del 5%.

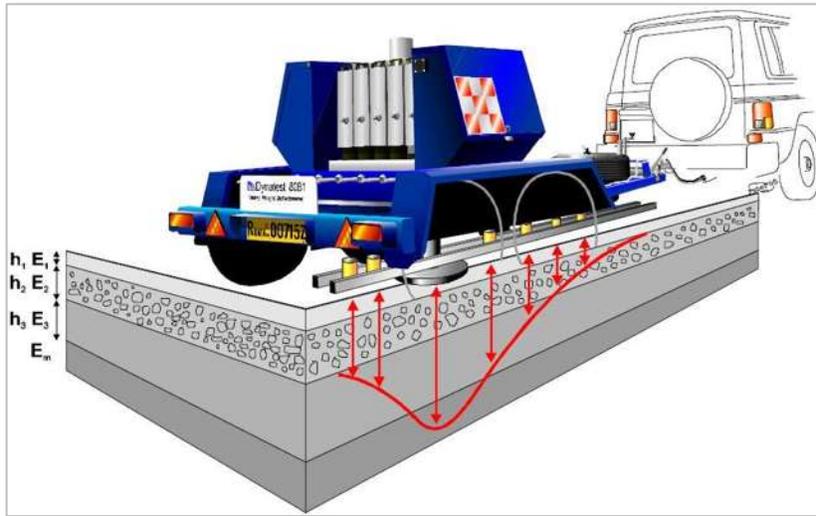


Figura 18.- Cuenca de deflexiones (DYNATEST).

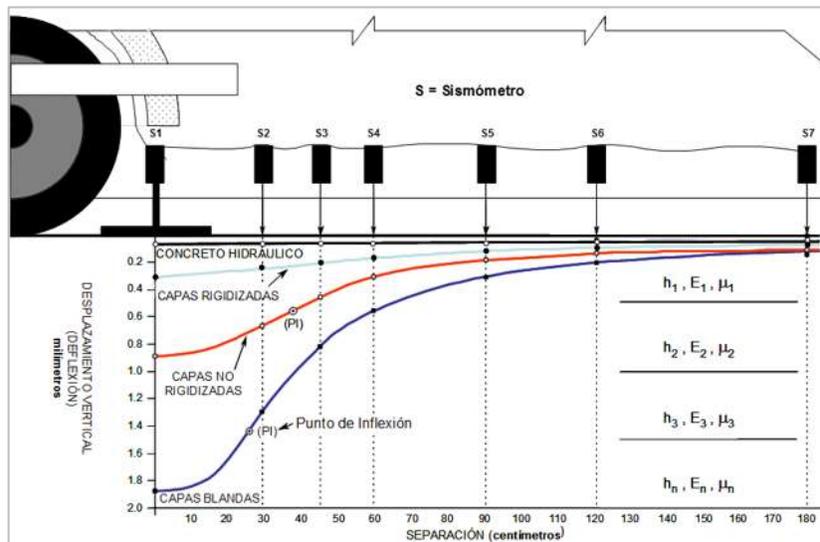


Figura 19.- Cuencos de deflexiones para distintas rigideces de las capas de pavimento. (Orozco, 2005).

1.6. ANÁLISIS DE LAS DEFLEXIONES OBTENIDAS.

Para relacionar la información que fue obtenida por el Heavy Weight Deflectometer (HWD) y así mismo saber si la capacidad estructural del pavimento está en buenas o malas condiciones, es necesario procesar esta información mediante metodologías empíricas.

La mayoría de los procedimientos de diseño utilizados son empíricos, en donde el criterio de falla está basado en un set determinado de condiciones, por ejemplo: tráfico, materiales, configuración de las capas y condiciones ambientales (Solminihac, 2005).

Los otros tipos de método son los mecanicistas, basándose en relaciones físicas para determinar la reacción de las estructuras cargadas. En la práctica, métodos estrictamente mecanicistas no existen, generalmente se combinan con la experiencia empírica. Estos métodos que combinan ambos elementos se denominan empírico-mecanicistas. La componente mecanicista está dada por la respuesta estructural del pavimento, como tensiones, deformaciones y deflexiones dentro de las capas del pavimento determinado a través del uso de modelos matemáticos, y la parte empírica se utiliza para relacionar estas respuestas con el comportamiento del pavimento in situ (Solminihac, 2005).

1.6.1. Tratamientos preliminares de las deflexiones.

1.6.1.1. Normalización de deflexiones.

Inicialmente los datos de Deflexión obtenidos, se normalizan por carga teniendo en cuenta el valor de la carga con que fueron generados y considerando que la reacción al aplicar la carga no siempre es constante. Esta corrección se realiza proporcionalmente, es decir, aplicando la ecuación (1).

$$d_i = d_{io} \left(\frac{P_r}{P_o} \right) \quad (1)$$

Donde:

d_i = Deflexión del sensor i , corregida a la carga P_r

d_{io} = Deflexión del sensor i , medida en campo con la carga de aplicación P_o

P_r = Carga a la cual se normalizarán las mediciones

P_o = Carga en kN aplicada en las mediciones de campo

Ejemplo: Normalizar a 566 kPa el siguiente set de deflexiones obtenidas con equipo HWD.

Tabla 1.- Ejemplo de Normalización.

Cadenamiento	Esfuerzo (kPa)	Carga (kN)	D0 (μm)	D200 (μm)	D300 (μm)	D450 (μm)	D600 (μm)	D900 (μm)	D1200 (μm)
34+500	605	43	462	374	279	238	181	104	70

Se requiere normalizar a 566 kPa para obtener los 40 kN que se requieren. Utilizando la ecuación (1) tenemos:

$$D_0 = 462 \left(\frac{566}{605} \right) = 432.22 \approx 432$$

De la misma manera se calculan para los demás sensores, quedando de la siguiente manera:

Tabla 2.- Ejemplo de Normalización (continuación).

Cadenamiento	Esfuerzo (kPa)	Carga (kN)	D0 (μm)	D200 (μm)	D300 (μm)	D450 (μm)	D600 (μm)	D900 (μm)	D1200 (μm)
34+500	566	40	432	350	261	222	169	97	65

1.6.1.2. Corrección de deflexiones por temperatura.

Es sabido que, debido a la naturaleza del concreto asfáltico, la temperatura tiene un impacto directo sobre el comportamiento esfuerzo-deformación de la estructura del pavimento flexible. Este efecto se ve directamente reflejado en los parámetros del cuenco de deflexiones medido con el deflectómetro de impacto (FWD) a diferentes

temperaturas. El grado de influencia de la temperatura sobre el módulo de elasticidad del asfalto, y consecuentemente sobre las deflexiones, depende entre otros factores del tipo de mezcla, de su edad, de su grado de deterioro, espesor, etc. (Garnica *et al* (2015)).

En la literatura especializada se pueden encontrar diversos métodos para ajustar o corregir deflexiones obtenidas a diferentes temperaturas y ajustarlas a una en común denominada temperatura de referencia; lo anterior con el fin de poder realizar comparaciones entre diferentes tramos carreteros o bien, entre diferentes zonas de un mismo tramo evaluado. A manera enunciativa se tienen los distintos métodos para corregir temperaturas (Garnica *et al* (2015)):

- Método AASHTO 93 para una temperatura de referencia de 20°C.
- Método del Instituto del Asfalto 1983 para una temperatura de referencia de 21°C.
- Método del CEDEX para una temperatura de referencia de 20°C.
- Método de la Universidad Católica de Chile de 1989 para ajustar deflexiones a 20°C.
- Método MOPT de Costa Rica de 1977 para una temperatura de referencia de 20°C.
- Método del FHWA la cual solo involucra la temperatura a la cual se realizó la medición.
- Método del IMT del 2015 para una temperatura de referencia de 20°C.

Para llevar a cabo este ajuste se utilizaron las fórmulas descritas en la publicación FHWA-RD-98-085 de la Federal Highway Administration, y que corresponden a las correcciones propuestas por BELLS. Ver ecuaciones (2), (3), (4), (5), (6).

$$AREA = 13.0 + 7.77 * \log(ac) * \log(defl36) - 6.78 * \log(\theta) \quad (2)$$

$$* \log(defl36) + 0.105 * T - 0.116 * T * \log(ac)$$

$$TAF = \frac{defl36 + \delta_{36}^{TempRef}}{defl36 + \delta_{36}^{TempMedi}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 \log(\mathbf{delta36}) &= 3.05 - 1.13 * \log(ac) + 0.502 * \log(\theta) * \log(defl36) \\
 &- 0.00487 * T * \log(\theta) * \log(defl36) + 0.00677 * T * \log(ac) \\
 &* \log(\theta)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Dónde:

AREA = Área del cuenco de deflexiones (mm)

ac = Espesor total de la capa estabilizada (mm)

defl36 = Deflexión normalizada a 40 kN a 915 mm del centro del plato de carga (µm)

θ = Latitud geográfica del tramo en estudio

T = Temperatura a la mitad de la capa estabilizada (°C)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{delta36}_{Temp\ Ref} &= \text{Diferencia de deflexiones } D0 \\
 &- D36 \text{ a una temperatura de referencia de } 20^{\circ}\text{C (mm)}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{delta36}_{Temp\ Med} &= \text{Diferencia de deflexiones } D0 \\
 &- D36 \text{ a una temperatura de medición (mm)}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

TAF = Factor de ajuste

El módulo de la carpeta asfáltica varía con la temperatura por lo que es necesario convertir los módulos calculados a una temperatura de referencia. El programa ELMOD recomienda la ecuación (7) de forma exponencial que se muestra a continuación, misma que se utiliza para ajustar los módulos de la carpeta asfáltica a una temperatura de referencia de 25 °C.

$$E = e^{A(t-t_{ref})} E_{ref}
 \tag{7}$$

Donde:

t_{ref} = Temperatura de referencia, 25°C.

t = Temperatura de la capa asfáltica al momento de la prueba.

$A = -0.036$

E = Módulo obtenido por retrocálculo a la temperatura de prueba.

E_{ref} = Módulo ajustado a la temperatura de referencia.

En la Figura 20 se observa el comportamiento de las capas asfálticas respecto a la temperatura. Puede observarse que a medida que la temperatura aumenta, el módulo elástico tiende a disminuir dado que el asfalto se vuelve más blando y por lo tanto su resistencia disminuye. Por otro lado, a medida que la temperatura disminuye, el módulo elástico de la carpeta tiende a aumentar dado que se rigidiza y aumenta su resistencia.

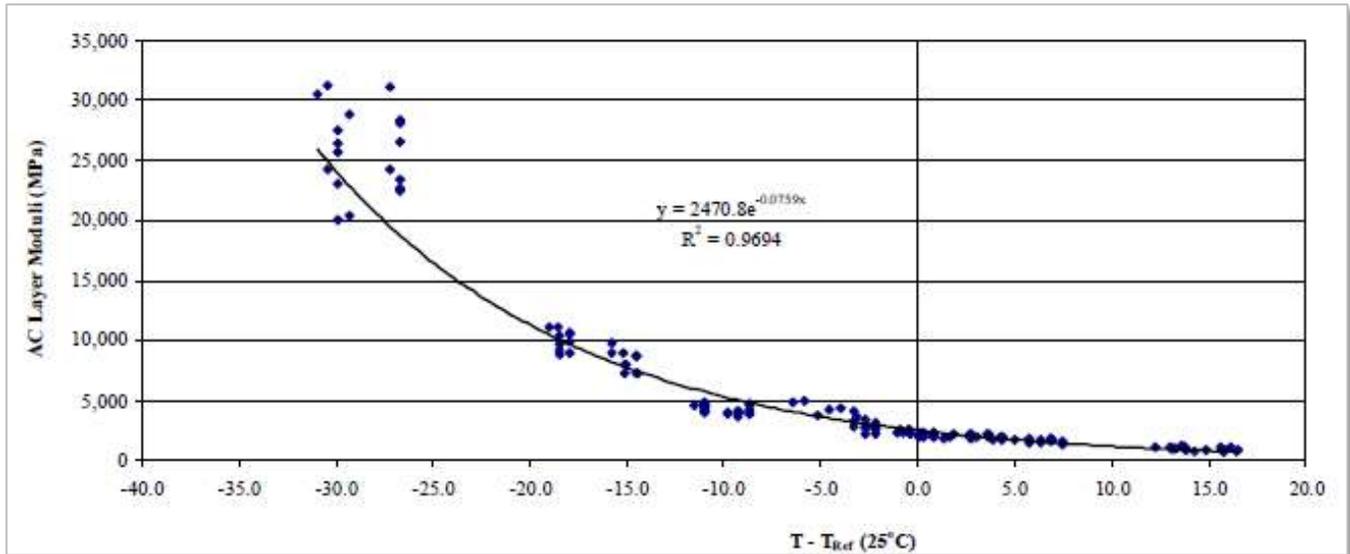


Figura 20.- Comportamiento de las capas asfálticas con la temperatura BELLS (ELMOD).

1.7. METODOLOGÍAS EMPÍRICO-MECANICISTAS PARA LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS.

Una vez que las deflexiones están normalizadas y corregidas por temperatura, se procede a analizarlas mediante ciertas metodologías empíricas que más adelante se describen pero que nos dan en términos generales los siguientes parámetros:

- Evaluaciones de la situación actual del pavimento y del suelo de cimentación.
- Espesores de refuerzo sobre el pavimento existente.
- Tipos de tratamiento o intervención superficial.

A continuación se describen cada una de las metodologías empleadas en este proyecto y los principales parámetros que se obtienen de ellos.

1.7.1. Metodología del área normalizada vs deflexión máxima (Ing. Manuel Zárate Aquino).

Esta metodología permite obtener una respuesta tanto de la estructura del pavimento y el apoyo de esta (sub-rasante) y determinar si estas se encuentran en buenas o malas condiciones. Para ello se requiere calcular los siguientes parámetros:

1.7.1.1. Área normalizada del cuenco de deflexiones.

Representa la mitad de una sección de la cuenca de deflexiones. Esto significa que dicha área se divide entre la máxima deflexión, la cual se ubica bajo el punto de impacto.

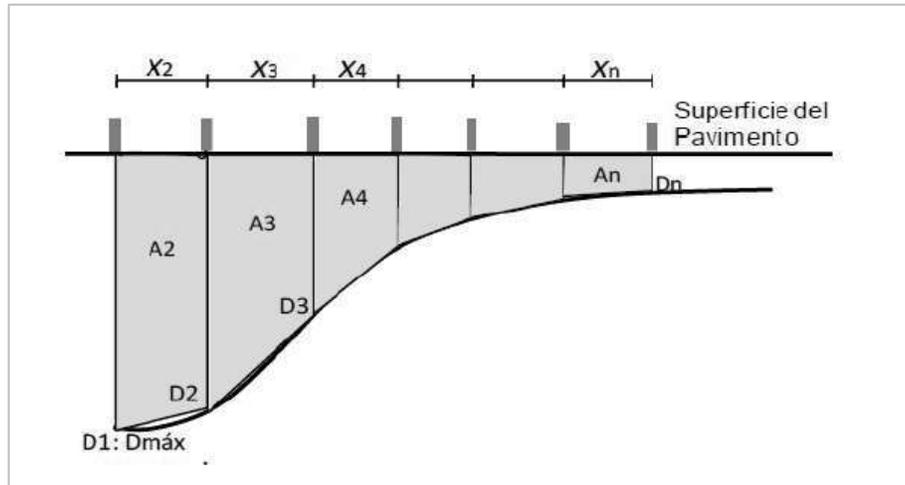


Figura 21.- Cuenca de deflexiones (Beltrán et al 2012).

Dicha área normalizada puede ser obtenida con las ecuaciones (8) y (9).

$$A(\text{in}) = 6 \left(1 + 2 \frac{D_1}{D_0} + 2 \frac{D_2}{D_0} + \frac{D_3}{D_0} \right) \quad (8)$$

$$A(\text{mm}) = 150 \left(1 + 2 \frac{D_1}{D_0} + 2 \frac{D_2}{D_0} + \frac{D_3}{D_0} \right) \quad (9)$$

Donde:

A = Área normalizada, en pulgadas o en milímetros.

D_0 = Deflexión bajo la carga, en micras.

D_1 = Deflexión a 305 mm de distancia de la carga aplicada, en micras.

D_2 = Deflexión a 610 mm de distancia de la carga aplicada, en micras.

D_3 = Deflexión a 914 mm de distancia de la carga aplicada, en micras.

1.7.1.2. Máxima deflexión.

Es la deflexión que ocurre bajo el punto de impacto. La máxima deflexión corresponde a la deflexión medida por el sensor ubicado bajo el plato de carga.

1.7.1.3. Factor de forma, F_2 .

Refleja la rigidez relativa de las capas superiores del pavimento. Ver ecuación (10).

$$F_2 = \frac{D_1 - D_3}{D_1} \quad (10)$$

Donde:

F_2 = Factor de forma, adimensional.

D_1 = Deflexiones a 305 mm de distancia del punto de impacto.

D_3 = Deflexiones a 914 mm de distancia del punto de impacto.

1.7.1.4. Índice de curvatura superficial, SCI .

Refleja la rigidez relativa de las capas superiores del pavimento. Ver ecuación (11).

$$SCI = D_0 - D_1 \quad (11)$$

Donde:

SCI = Índice de curvatura superficial.

D_0 = Deflexión bajo el punto de impacto.

D_1 = Deflexiones a 305 mm de distancia del punto de impacto.

1.7.1.5. Relación de deflexión, Q_r .

Esta relación, depende de las deflexiones que se miden a 305mm o 500mm de distancia bajo el punto de impacto y de la deflexión medida bajo dicho punto. Ver ecuación (12).

$$Q_r = \frac{D_r}{D_0} \quad (12)$$

Donde:

Q_r = Relación de deflexión, adimensional.

D_r = Deflexión a 305 mm o 500 mm.

D_0 = Deflexión bajo el punto de impacto.

1.7.1.6. Módulo de rigidez dinámica, MRD .

Este indicador manifiesta la rigidez del pavimento, y se define como la fuerza dinámica dividida entre la máxima deflexión registrada, y proporciona información sobre la resistencia integral del pavimento y es útil para efectuar una zonificación de tramos. Ver ecuación (13).

$$MRD = \frac{L}{D_0} \quad (13)$$

Donde:

MRD = Módulo de Rigidez Dinámica, kg/cm^2

L = Fuerza dinámica, en kg .

D_0 = Deflexión bajo el punto de impacto.

Para los indicadores anteriores, la metodología propone ciertos valores frontera para diferenciar pavimentos en buen y mal estado. Ver Tabla 3.

Tabla 3.- Valores típicos y rangos deseables de los indicadores de la metodología de área normalizada vs deflexión máxima.

Indicador	Rango o valor típico
Área normalizada	600 - 800 mm
Deflexión máxima	75 - 300 micras (3 - 12 x 10 ⁻³ pulg)
Factor de forma	0.0 - 0.50
Índice de curvatura superficial	0 - 150
Relación de deflexión	0.70 - 1.00
Módulo de rigidez dinámica	> 200 000 kg/cm ²

Con los valores obtenidos anteriormente y mediante gráficas se pueden obtener los resultados para determinar si la estructura y el apoyo de pavimento (cimentación) se encuentran en buenas o malas condiciones. Ver Tabla 4.

1.7.1.7. Deflexión máxima y área normalizada.

Tabla 4.- Definición de condición estructural del pavimento por cuadrantes.

Área normalizada vs Deflexión máxima	
Cuadrante I	Estructura y subrasante resistente
Cuadrante II	Estructura resistente y subrasante débil
Cuadrante III	Estructura débil y subrasante resistente
Cuadrante IV	Estructura y subrasante débil

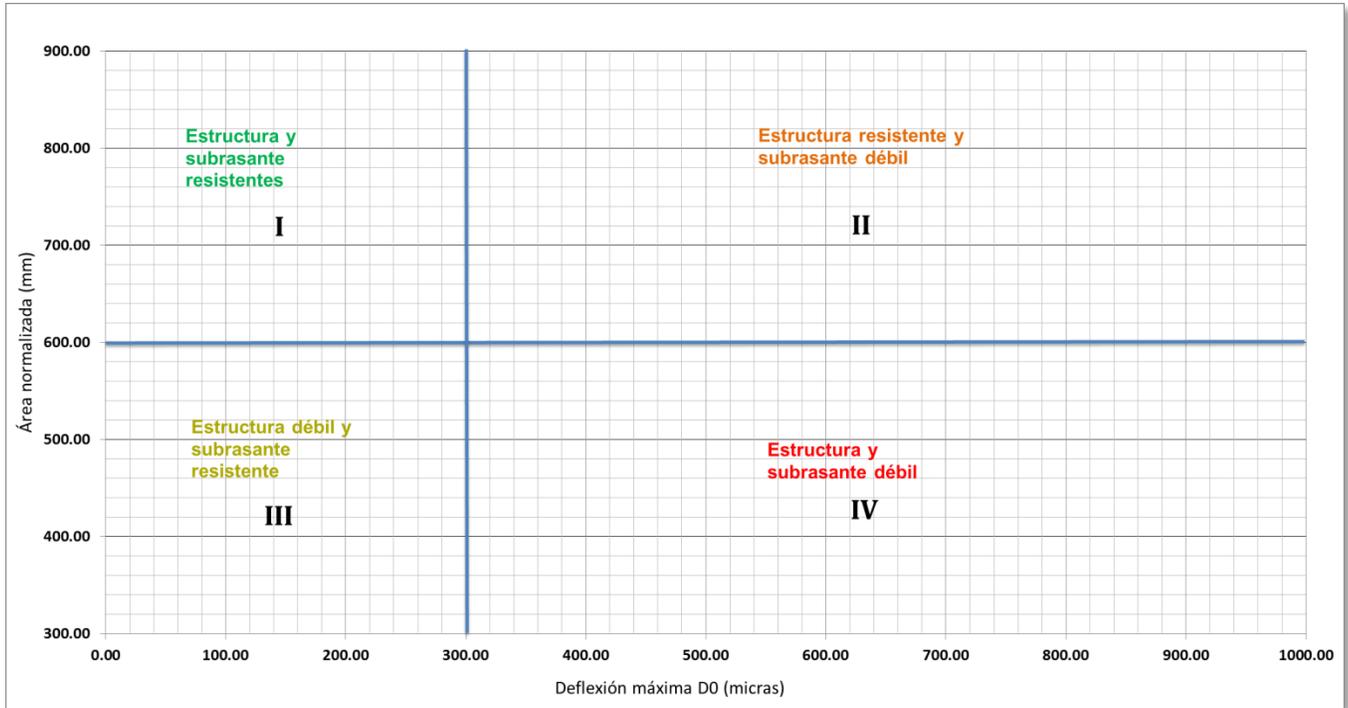


Figura 22.- Gráfico Deflexión máxima vs Área normalizada.

1.7.1.8. Factor de forma y deflexión máxima.

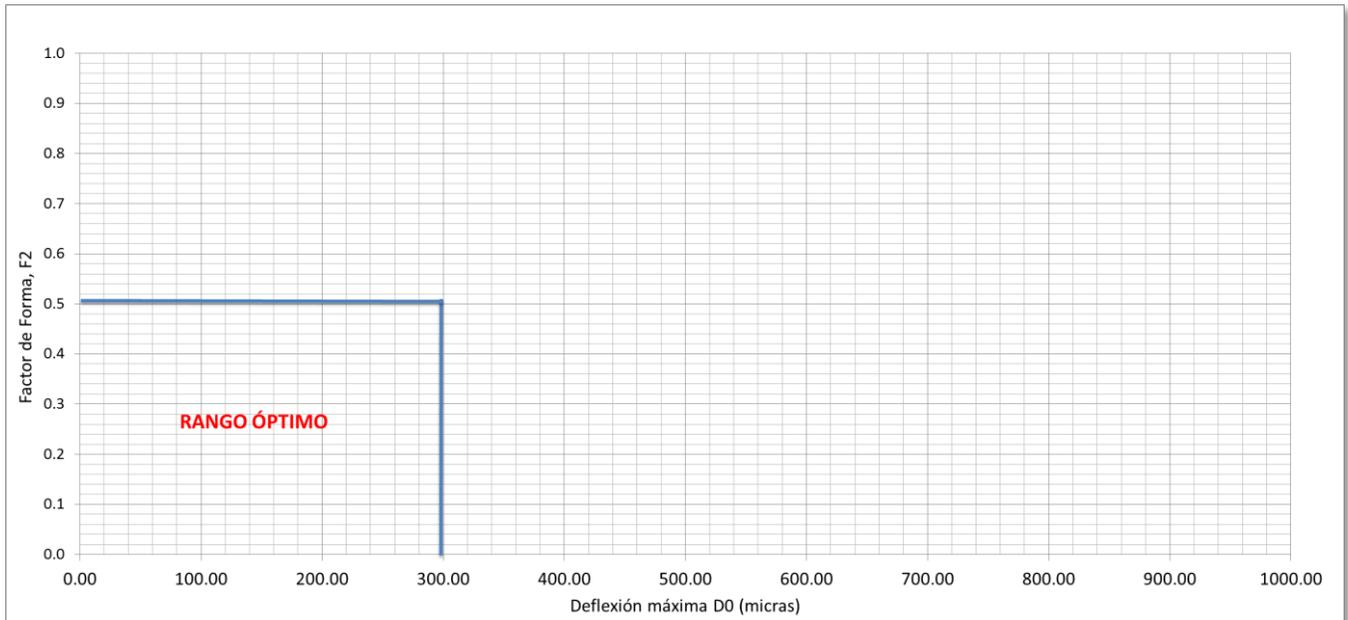


Figura 23.- Gráfico Deflexión máxima vs Factor de forma F2.

1.7.1.9. Índice de curvatura superficial y deflexión máxima.

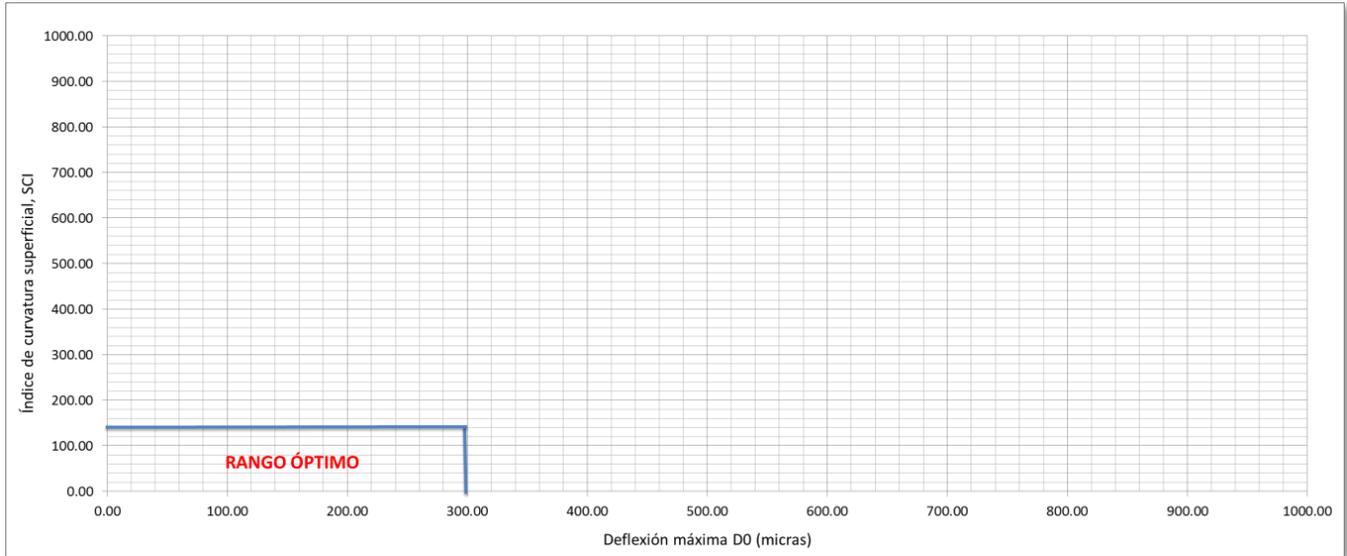


Figura 24.- Gráfico Índice de curvatura superficial vs deflexión máxima.

1.7.1.10. Relación de deflexión y deflexión máxima.

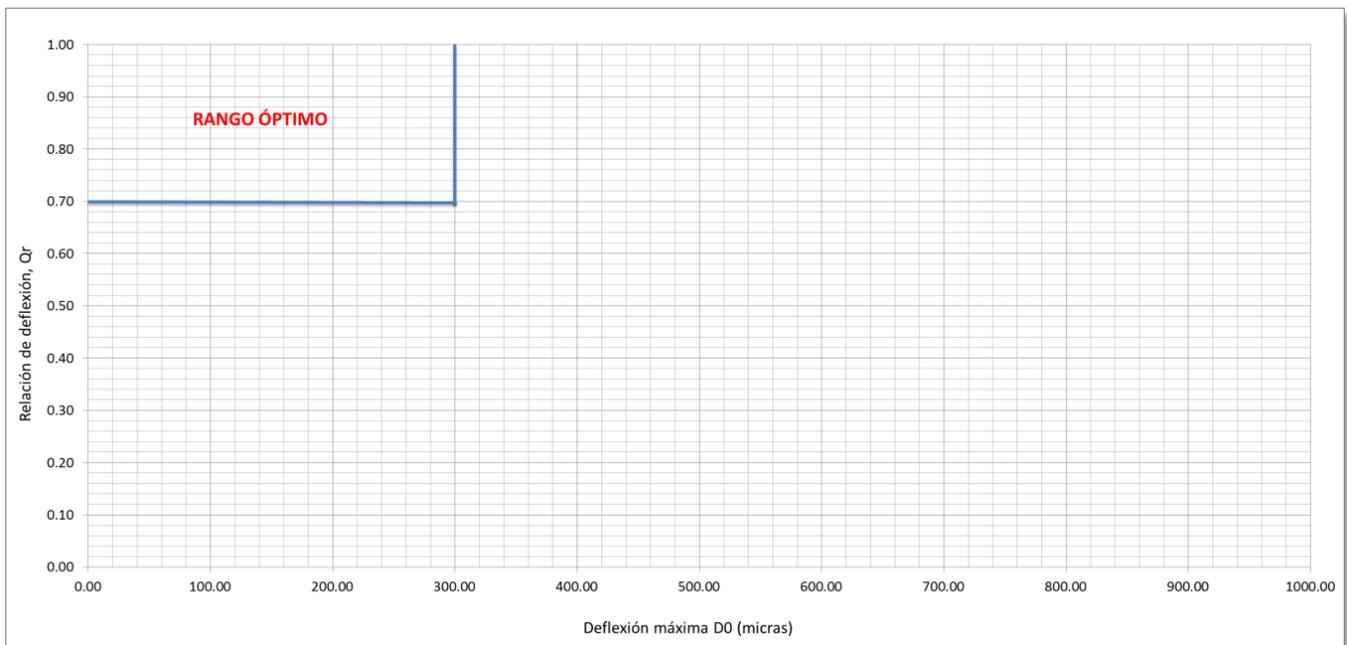


Figura 25.- Gráfico Relación de deflexión vs Deflexión máxima.

1.7.1.11. Módulo de rigidez y deflexión máxima.

Tabla 5.- Valores de Módulo de Rigidez vs Deflexión Máxima.

Módulo de rigidez vs Deflexión máxima	
1	Estructura y subrasante resistente
2	Estructura débil y subrasante resistente
3	Estructura y subrasante débil

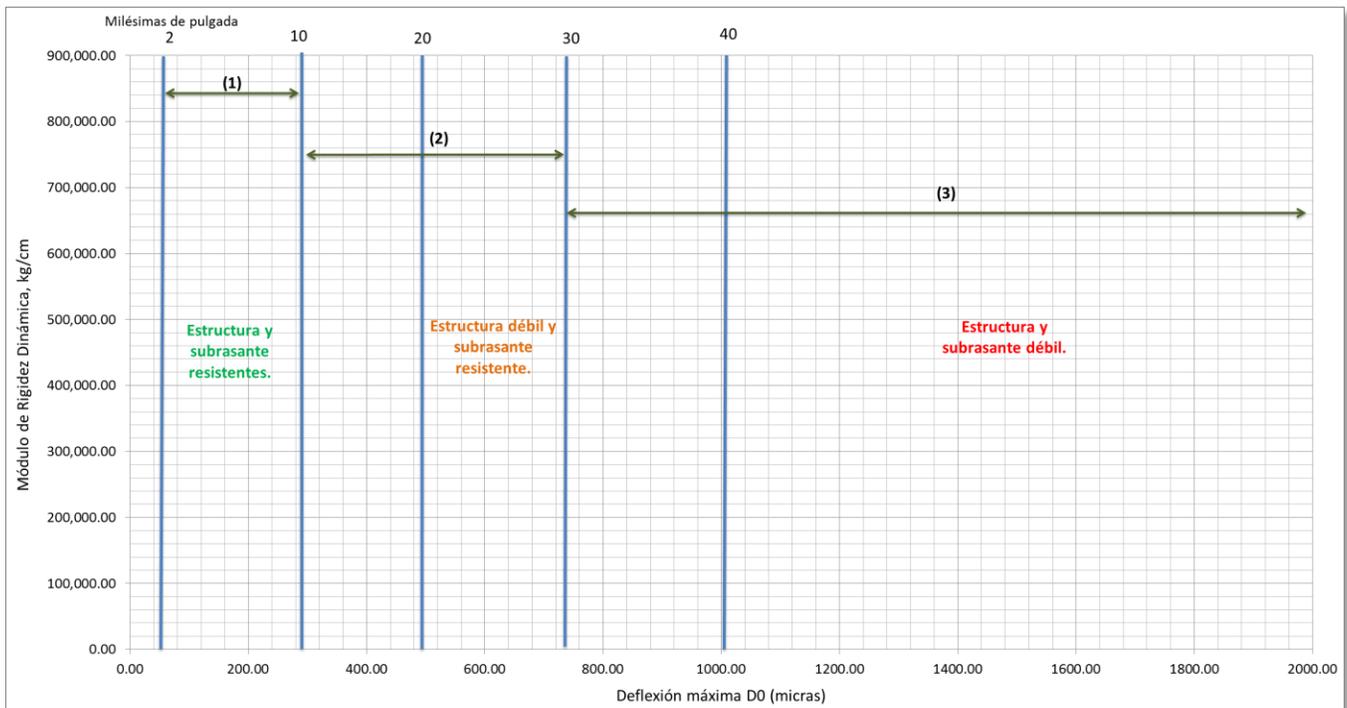


Figura 26.- Gráfico de Valores de Módulo de Rigidez vs Deflexión máxima.

1.7.2. METODOLOGÍA DEL DR. RAÚL VICENTE OROZCO.

La metodología del Dr. Raúl Vicente Orozco propone encontrar el índice estructural del pavimento y mediante este parámetro se le da una calificación estructural para determinar qué tipo de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción se le dará a la estructura del pavimento.

1.7.2.1. Área de la cuenca de deflexiones.

Para obtener dicha área de forma suficientemente aproximada, se puede emplear el método de los trapecios en los que se descompone esta. El valor del área del cuenco así calculado, viene dado por la fórmula (14).

$$\text{Área} = \sum \frac{(d_i + d_{i+1}) * S_{i+1}}{2} \quad (14)$$

Donde:

A = Área de la cuenca de deflexiones.

d_i = Deflexión medida en el sensor i .

d_{i+1} = Deflexión medida en el sensor $i + 1$.

S_{i+1} = Distancia entre el sensor i y el $i + 1$.

Esta fórmula es diferente a la expresada por el Ing. Manuel Zárate Aquino en el apartado anterior.

1.7.2.2. Índice estructural (I_e).

Este parámetro adimensional se calcula con la ecuación (15).

$$I_e = \frac{\delta_1}{\rho_i} * 100 \quad (15)$$

Donde:

I_e = Índice estructural, adimensional.

δ_1 = Deflexión medida bajo el punto de aplicación de la carga, en mm.

ρ_i = Distancia entre el eje vertical bajo la carga (S_1) y el punto de inflexión en la curva ajustada de la cuenca de deflexiones, en mm.

1.7.2.3. Calificación estructural (C_e).

Esta calificación depende del índice estructural y va de un rango de 5 a 10 y dependiendo de la calificación obtenida, se puede expresar en qué condiciones se encuentra el pavimento.

El cálculo de estos parámetros y la lectura de ellos representan la solución a considerar en el pavimento en estudio, véase *Tabla 6*.

Tabla 6.- Soluciones a considerar según la metodología del Dr. Raúl Vicente Orozco.

Calificación estructural (C_e)		Índice estructural (I_e)	Solución a considerar
10	Excelente	0 a 0.05	Tratamiento superficial
9	Muy buena	0.05 a 0.1	
8	Buena	0.1 a 0.2	Reforzamiento con carpeta
7	Regular	0.2 a 0.3	
6	Mala	0.3 a 0.4	Recuperación <i>in situ</i>
5	Pésima	> 0.4	

1.7.2.4. Expresión Boussinesq.

$$\Delta = \frac{\delta_1}{1 + (5\lambda)^c} \quad (16)$$

Donde:

Δ = Deflexión calculada a cualquier distancia, en mm.

δ_1 = Deflexión medida en el punto de aplicación de la carga (S_1), en mm.

c = Factor de forma, adimensional.

λ = Relación de distancias, adimensional.

Donde:

$$c = \left(\frac{\delta_1}{\delta_7} \right)^{0.26} \quad (17)$$

$$\lambda = \frac{r}{R} \quad (18)$$

c = Factor de forma, adimensional

δ_1 = Deflexión medida en el punto de aplicación de la carga (S_1), en mm.

δ_7 = Deflexión medida en el punto del último sensor (S_7), en mm.

λ = Relación de distancias, adimensional.

r = Distancia al punto de aplicación de la carga aplicada, en mm.

R = Distancia al último sensor (S_7) = 1800 mm.

1.7.2.5. Punto de Inflexión.

$$\rho_i = \sqrt{\frac{c-1}{c+1} \left(\frac{R}{5} \right)} \quad (19)$$

ρ_i = Distancia entre el eje vertical bajo la carga (S_1) y el punto de inflexión en la curva ajustada de la cuenca de deflexiones, en mm.

c = Factor de forma, adimensional.

R = Distancia al último sensor (S_7) = 1800 mm.

1.8. RETROCÁLCULO O CÁLCULO INVERSO.

La teoría de la elasticidad ha sido el método más utilizado para determinar las respuestas de las capas que constituyen la estructura de un pavimento, por ejemplo, esfuerzos críticos, deformaciones o deflexiones causadas por las cargas del tráfico en combinación con los efectos del medio ambiente.

El procedimiento para determinar el módulo de elasticidad en los materiales de pavimentación, utilizando las deflexiones de superficie, que se deriva de su comportamiento elástico es conocido como retrocálculo o cálculo inverso. En simples palabras el retrocálculo es el proceso de convertir las deflexiones medidas en un pavimento a módulos elásticos de capas en el lugar.

La técnica de retrocálculo es una solución inversa del problema del cálculo de las deflexiones de superficie en una estructura de pavimento para la cual la carga, las propiedades elásticas de los materiales y el espesor de las capas se conocen. Ver Figura 27.

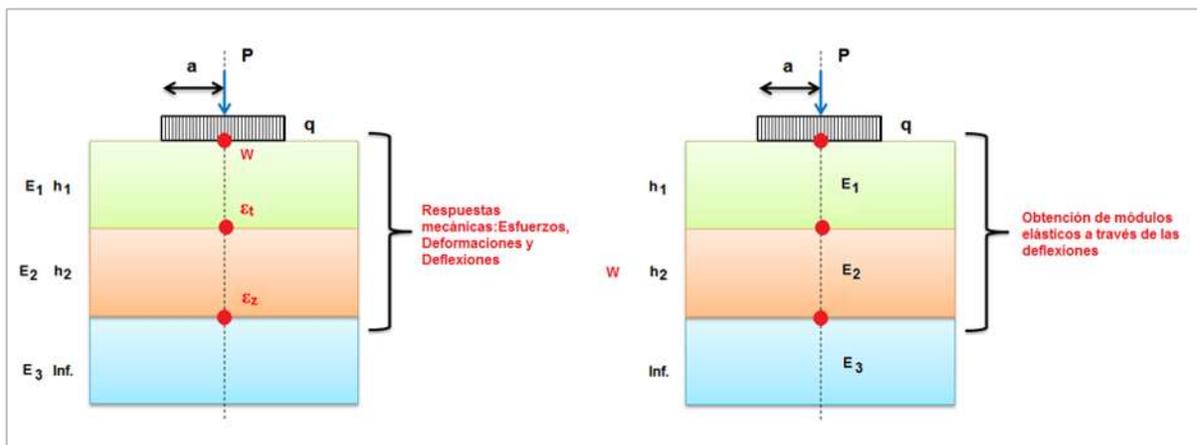


Figura 27.- Respuestas mecánicas obtenidas en el cálculo directo y en el cálculo inverso (Retrocálculo).

El cálculo inverso o retrocálculo consiste en partir de las respuestas del pavimento (para este caso especial el cuenco de deflexiones) que junto con los espesores de las capas del pavimento nos dan los módulos elásticos de las capas del pavimento mediante la secuencia de cálculo numérica de Odemark-Boussinesq

para estructuras equivalentes, que incorpora soluciones para materiales con propiedades no lineales (comúnmente exhibidos en sub-rasantes compuestas de materiales cohesivos). Ver Figura 28.

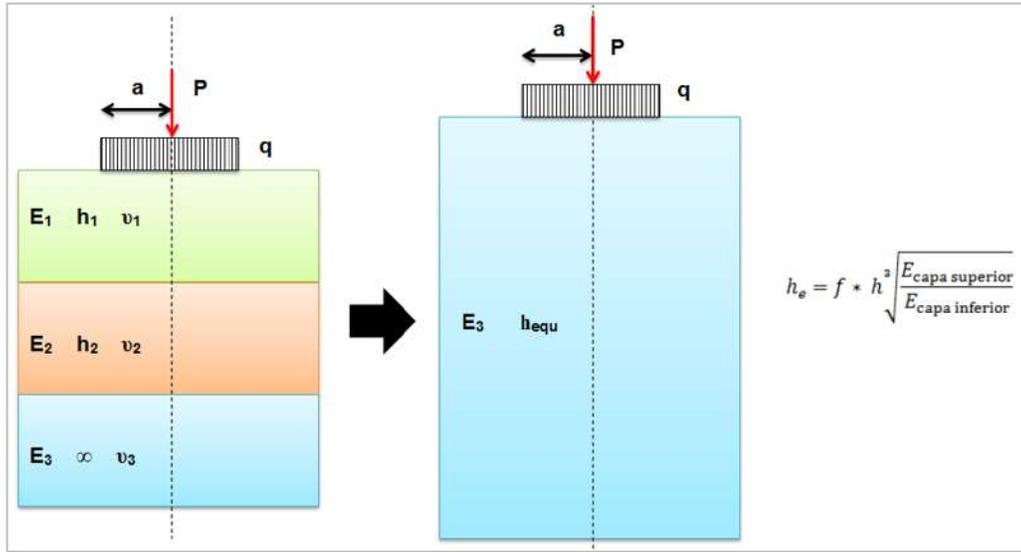


Figura 28.- Teoría de espesores equivalentes de Odemark utilizadas en el análisis de retrocálculo (IMT, 2015).

El principio de la técnica de retrocálculo es que un conjunto inicial de valores característicos del módulo de elasticidad de las capas se ajusta continuamente hasta la cuenca de deflexión estimada, para que se aproxime lo suficiente a la cuenca de deflexión medida. Para ello se requiere determinar la media cuadrática que relaciona las deflexiones mencionadas con anterioridad. Ver ecuación (20).

$$RMS (\%) = 100 \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \quad (20)$$

Donde:

RMS (Root Mean Square) = Media cuadrática.

n_d = Número de mediciones sobre la cuenca de deflexiones a diferentes distancias.

d_{ci} = Deflexión calculada.

d_{mi} = Deflexión medida.

De la Figura 29 a la Figura 33 se muestran los ajustes de las cuencas de deflexiones medidas y calculadas. Obsérvese en cada una de ellas la manera en que la media cuadrática va siendo cada vez menor según Dynatest.

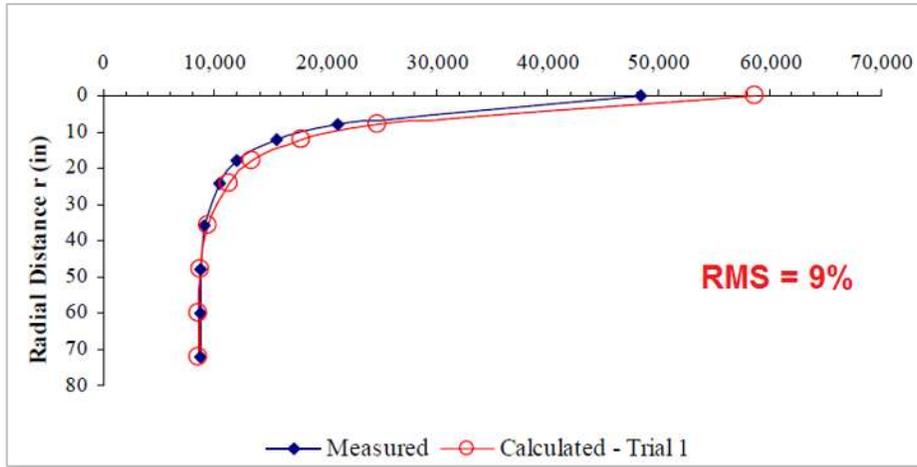


Figura 29.- Primer ajuste de cuencas de deflexión con RMS = 9% (Dynatest).

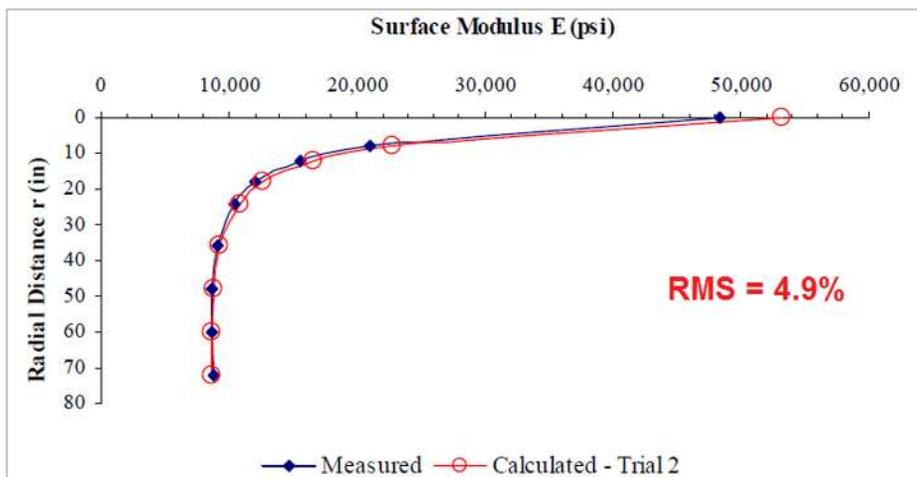


Figura 30.- Segundo ajuste de cuencas de deflexión con RMS = 4.9% (Dynatest).

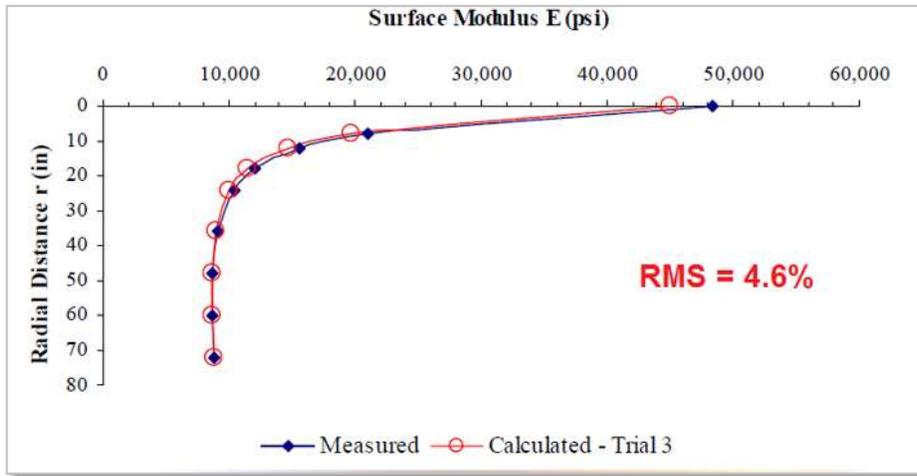


Figura 31.- Tercer ajuste de cuencas de deflexión con RMS = 4.6% (Dynatest).

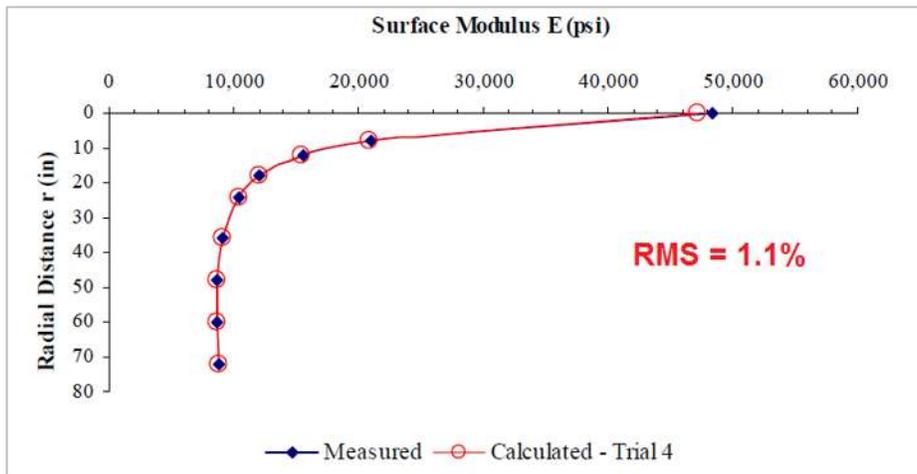


Figura 32.- Cuarto ajuste de cuencas de deflexión con RMS = 1.1% (Dynatest).

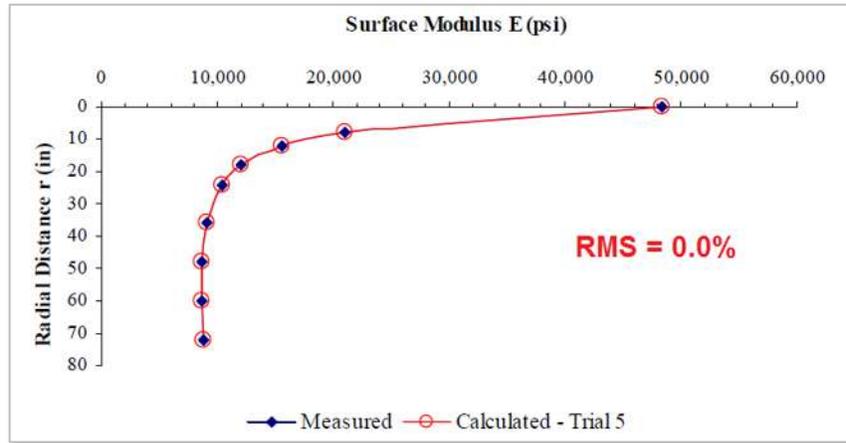


Figura 33.- Quinto ajuste de cuencas de deflexión con $RMS = 0.0\%$, totalmente ajustada (Dynatest).

De manera complementaria la Federal Aviation Administration (FAA) de los Estados Unidos en su programa de retrocálculo BAKFAA lleva a cabo un ajuste similar en las cuencas de deflexión. Ver Figura 34.

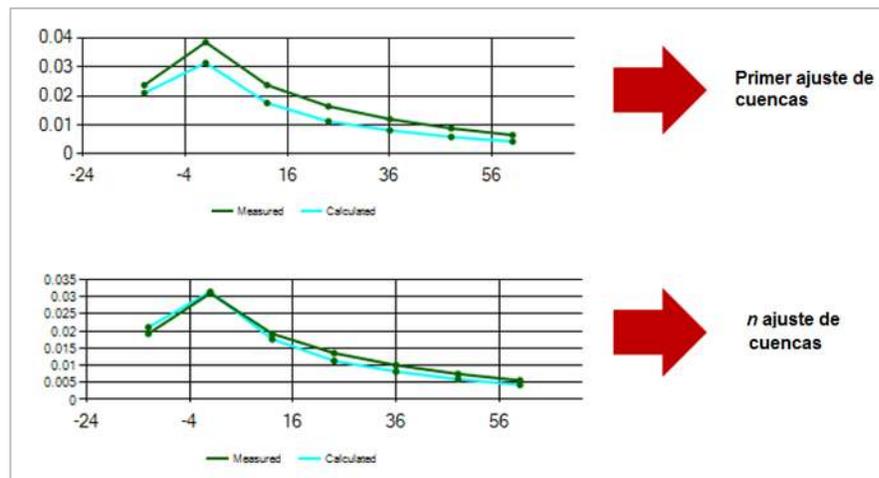


Figura 34.- Ajuste de cuencas de deflexión entre la medida y la calculada (FAA).

Para llevar a cabo el análisis del retrocálculo, se requieren los espesores de las capas del pavimento de la carretera analizada. Estos espesores pueden obtenerse mediante pozos a cielo abierto o calas a distancias predeterminadas (a cada 50 o 500m) dependiendo de la importancia del proyecto (Ver Figura 35). Puede utilizarse equipo más sofisticado no destructivo como el Ground Penetrating Radar (GPR) el cual emite ondas electromagnéticas al interior del pavimento localizando cambios en

las densidades de los materiales, con lo cual se pueden obtener los espesores de las capas del mismo.



Figura 35.- Espesores de capas de pavimento obtenidos de calas o sondeos (corte transversal).

Una vez obtenidos los espesores de las capas del pavimento, se construyen “larguillos” donde se detalla el cadenamiento de la carretera y la o las estructuras del pavimento. Ver Figura 36.

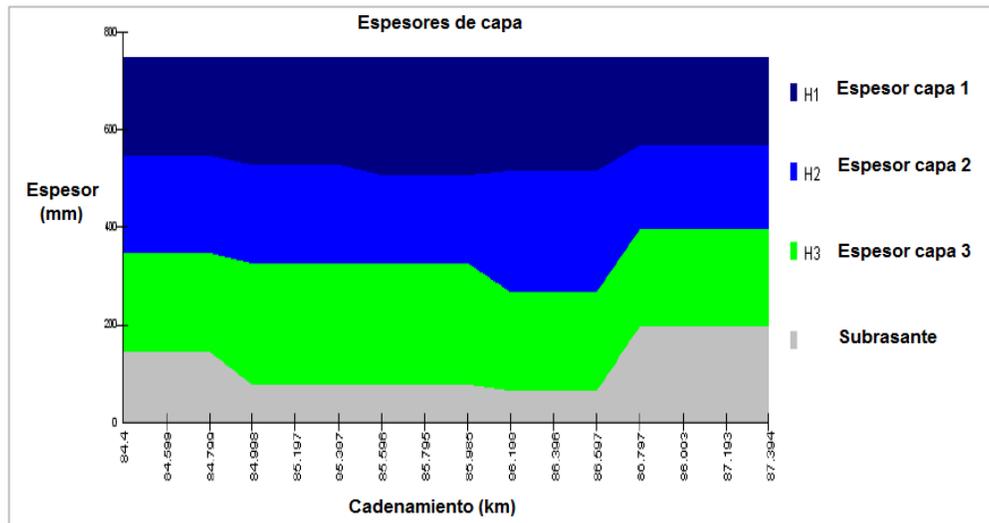


Figura 36.- Larguillo con los espesores de cada una de las capas de pavimento.

El retrocálculo se realiza de forma iterativa tal y como se describe a continuación:

- a) Se parte de una estimación inicial de los módulos elásticos de las capas.
- b) Con estos módulos se calculan las deflexiones mediante un programa de cálculo estructural.
- c) Se comparan las deflexiones calculadas con las medidas y si son suficientemente parecidas se aceptan como válidos esos módulos.
- d) En caso de que el ajuste no sea satisfactorio se reajustan los módulos y se vuelve a repetir el proceso.

La forma o proceso de reajuste de los módulos (inciso d) está basado en métodos matemáticos para la resolución de sistemas no lineales y es el núcleo del proceso de retrocálculo.

Existen diversas recomendaciones prácticas para llevar a cabo un retrocálculo de manera eficiente por parte de agencias de transporte en los Estados Unidos y proveedores de equipos FWD o HWD. Algunas de ellas se mencionan a continuación:

- El espesor de la capa superior (más rígida) deber ser mayor que la mitad del radio de la placa de carga. (Espesor de carpeta asfáltica ≥ 7.5 cm).
- Cuando se tengan varias sobrecarpetas asfálticas, combínense en una sola capa (*Mapping Layers*). Ver Figura 37.
- Cuando se tenga una sub-base hidráulica, combínese con la base hidráulica en una sola capa (*Mapping Layers*). Ver Figura 37.
- Los tratamientos superficiales así como las capas de rodadura tipo SMA, Open Graded o CASAA no se consideran en el análisis dado que no tienen aporte de tipo estructural.
- Para secciones de pavimento con tres capas (estructura simulada o no) el valor de E_3 suele ser muy preciso, E_1 es razonablemente correcto y E_2 puede ser cuestionable dependiendo de los espesores considerados en cada capa.
- Los módulos retrocalculados de la capa subrasante son mayores que los valores determinados en laboratorio entre 2 a 3 veces mayores (módulos resilientes).

- En algunos casos los módulos retrocalculados de la base hidráulica o sub-base granular resultan ser menores que los módulos de las subrasantes.
- La deformación vertical arriba de la capa subrasante obtenida con retrocálculo es dos veces mayor al valor teórico de la estructura (teoría elástica multicapa).
- Para las capas granulares y suelos, los módulos retrocalculados disminuyen conforme aumenta la humedad. No obstante estos módulos aumentan en condiciones secas.
- Las soluciones raramente son únicas.
- Cuanto mayor es el número de capas, más combinaciones de módulos pueden coincidir con las deflexiones medidas.
- Bajo RMS no significa que se tienen valores precisos en los módulos retrocalculados.
- Alto RMS no significa que se tienen valores inexactos en los módulos retrocalculados.
- RMS no es un indicador de precisión en el retrocálculo.
- Se recomienda usar juicio y criterio ingenieril.

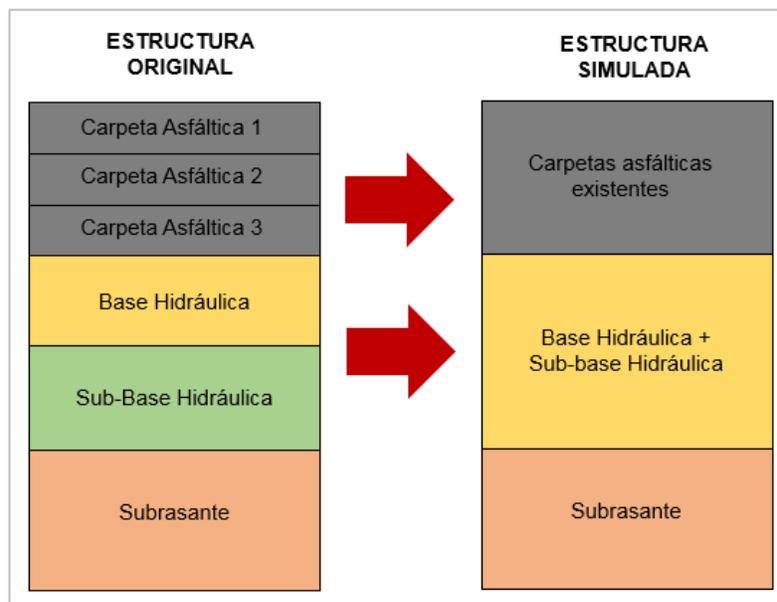


Figura 37.- Unión de capas asfálticas y granulares (Mapping Layers).

La Federal Aviation Administration (FAA) recomienda ciertos valores de módulos retrocalculados (o módulos del lugar como también le denominan) para varios materiales de pavimentación. Esta recomendación del FAA la hace en función de haber medido y retrocalculado cientos de secciones de pavimento flexibles, semirrígidos y rígidos en su laboratorio experimental “William J. Hughes Technical Center” y en su tren de pistas de aterrizaje para aviones por varios años en Atlantic City, NJ. Estos valores pueden verificarse en el programa de retrocálculo BAKFAA del mismo instituto americano. Ver Tabla 7.

Tabla 7.- Módulos elásticos retrocalculados recomendados por la FAA (BAKFAA, 2011).

Material	Valor mínimo		Valor típico		Valor máximo	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
Carpeta Asfáltica (asfalto convencional AC 20)	500	5099	3,500	35,690	14,000	142760
Concreto Hidráulico	7,000	71380	35,000	356,901	60,000	611830
Base estabilizada con cemento (alto porcentaje de cemento)	7,000	71380	14,000	142,760	20,000	203943
Base estabilizada con asfalto (base negra)	700	7138	3,500	35,690	10,000	101972
Base tratada con cemento (bajo porcentaje de cemento)	1,400	14276	5,000	50,986	14,000	142760
Base Hidráulica	70	714	200	2,039	350	3569
Sub-base Hidráulica	30	306	100	1,020	200	2039
Subrasante	70	714	350	3,569	1,400	14276
Terreno natural o terracerías	20	204	50	510	170	1734

De manera paralela el FHWA recomienda valores máximos y mínimos para distintos materiales y condiciones particulares de las carpetas asfálticas. Ver Tabla 8.

Existen diversos programas con los cuales se puede realizar el proceso de retrocálculo o cálculo inverso, como el ELMOD6 (Evaluation of Layer Moduli and Overall Design) creado por la empresa Dynatest y que sigue el análisis anteriormente mencionado. Algunos otros programas con el mismo esquema de análisis son el MODULUS (Instituto de Transporte de Texas), DIPLOMAT (Universidad de Minnesota), EVERCALC-EVERSERIES (Departamento de

Transporte de Washington), BAKFAA (Administración de la Aviación Federal FAA), entre otros. Ver Figura 38.

Tabla 8.- Módulos elásticos retrocalculados recomendados por FHWA (FHWA, 2006).

Material	Valor mínimo		Valor máximo	
	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
Carpeta asfáltica/base tratada con asfalto	700	7138	25,000	254929
Grava sin triturar	50	510	750	7648
Grava triturada	75	765	1,000	10197
Piedra triturada	100	1020	1,500	15296
Arena	40	408	500	5099
Mezclas de suelo (predomina suelo fino)	50	510	700	7138
Mezclas de suelo (predomina suelo grueso)	60	612	800	8158
Base Hidráulica	35	357	450	4589
Mezcla asfáltica en caliente	700	7138	25,000	254929
Mezcla asfáltica rica en asfalto (arena-asfalto)	700	7138	25,000	254929
Base estabilizada con cemento	2,000	20394	20,000	203943
Base estabilizada con cemento (alto porcentaje de cemento)	4,500	45887	45,000	458872
Suelo-Cemento	1,000	10197	7,000	71380
Caliza	150	1530	1,500	15296
Carpeta asfáltica en buen estado (sin agrietamientos)	10,000	101972	70,000	713801

Un problema reconocido en esta técnica y por ende de estos programas es que no hay soluciones únicas de módulos para una estructura, ya que puede haber muchas y definir cuál es la correcta es difícil



Figura 38. Diferentes programas para el análisis de retrocálculo.

1.9. VIDA REMANENTE.

La vida remanente es el periodo de años que le queda a la estructura de pavimento para satisfacer el nivel del tránsito vehicular al que fue diseñado inicialmente después de haber sido expuesto a cierto nivel de tránsito y a las condiciones meteorológicas como la temperatura y la humedad.

Dicha vida remanente debe cumplir con ciertos indicadores de deterioro: la fatiga en las capas estabilizadas por asfalto y la deformación permanente en las capas no ligadas o granulares. Estos indicadores se obtienen cuantitativamente a través de modelos de deterioro por fatiga y por deformación permanente mismos que forman parte de las metodologías de diseño de pavimentos empírico-mecanicistas. El programa ELMOD utiliza distintos y muy variados modelos de deterioro de agencias y laboratorios de transporte alrededor del mundo. Los más recomendados y por lo tanto los empleados en este informe, son los modelos de deterioro del Instituto del Asfalto (Asphalt Institute).

Con los módulos retrocalculados, se obtienen respuestas críticas en el pavimento como lo es la deformación a tensión debajo de las capas estabilizadas, la cual está asociada a la fatiga o “agrietamiento piel de cocodrilo” y la deformación a compresión arriba de la capa subrasante asociada al fenómeno de deformación permanente o rodera plástica en la superficie del pavimento. Una vez obtenidas estas respuestas se introducen a los modelos de deterioro anteriormente señalados con lo cual se obtienen las repeticiones máximas a la falla que son capaces de resistir estos materiales (capas asfálticas y materiales granulares). Estas repeticiones se comparan mediante daño acumulado (ley de Miner) con las repeticiones de tránsito esperadas. El recíproco de este valor obtenido nos da la vida remanente de la estructura del pavimento. Ver (21).

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{N_i} \right) = 1 \quad (21)$$

Donde:

n_i = Número de aplicaciones de carga para el eje considerado en el periodo de vida útil esperada

N_i = Número de aplicaciones de carga para que resisten los materiales a la falla (obtenidas de los modelos de deterioro) .

n = Número total de tipos de ejes considerados.

En el Anexo 2 se puede ver un ejemplo de vida remanente y espesores requeridos mediante el programa ELMOD6.

1.10. TRAMOS HOMOGÉNEOS.

1.10.1. Cálculo para delimitar tramos o segmentos homogéneos.

Cuando se desea llevar a cabo un programa de conservación y reconstrucción de pavimentos en corredores carreteros, es necesario tener plenamente identificados los tramos o segmentos donde se van a llevar a cabo dichas acciones. Dado que existen marcados cambios en un cuanto a geometría, tránsito y características en materiales a lo largo de un tramos carretero, es necesario llevar a cabo una homogenización de los mismos. Un tramo homogéneo es un segmento de carretera que tiene características semejantes en cuanto a tipo de pavimento, deterioros, deflexiones, topografía, tránsito, etc.

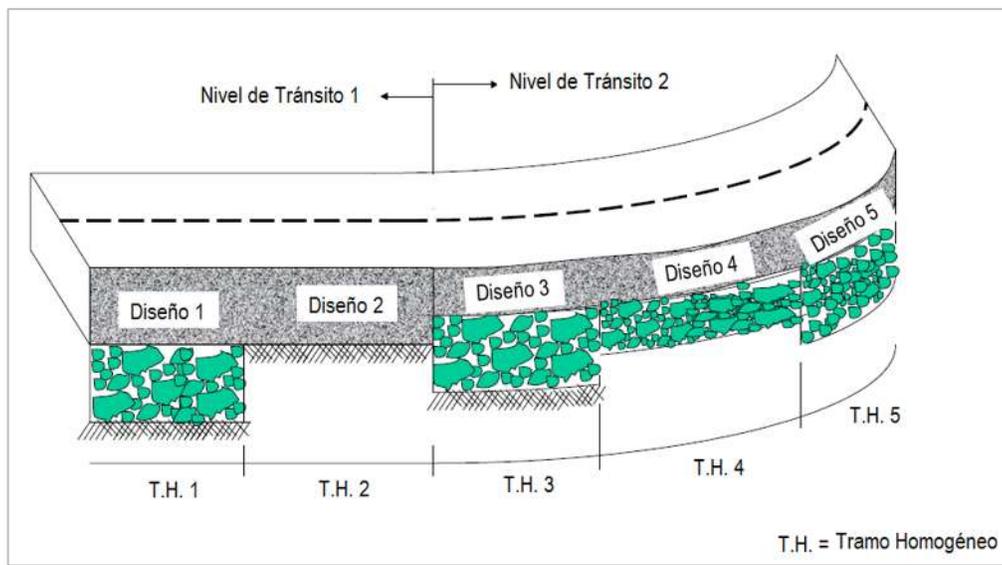


Figura 39.- Delimitación de Tramos Homogéneos. Modificado FHWA (2002).

La metodología empleada para proyectos carreteros para delimitar los tramos homogéneos es la propuesta por la guía de diseño de pavimentos AASHTO 93 en su apéndice J donde describe el “Método de Diferencia Acumuladas”. Este método es una herramienta que permite delimitar estadísticamente tramos homogéneos utilizando mediciones de respuesta del pavimento como son las deflexiones, la

serviciabilidad, la fricción, el tránsito, el IRI, el número estructural SN, entre los más empleados.

De manera general a lo largo de un tramo carretero o de estudio se presentan distintos valores de “*respuestas del pavimento*” como pueden ser el IRI, la rodera, el número estructural SN, etc. Estas respuestas pueden representarse con el esquema a) de la Figura 40 donde la respuesta del pavimento está definida por los subíndices r_1 , r_2 , r_3 , etc. Con dichas respuestas y con las longitudes ubicadas entre “estación y estación” se puede obtener las áreas acumulativas totales tal y como se representa esquemáticamente en la Figura 41. En la Figura 42 Z_x es la diferencia en áreas acumuladas para cualquier valor de x . En dicha figura se observa que cada límite de tramo o unidad coincide con el lugar de cambio de pendiente de Z_x (de positiva a negativa o viceversa). Este concepto fundamental es la base utilizada para determinar analíticamente la ubicación de los límites de los tramos o zonas homogéneas. En otras palabras en cada cambio de pendiente termina y/o inicia un tramo homogéneo. Se sugiere consultar el anexo J de la Guía AASHTO 93 para mayor detalle.

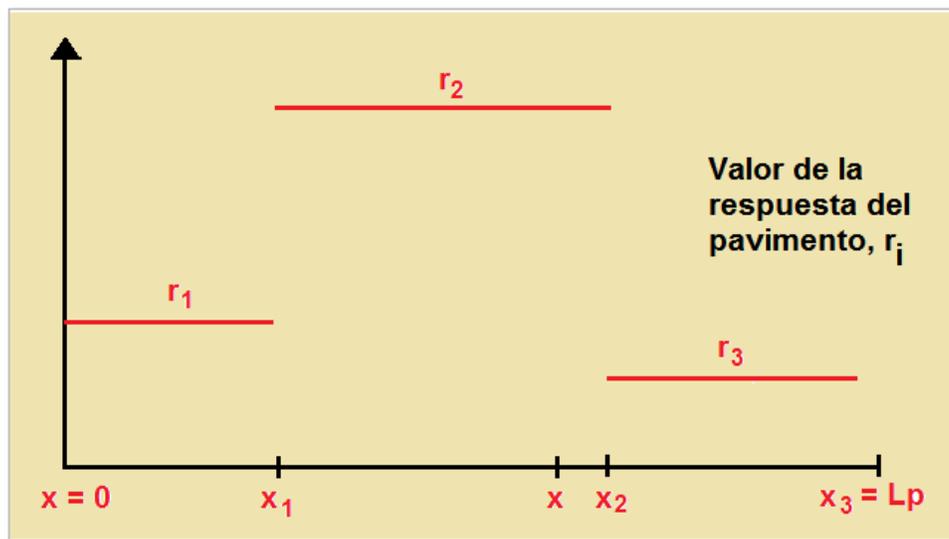


Figura 40.- a) Respuesta del pavimento (IRI, deflexión, etc.) respecto a la longitud total del tramo. (AASHTO 93, Coria, 2013).

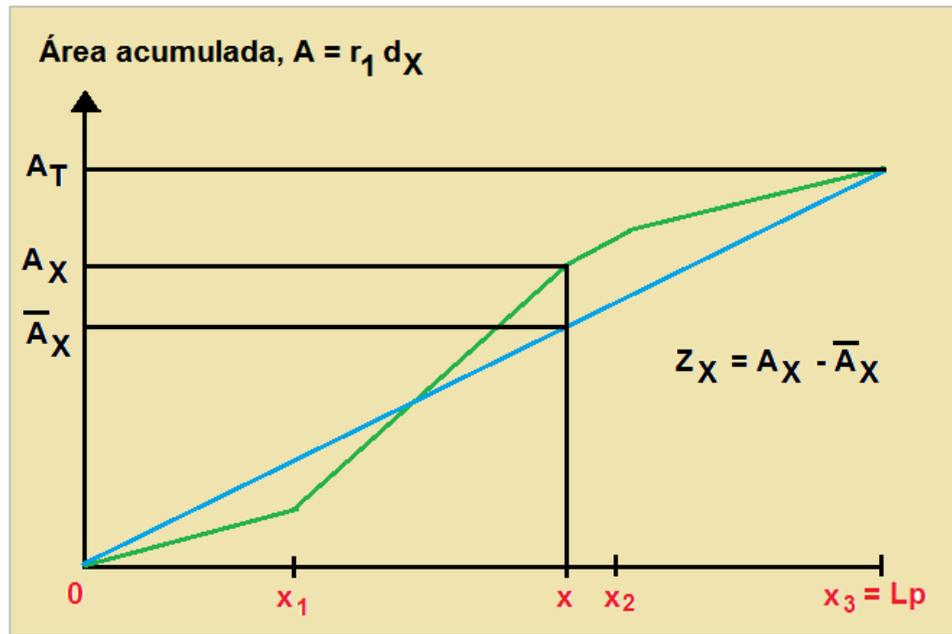


Figura 41.- b) Área acumulada respecto a la longitud total del tramo. (AASHTO 93, Coria, 2013).

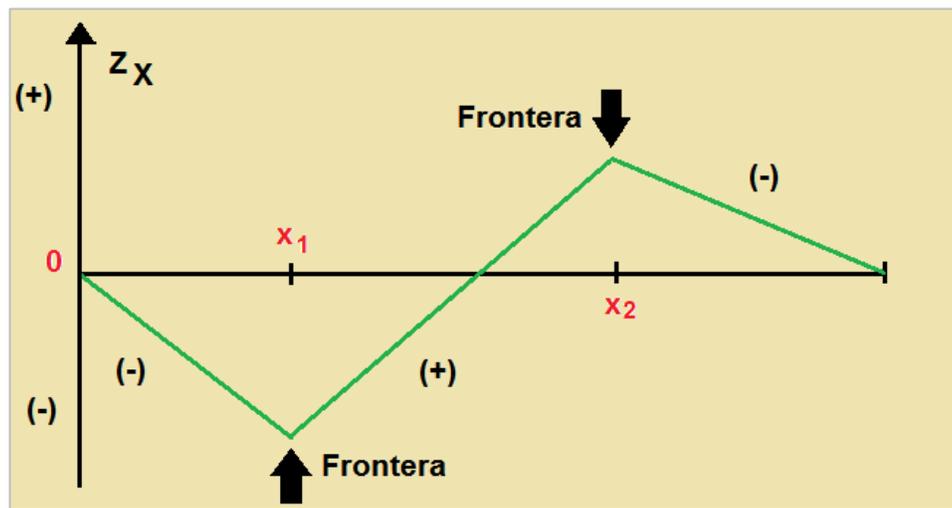


Figura 42.- c) Valor de Z_x respecto a la longitud total del tramo. Donde hay cambio de pendiente inicia o termina un tramo homogéneo (AASHTO 93, Coria, 2013).

Es importante considerar que las soluciones que se planteen para cada tramo delimitado, no deben ser divergentes entre cada uno de ellos y tampoco es conveniente que se apliquen a longitudes de carretera muy pequeñas. Se recomienda que se utilice un criterio para definir una longitud mínima en la

delimitación de tramos homogéneos, del orden de 5 km, longitud que se estima de tamaño adecuado para definir soluciones específicas de conservación (DGST, 2015).

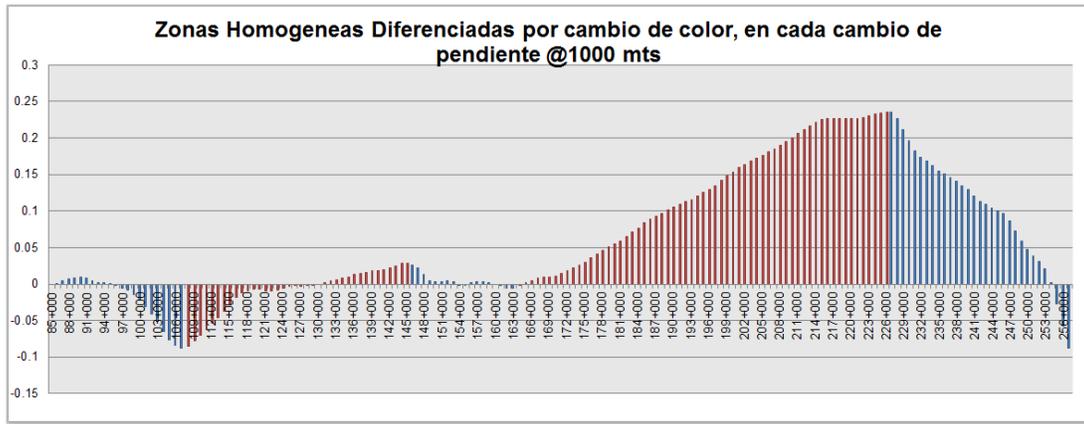


Figura 43. Ejemplo de tramos homogéneos en cada cambio de pendiente.

1.11. RECOMENDACIONES.

Según la Dirección General de Conservación de Carreteras de la SCT (Poon, 2016) existen ciertos rangos o umbrales de deflexión máxima que deben de cumplir carreteras con distintas características geométricas y de operación.

Tabla 9. Valores para determinar el estado de tramos carreteros mediante deflexiones.

Estado	Autopistas y corredores carreteros	Red básica y secundaria
Bueno	De 0.0 a 0.4 mm (0 a 400 micras)	De 0.0 a 0.5 mm (0 a 500 micras)
Aceptable	-----	De 0.51 a 0.8 mm (510 a 800 micras)
No Aceptable	Mayor a 0.4 mm (> 400 micras)	Mayor a 0.8 mm (> 800 micras)

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO.

Una vez obtenida la información para cada uno de los proyectos que a continuación se presentan, se llevó a cabo la normalización por carga y la corrección por temperatura de las deflexiones dadas en campo evaluadas por el deflectómetro de impacto (HWD), ya que estos valores se analizarán mediante las siguientes metodologías:

- Método propuesto por el Ing. Manuel Zarate Aquino.
- Método propuesto por el Dr. Raúl Vicente Orozco.
- Delimitación de tramos homogéneos.

Para obtener una respuesta tanto de la estructura del pavimento y el apoyo de ésta (sub-rasante), como también obtener un índice estructural para saber qué tipo de rehabilitación se propondrá en dicho pavimento y por último delimitar en que tramos se hará dicha rehabilitación.

Desde un principio cuando se obtienen las deflexiones y se hacen sus respectivas correcciones, se puede dar cuenta mediante los valores de las deflexiones en qué estado se encuentra el tramo carretero, ya que mediante las recomendaciones de la SCT (*Capítulo 1.11*) nos indica que para autopistas y corredores carreteros las deflexiones deben ser menores a 400 micras para que se encuentre en buen estado (ver *Tabla 9*).

Con la ayuda de la metodología del Ing. Manuel Zárate Aquino se puede observar en las primeras gráficas que los proyectos 1, 3, 4, 5, 6, 7 y 10 se encuentran en mal estado o fuera del rango establecido por la SCT. Para los proyectos 2, 8 y 9, las deflexiones rondan por debajo de las 400 micras, pero en algunos puntos se puede observar que sobrepasan el valor establecido. En la segunda gráfica se determina la respuesta de la estructura del pavimento y el apoyo de ésta (subrasante) y se obtiene una idea general de todo el tramo en análisis para saber si se comporta de buena manera. Así mismo, se puede observar que para los proyectos en donde se excedía el rango de las deflexiones (proyectos 1, 3, 4, 5, 6, 7

y 10) la estructura y subrasante del pavimento se encuentran en el cuadrante en donde están en mal estado o son débiles. Para los proyectos 2, 8 y 9, se observa que se encuentran en los primeros dos cuadrantes. Por ejemplo, en el proyecto 8, su tendencia es el segundo cuadrante, o sea que su estructura es débil y subrasante resistente, en los proyectos 8 y 9 su estructura y subrasante son resistentes.

Una vez que se obtienen los resultados con la metodología del Ing. Manuel Zárate Aquino se determina el índice estructural mediante la metodología del Dr. Raúl Vicente Orozco para determinar la calificación estructural que tendrá el tramo carretero que se está analizando y mediante los tramos homogéneos saber qué tipo de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción se llevará a cabo en los tramos correspondientes. La mayoría de los proyectos se encuentran en mal estado y requieren de un reforzamiento con carpeta o en escasos tramos requieren un tratamiento superficial como en los proyectos 8, 9 y 10.

La metodología para delimitar tramos homogéneos se llevó a cabo mediante la respuesta del pavimento en deflexiones. Esta metodología supone que para cada cambio de pendiente existe un tramo homogéneo, pero si nos basamos en este criterio, los tramos que se encuentren serán demasiados, por lo tanto, para delimitarlos se tomó en cuenta una longitud mínima y una pendiente con un cambio notable. También, basándose en las respuestas de las anteriores metodologías los tramos se pueden ir reduciendo. Por ejemplo, en el proyecto 3, se delimitaron seis tramos homogéneos (ver Tabla 12) pero cuando se determina el tipo de mantenimiento que se requiere mediante la metodología del Dr. Raúl Vicente Orozco, la rehabilitación que necesita para todos los tramos es un reforzamiento con carpeta, por lo tanto se puede reducir a un sólo tramo. También se pueden deducir los tramos homogéneos, poniendo en un segundo plano las deflexiones, tal como se puede notar en las gráficas de dicha metodología para todos los proyectos en los que las deflexiones se pueden comportar de igual manera a lo largo del tramo carretero o varían en el mismo rango en el que se encuentran, así mismo, se pueden reducir los tramos homogéneos que se tienen.

2.1. PROYECTO 1 (94.58 km).

2.1.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

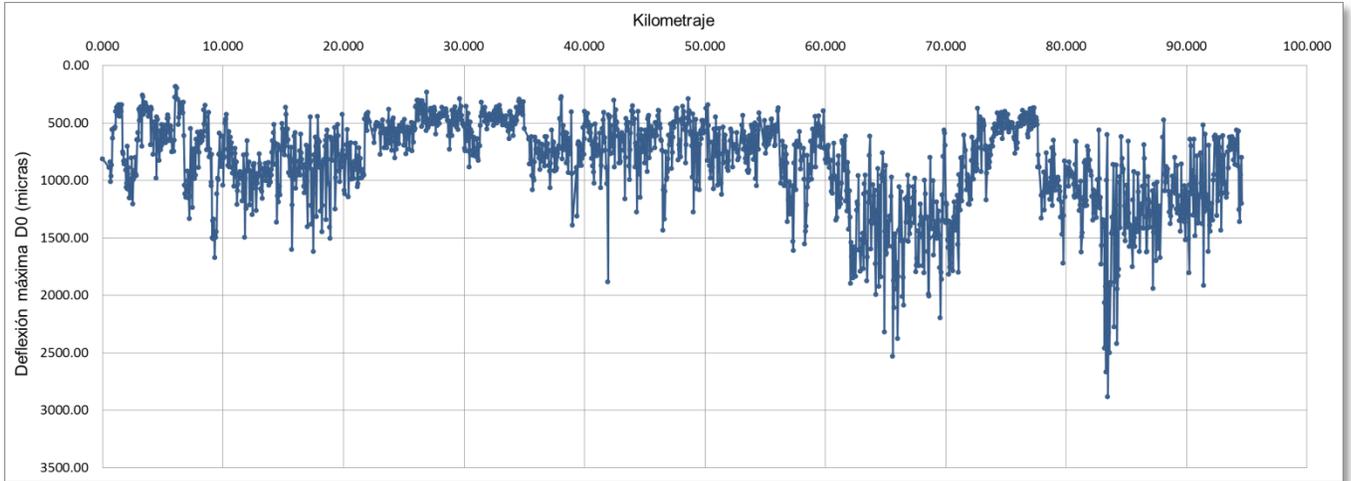


Figura 44.- Gráfico de Deflexión máxima para el proyecto 1.

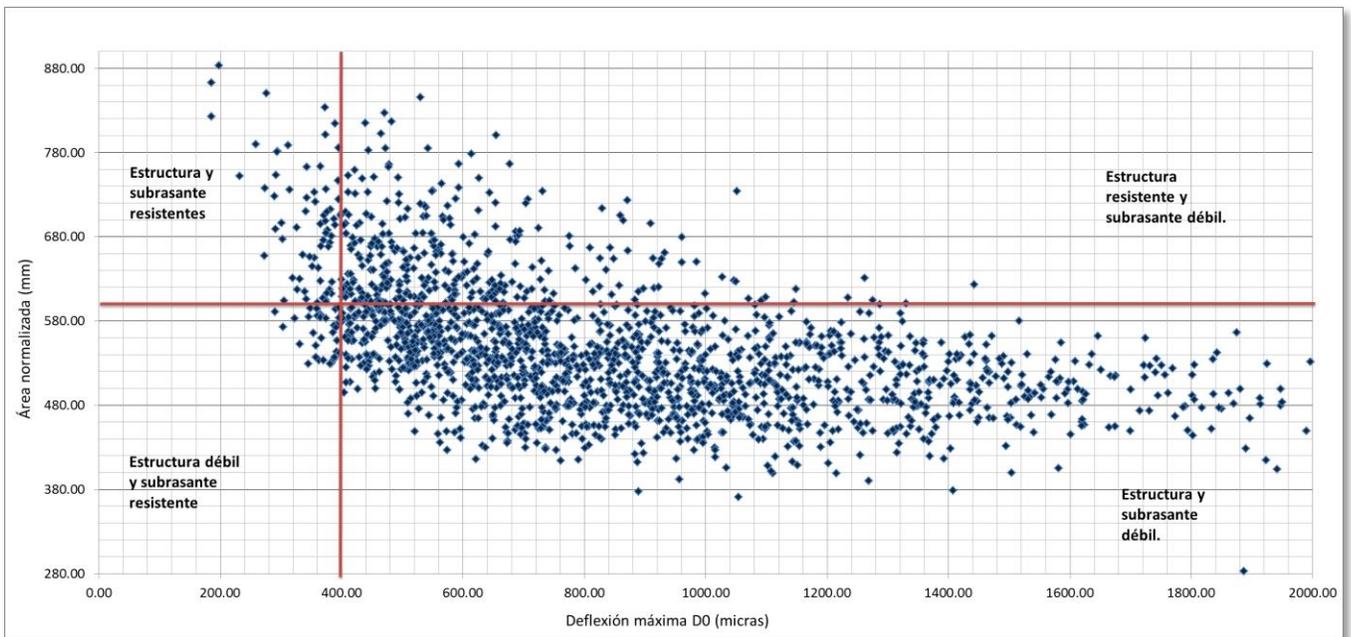


Figura 45.- Gráfico Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 1.

2.1.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

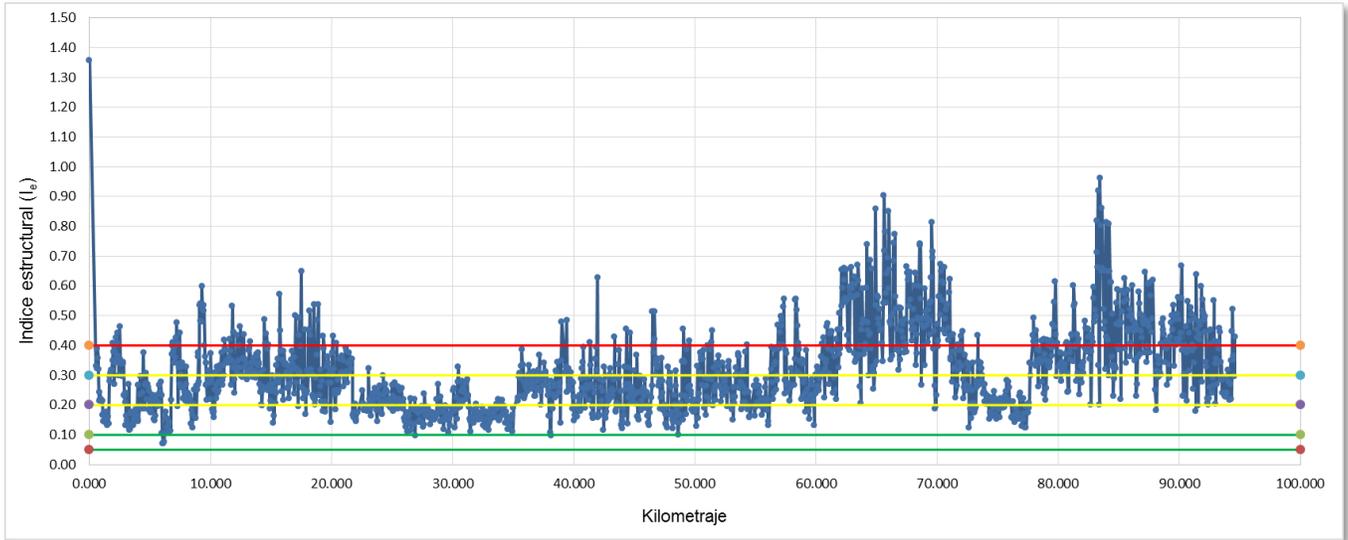


Figura 46.- Índice estructural para el proyecto 1.

2.1.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

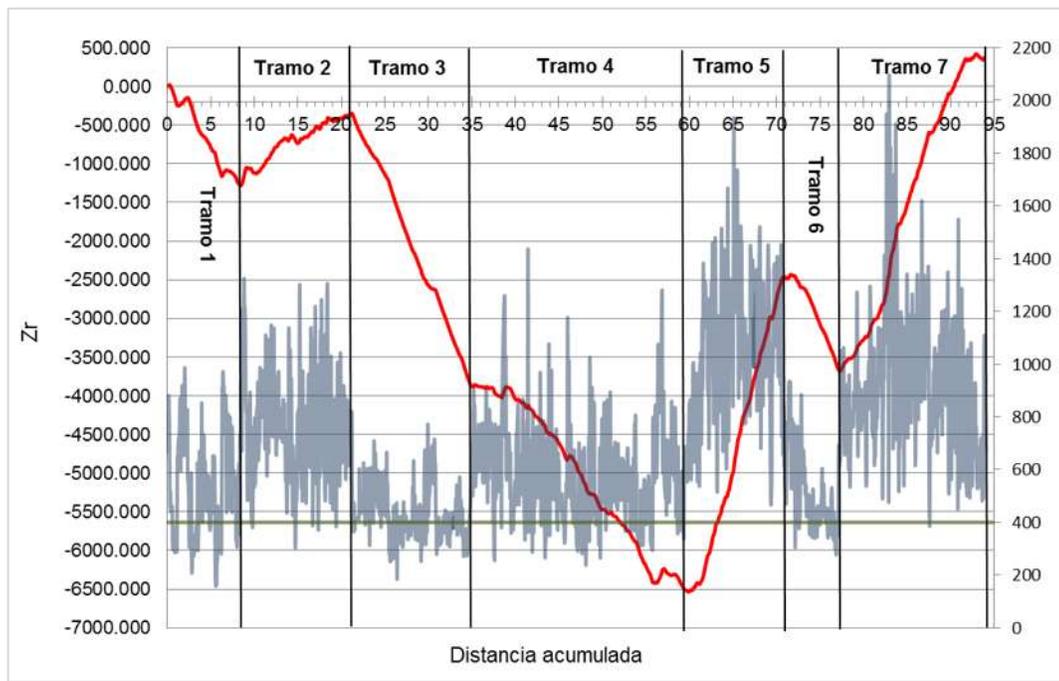


Figura 47.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 1.

Tabla 10.- Resultados de las metodologías empíricas para el proyecto 1.

Proyecto 1			
Tramos Homogéneos		Ing. Manuel Zárate Aquino	Dr. Raúl Vicente Orozco
km inicial	km final		
0+000	8+650	Estructura y subrasante débil	Reforzamiento con carpeta
8+650	21+500		Recuperación in situ
21+500	35+500		Reforzamiento con carpeta
35+500	59+600		Reforzamiento con carpeta
59+600	71+500		Recuperación in situ
71+500	77+600		Reforzamiento con carpeta
77+600	94+583		Recuperación in situ

2.2. PROYECTO 2 (9.66 km).

2.2.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

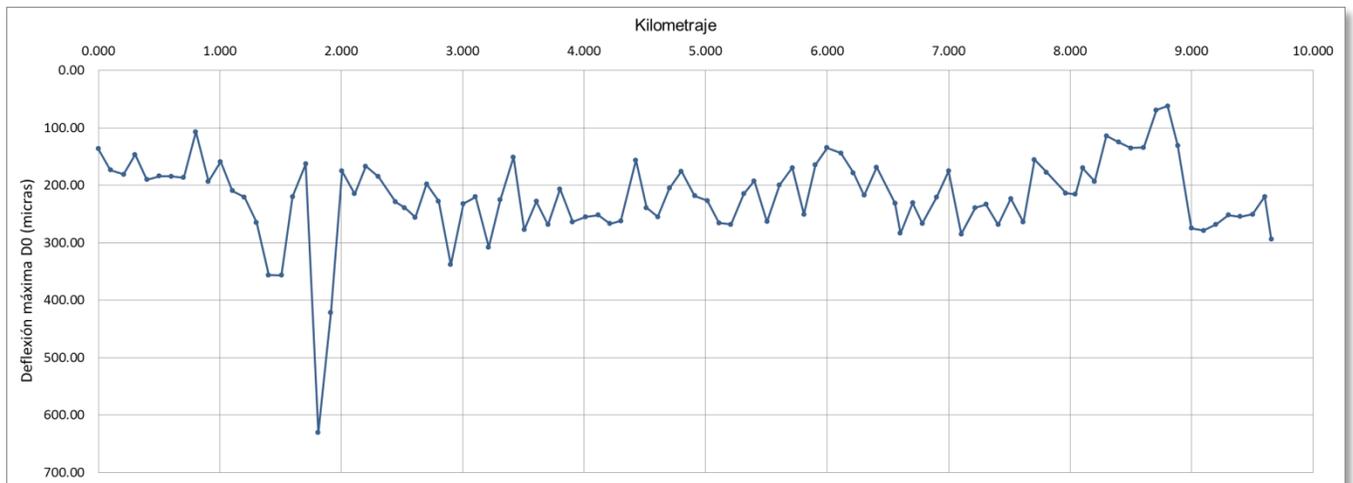


Figura 48.- Gráfico de Deflexión máxima para el proyecto 2.

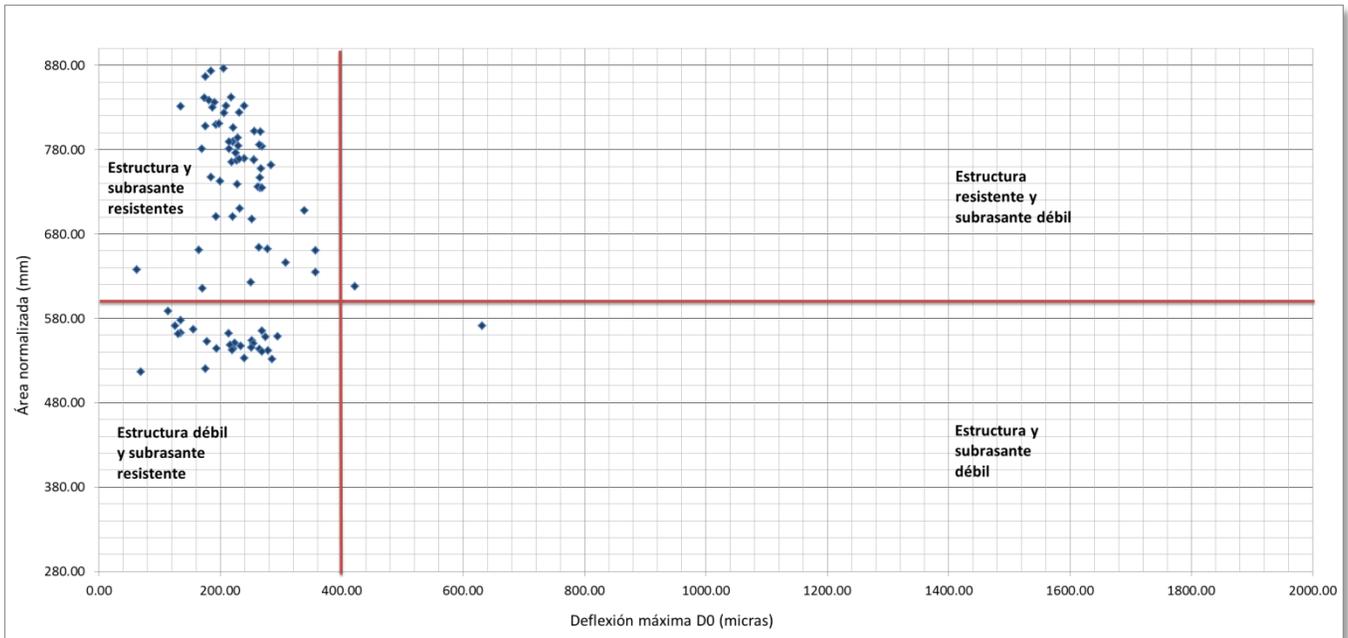


Figura 49.- Gráfico Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 2.

2.2.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

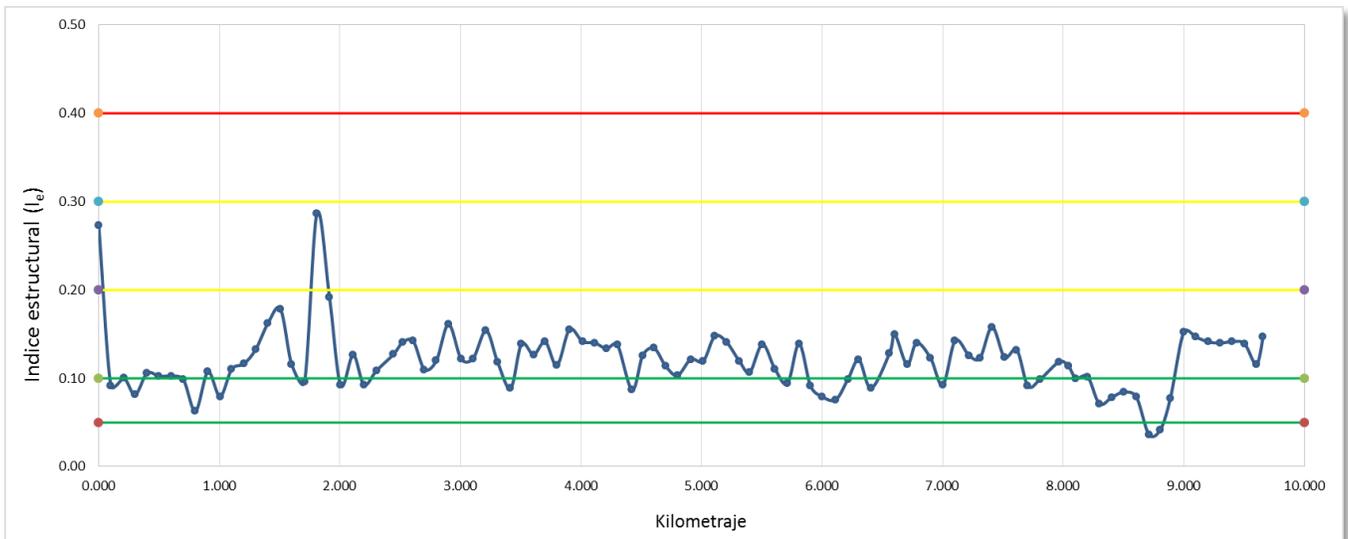


Figura 50.- Índice estructural para el proyecto 2.

2.2.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

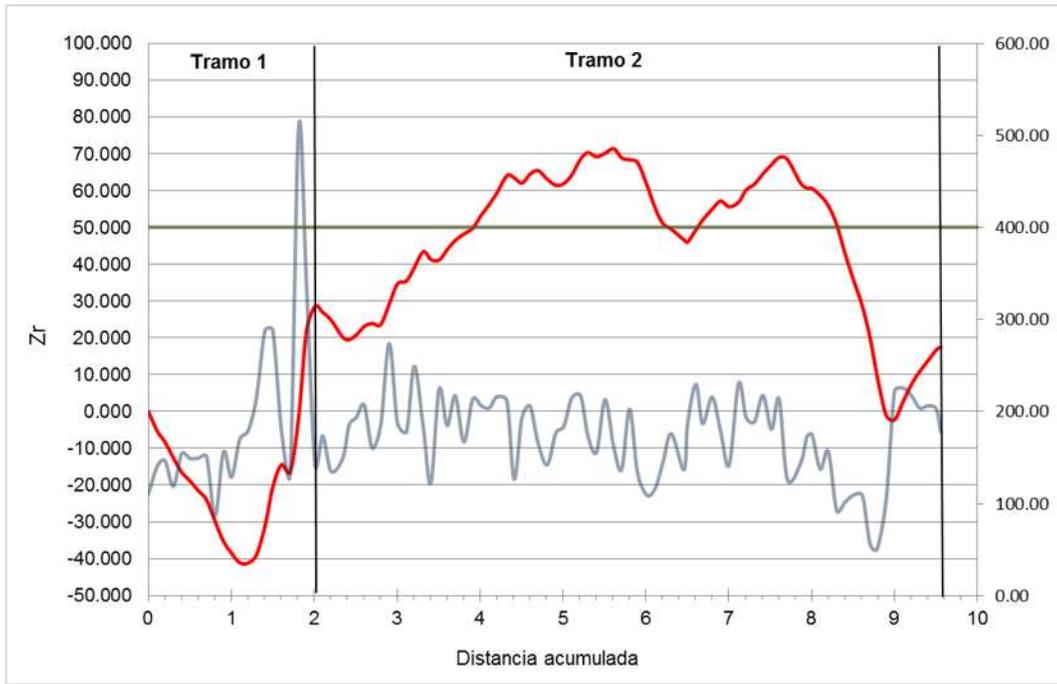


Figura 51.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 2.

Tabla 11.- Resultados de las metodologías para el proyecto 2.

Proyecto 2			
Tramos Homogéneos		Ing. Manuel Zárate Aquino	Dr. Raúl Vicente Orozco
km inicial	km final		
0+100	2+200	Estructura y subrasante resistentes	Reforzamiento con carpeta
2+200	9+658		Reforzamiento con carpeta

2.3. PROYECTO 3 (21.07 km).

2.3.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

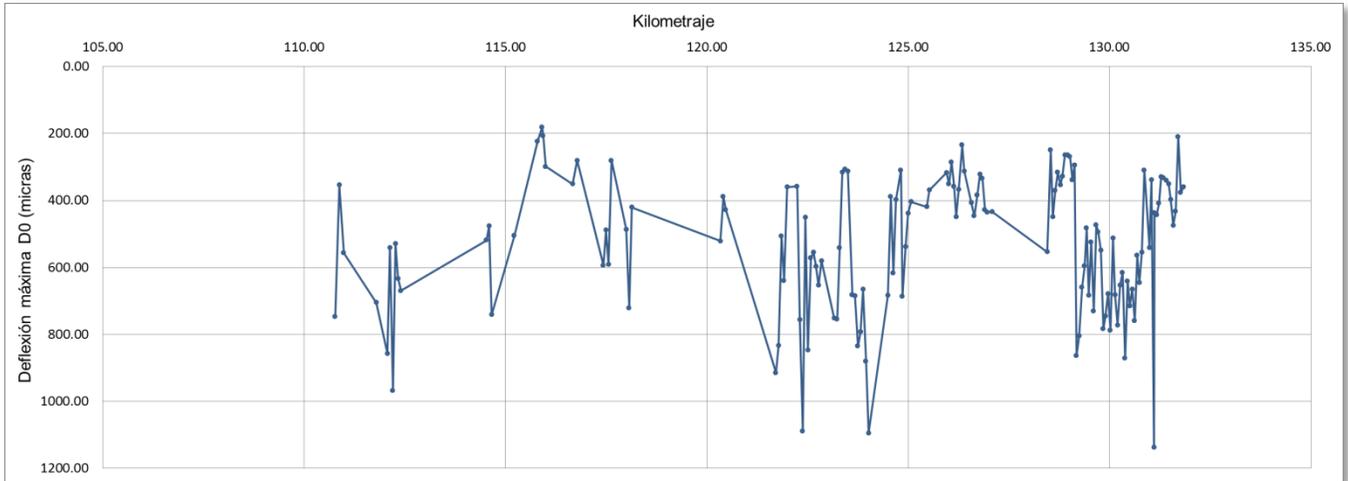


Figura 52.- Gráfico Deflexión máxima para el proyecto 3.

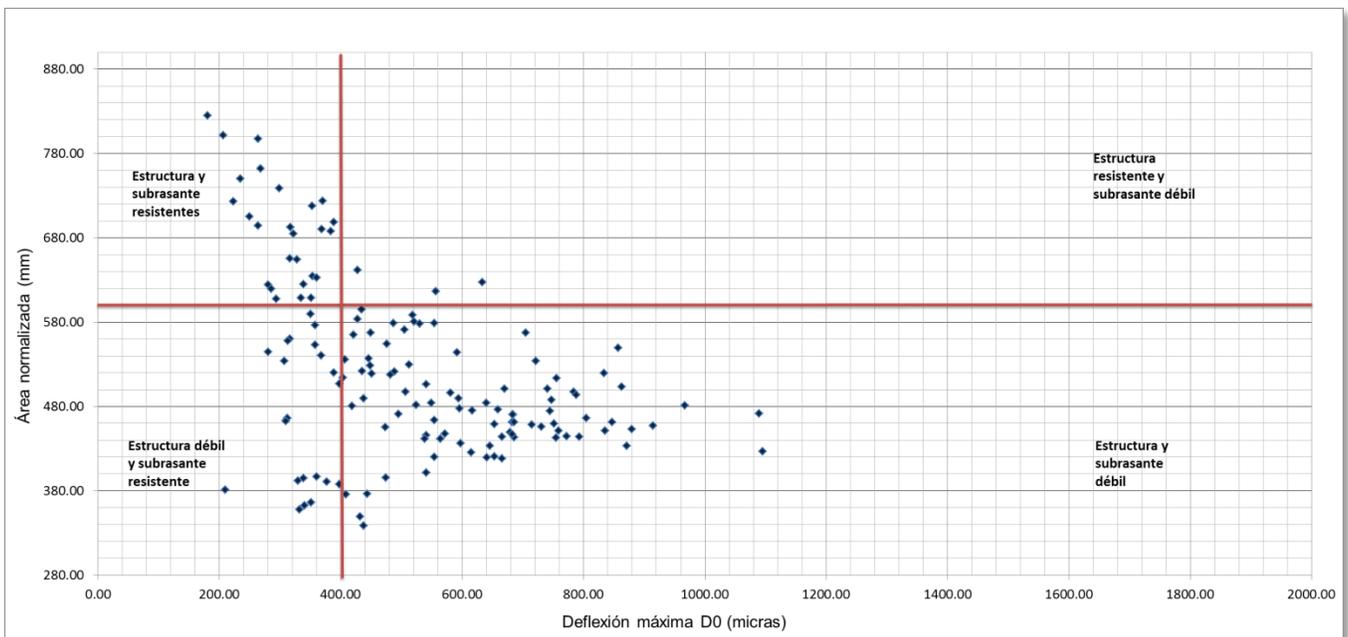


Figura 53.- Gráfico de Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 3.

2.3.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

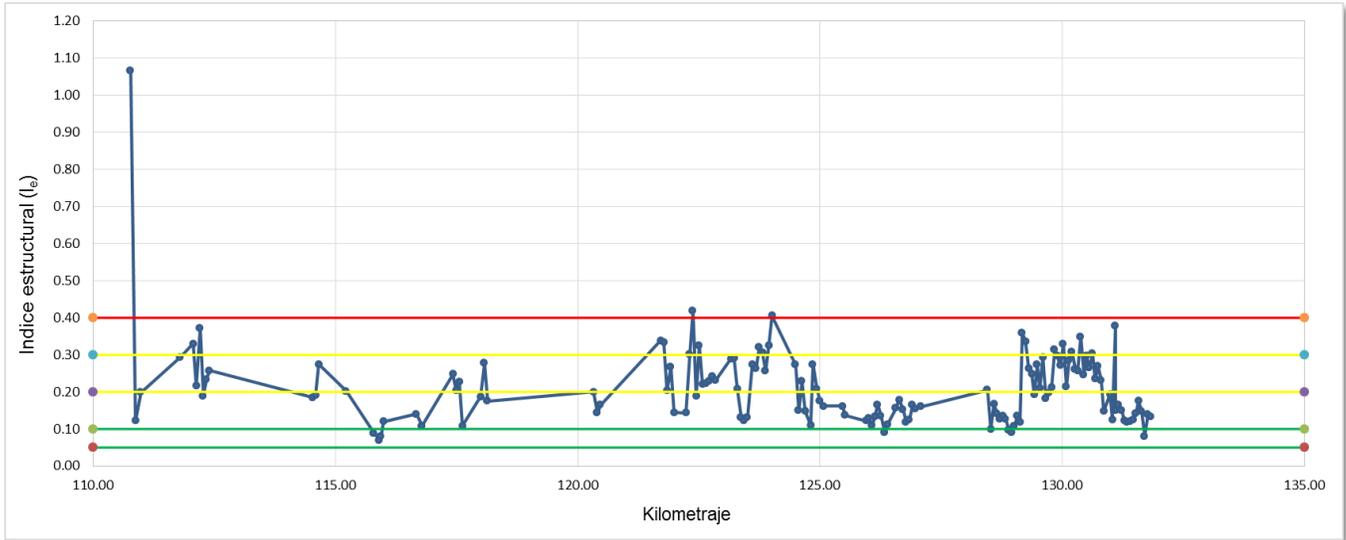


Figura 54.- Índice estructural para el proyecto 3.

2.3.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

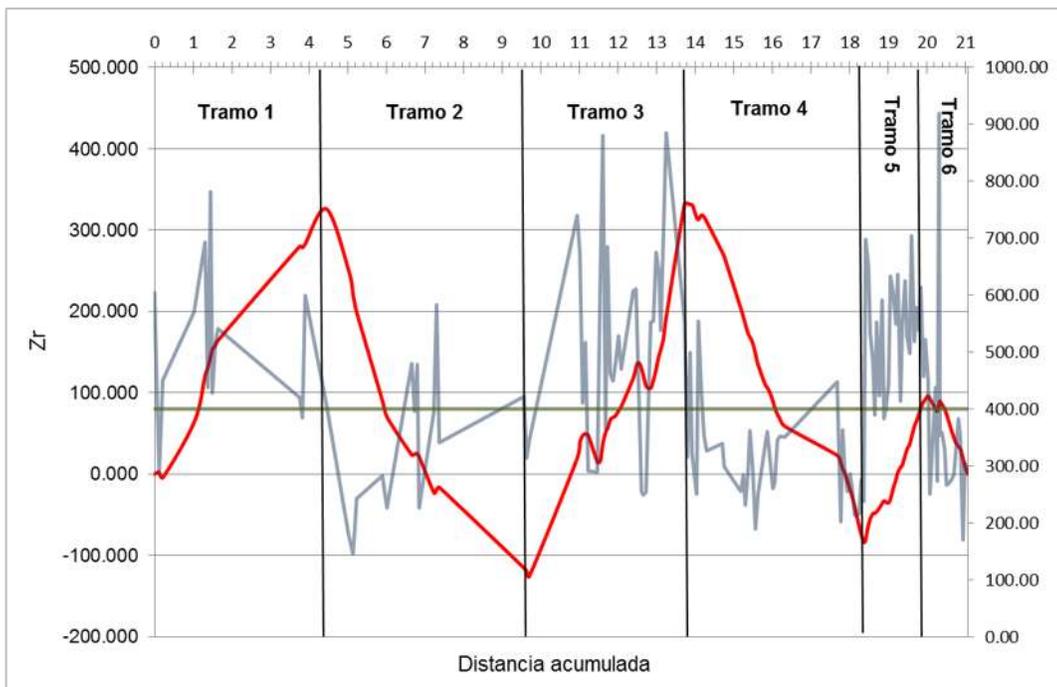


Figura 55.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 3.

Tabla 12.- Resultados de metodologías para el proyecto 3.

Proyecto 3			
Tramos Homogéneos		Ing. Manuel Zárate Aquino	Dr. Raúl Vicente Orozco
km inicial	km final		
110+770	115+220	Estructura y subrasante débil	Reforzamiento con carpeta
115+220	120+330		Reforzamiento con carpeta
120+330	124+490		Reforzamiento con carpeta
124+490	129+010		Reforzamiento con carpeta
129+010	130+620		Reforzamiento con carpeta
130+620	131+830		Reforzamiento con carpeta

2.4. PROYECTO 4 (32.40 km).

2.4.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

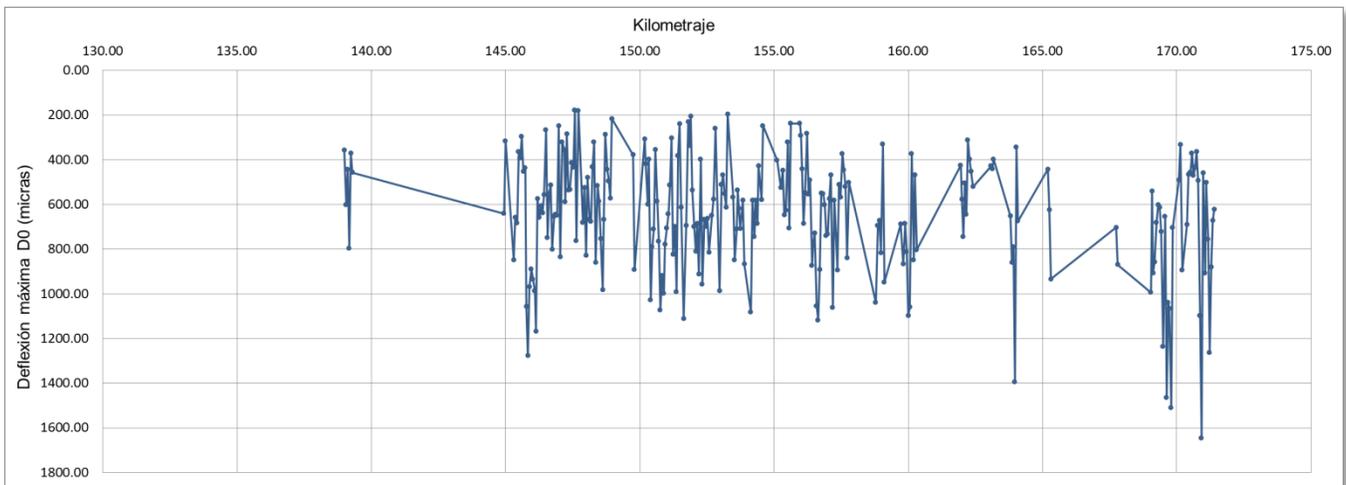


Figura 56.- Gráfico Deflexión máxima para el proyecto 4.

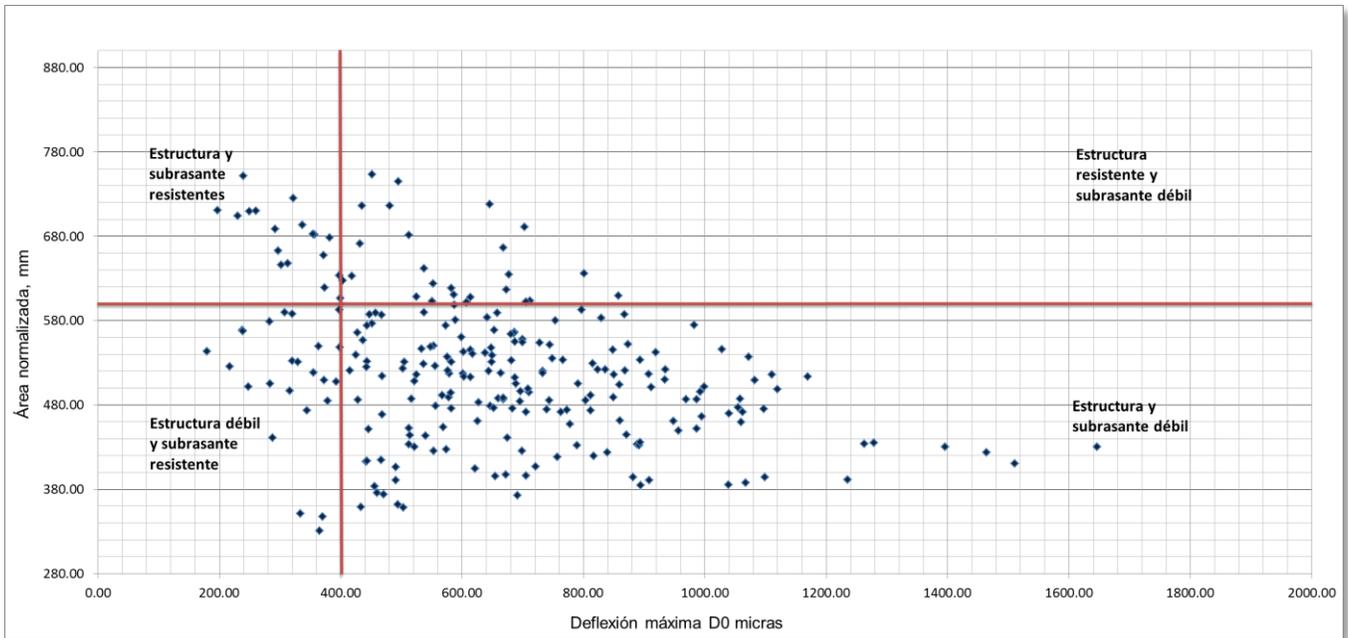


Figura 57.- Gráfico Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 4.

2.4.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

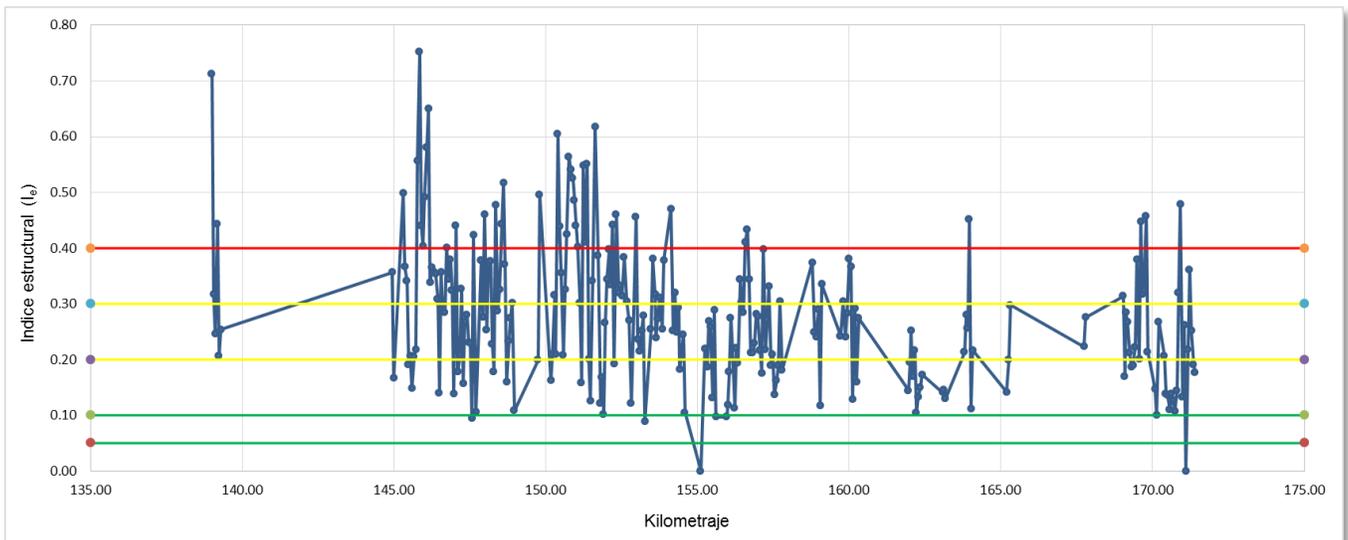


Figura 58.- Índice estructural para el proyecto 4.

2.4.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

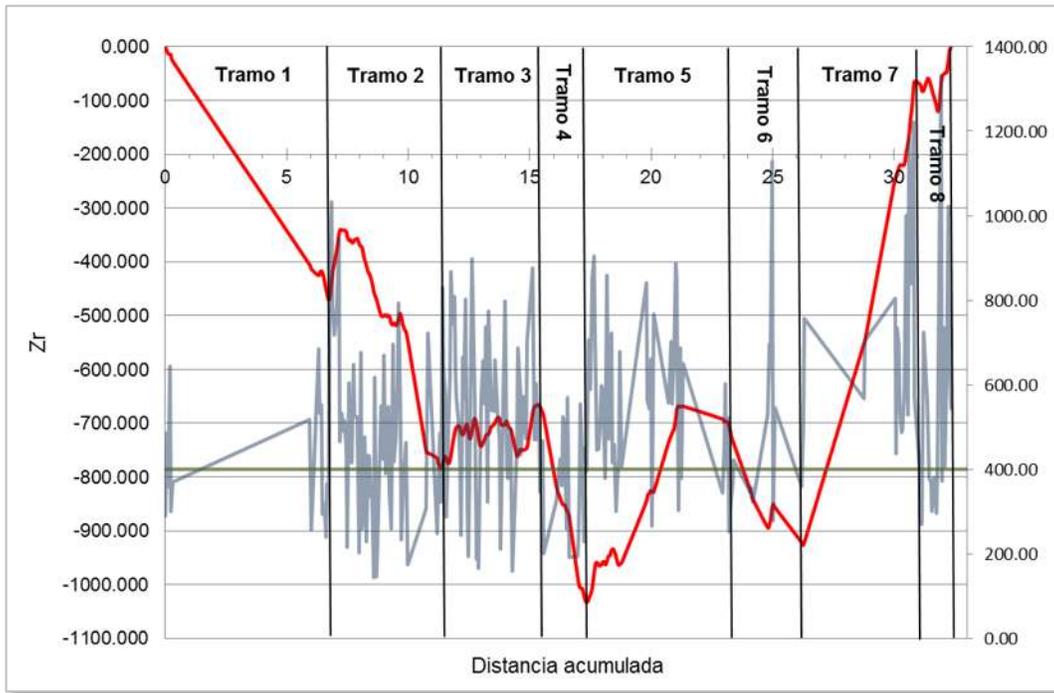


Figura 59.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 4.

Tabla 13.- Resultados de las metodologías para el proyecto 4.

Proyecto 4			
Tramos Homogéneos		Ing. Manuel Zárate Aquino	Dr. Raúl Vicente Orozco
km inicial	km final		
139+000	145+960	Estructura y subrasante débil	Reforzamiento con carpeta
145+960	150+220		Recuperación in situ
150+220	154+270		Recuperación in situ
154+270	156+100		Reforzamiento con carpeta
156+100	162+000		Reforzamiento con carpeta
162+000	165+313		Reforzamiento con carpeta
165+313	170+142		Reforzamiento con carpeta
170+142	171+345		Reforzamiento con carpeta

2.5. PROYECTO 5 (18.00 km).

2.5.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

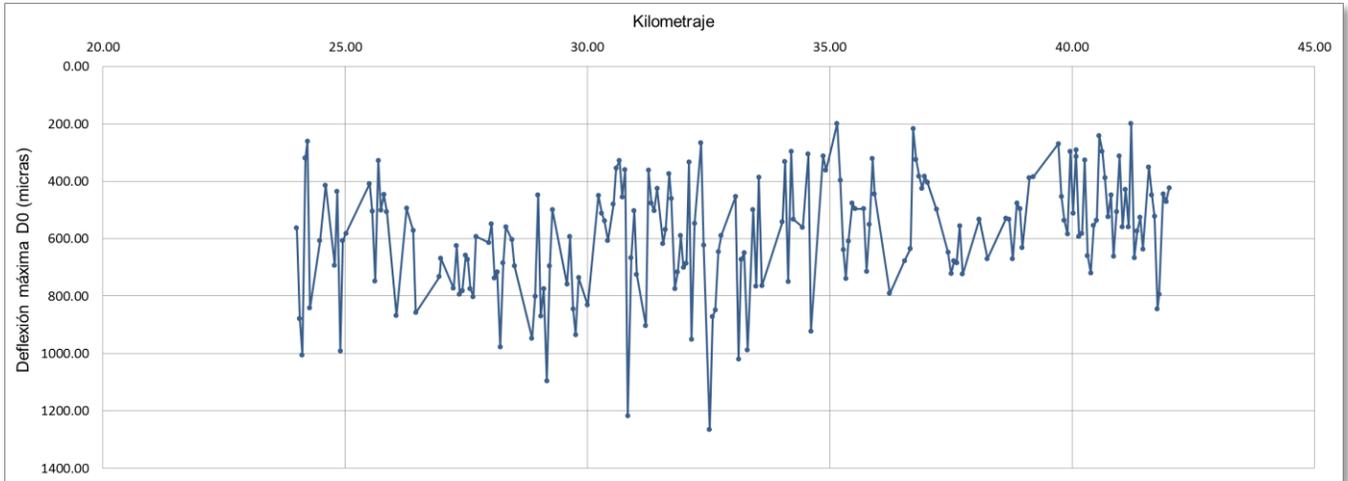


Figura 60.-Gráfico Deflexión máxima para el proyecto 5.

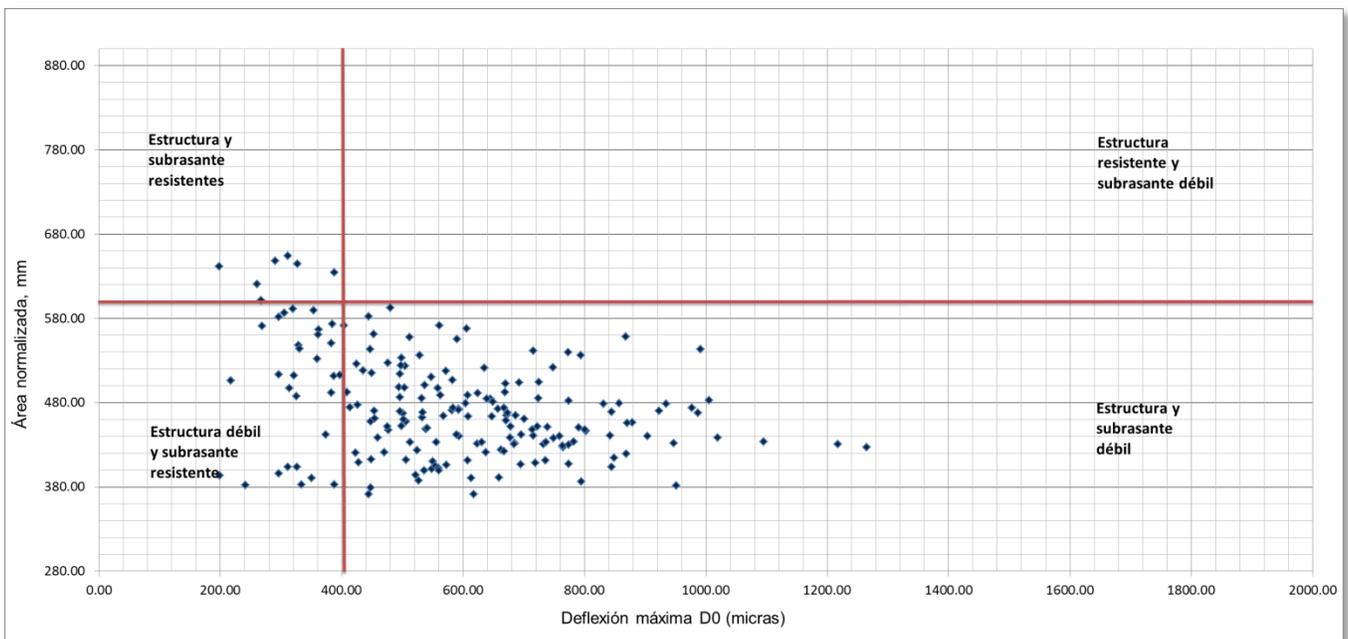


Figura 61.- Gráfico de Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 5.

2.5.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

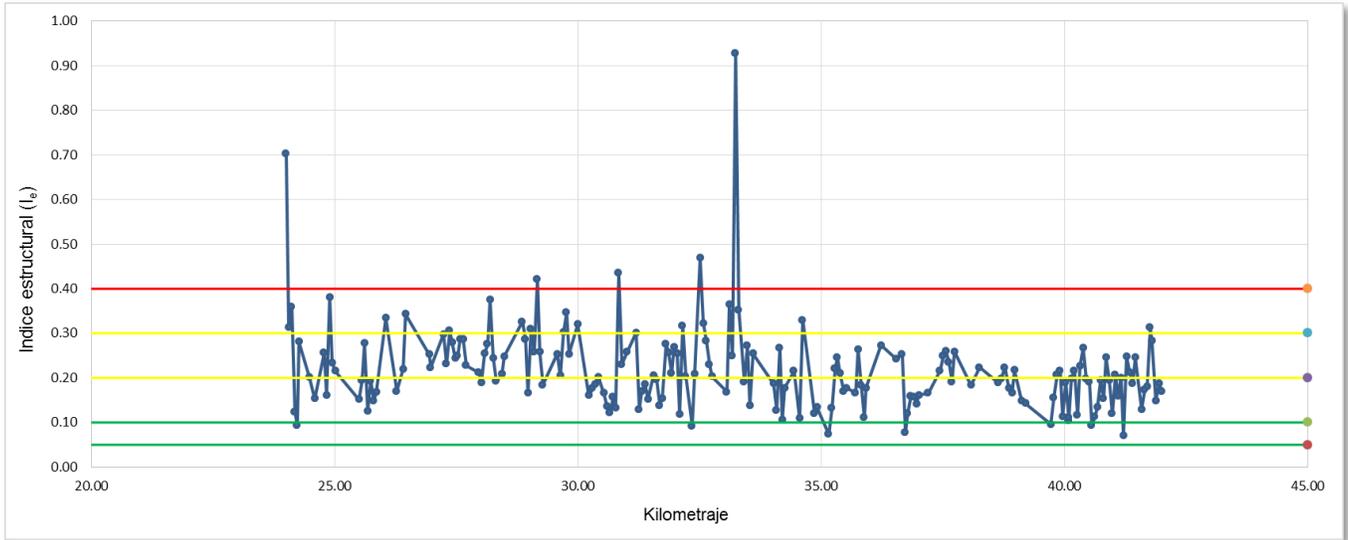


Figura 62.- Índice estructural para el proyecto 5.

2.5.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

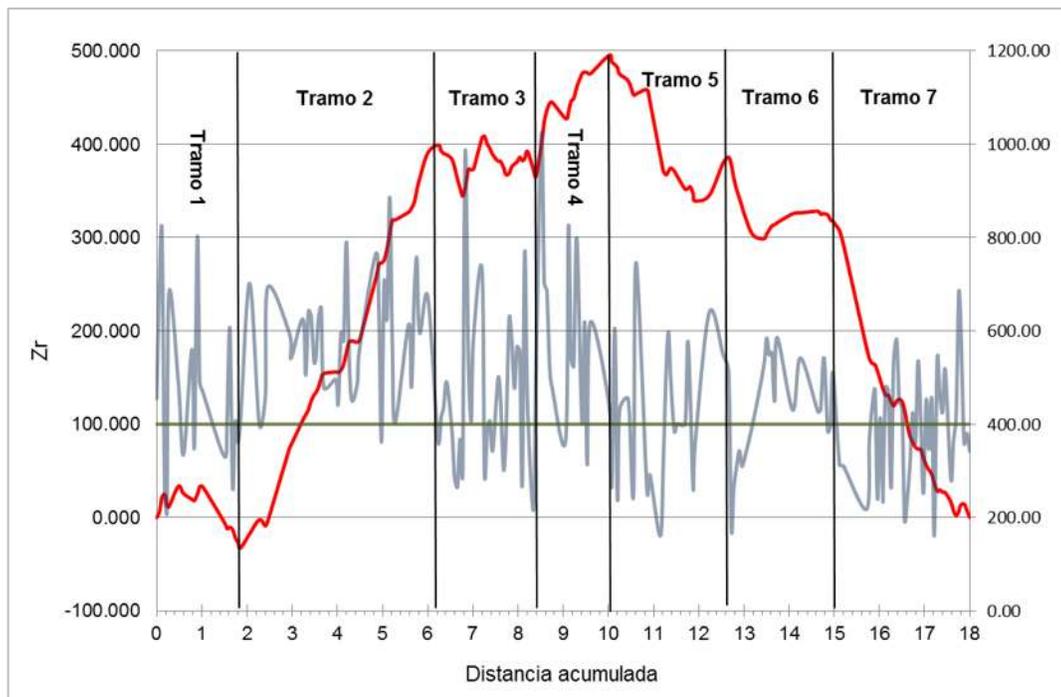


Figura 63.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 5.

Tabla 14.- Resultados de las metodologías para el proyecto 5.

Proyecto 5			
Tramos Homogéneos		Ing. Manuel Zárate Aquino	Dr. Raúl Vicente Orozco
km inicial	km final		
24+000	25+800	Estructura y subrasante débil	Reforzamiento con carpeta
25+800	30+230		Reforzamiento con carpeta
30+230	32+400		Reforzamiento con carpeta
32+400	34+020		Reforzamiento con carpeta
34+020	36+660		Reforzamiento con carpeta
36+660	39+120		Reforzamiento con carpeta
39+120	42+000		Reforzamiento con carpeta

2.6. PROYECTO 6 (28.04 km).

2.6.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

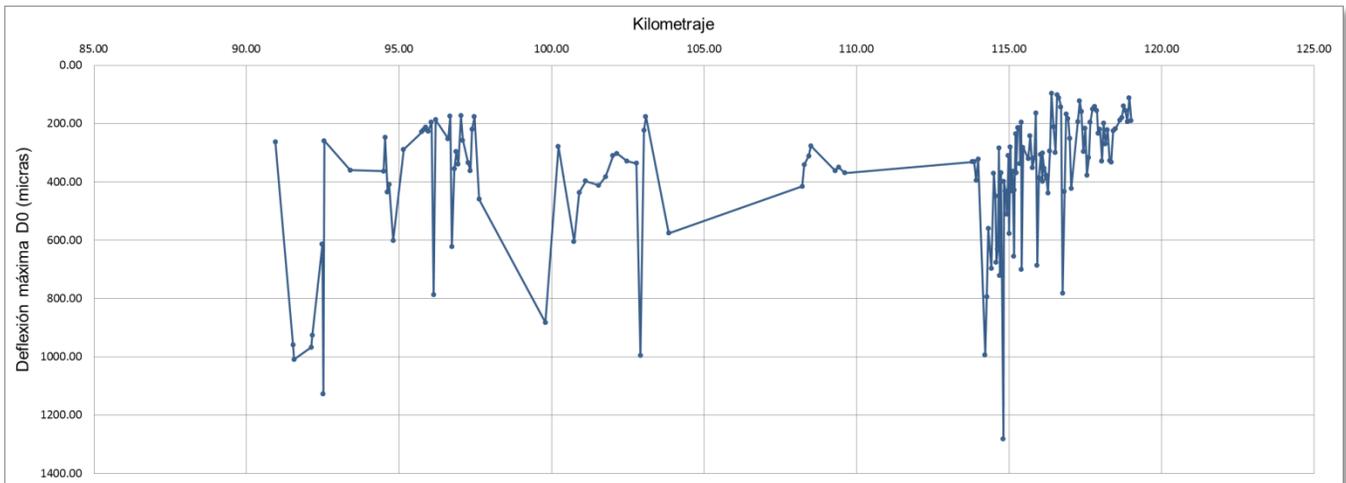


Figura 64.- Gráfico Deflexión máxima para el proyecto 6.

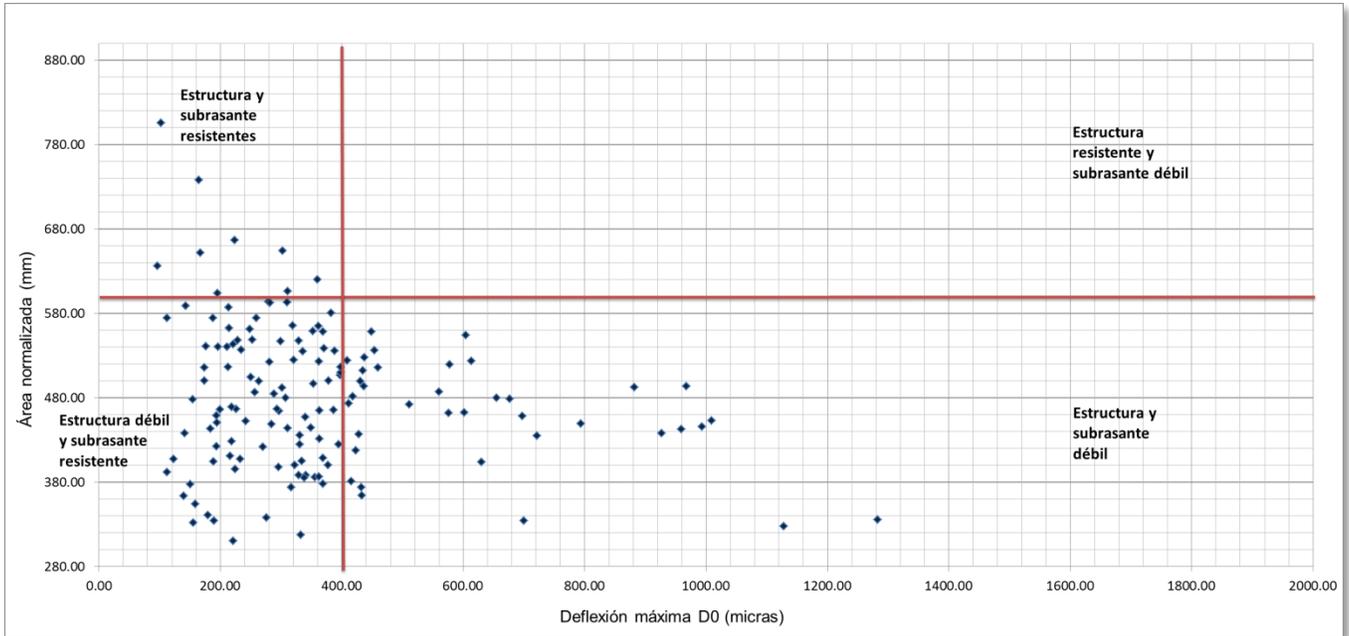


Figura 65.- Gráfico de Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 6.

2.6.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

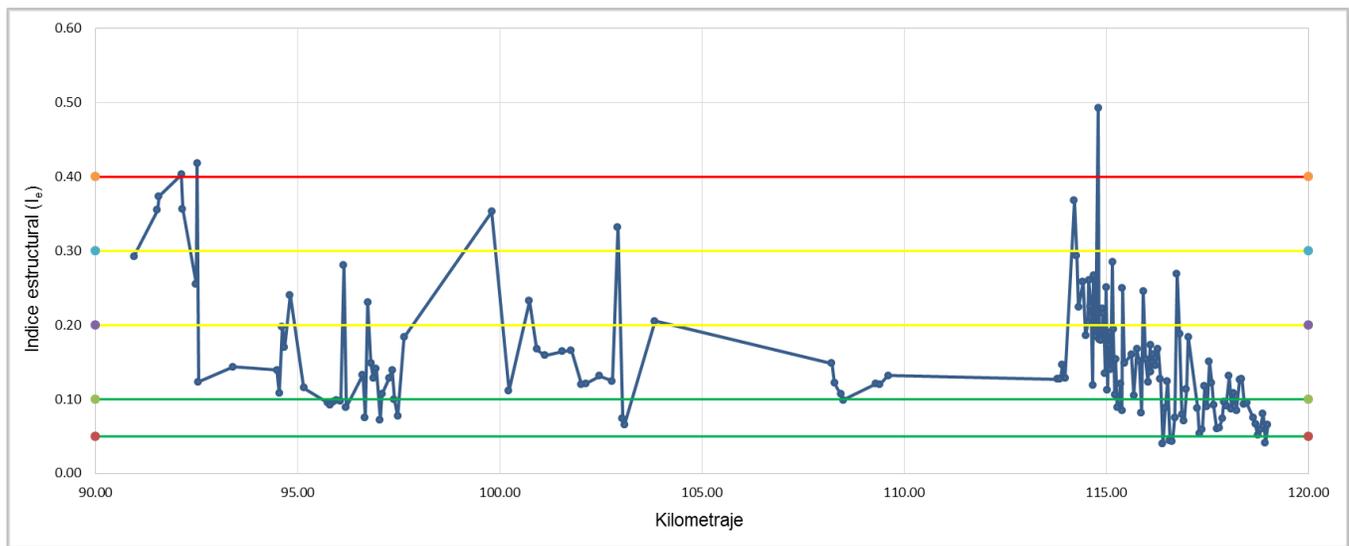


Figura 66.- Índice estructural para el proyecto 6.

2.6.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

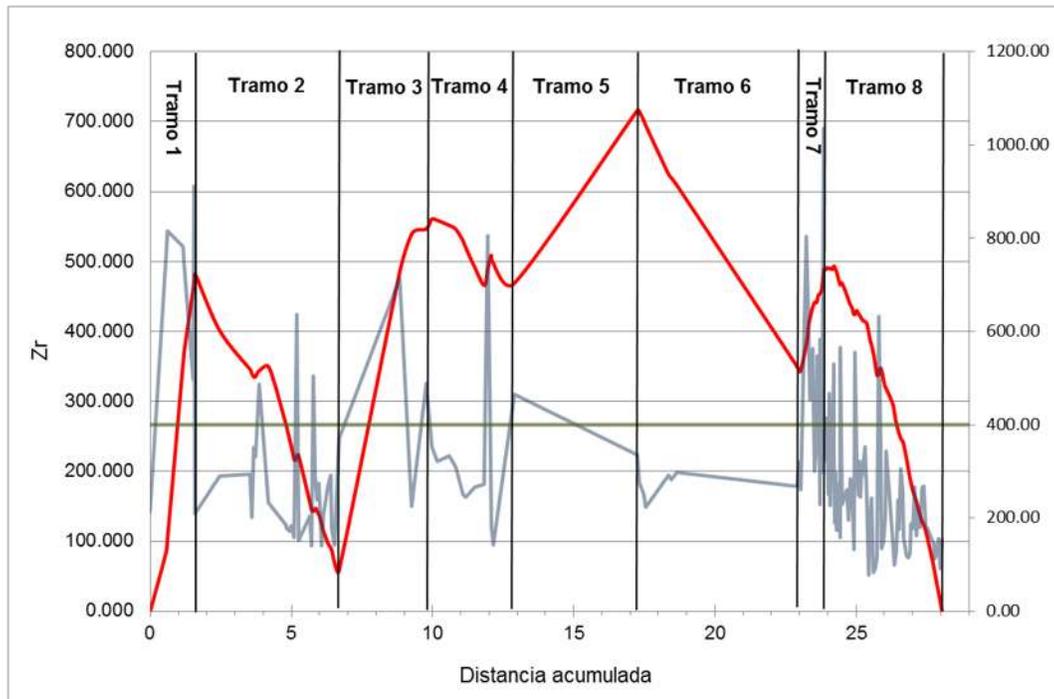


Figura 67.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 6.

Tabla 15.- Resultados de las metodologías para el proyecto 6.

Proyecto 6			
Tramos Homogéneos		Ing. Manuel Zárate Aquino	Dr. Raúl Vicente Orozco
km inicial	km final		
90+960	92+160	Estructura débil y subrasante resistente	Recuperación in situ
92+160	97+260		Reforzamiento con carpeta
97+260	100+920		Reforzamiento con carpeta
100+920	103+840		Reforzamiento con carpeta
103+840	108+220		Reforzamiento con carpeta
108+220	113+990		Reforzamiento con carpeta
113+990	114+940		Reforzamiento con carpeta
114+940	119+000		Reforzamiento con carpeta

2.7. PROYECTO 7 (29.98 km).

2.7.1. Cuerpo A.

2.7.1.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

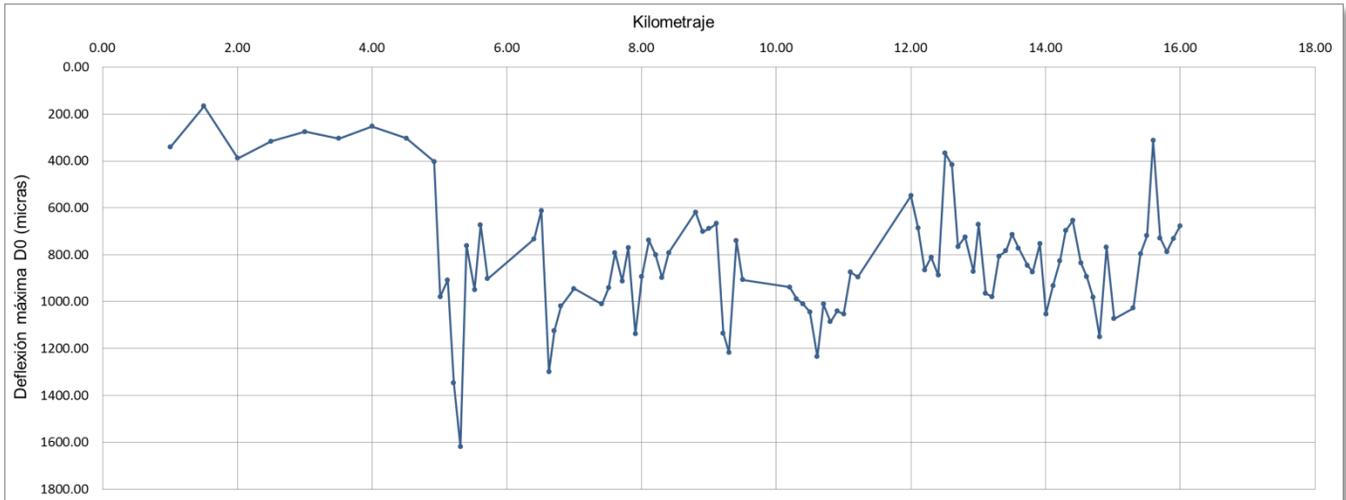


Figura 68.- Gráfico Deflexión máxima para el proyecto 7 Cuerpo A.

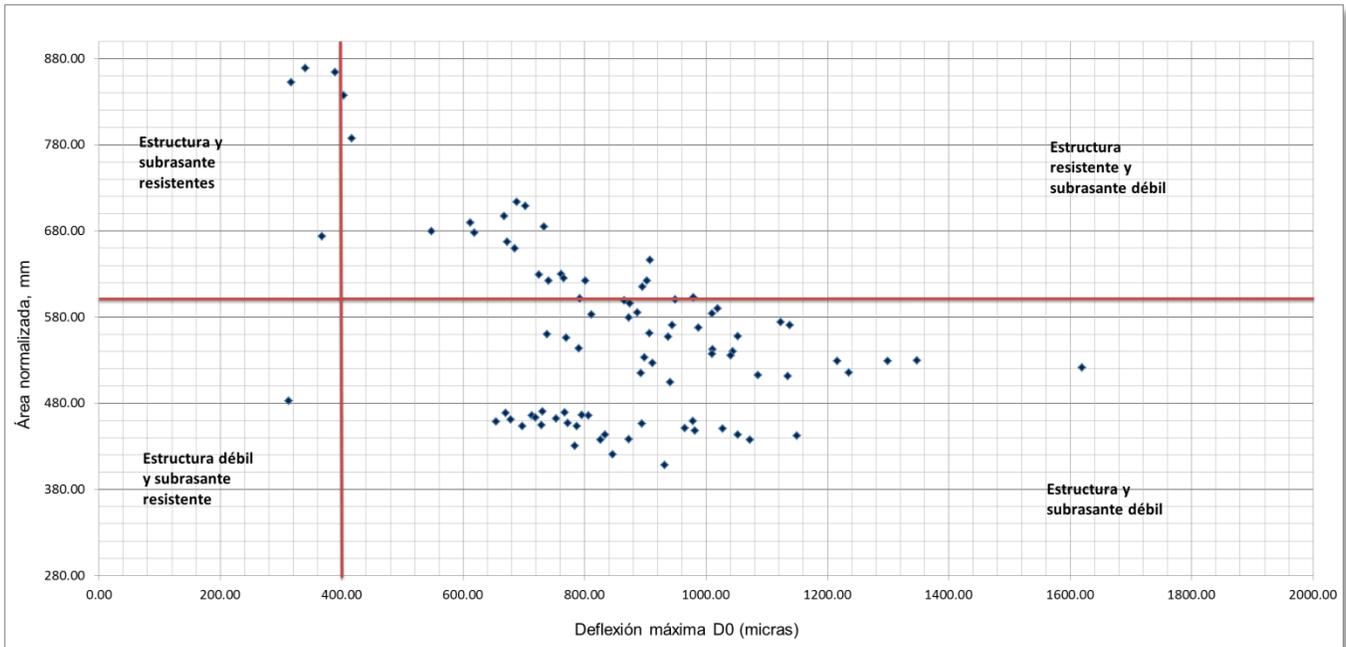


Figura 69.- Gráfico de Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 7 Cuerpo A.

2.7.1.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

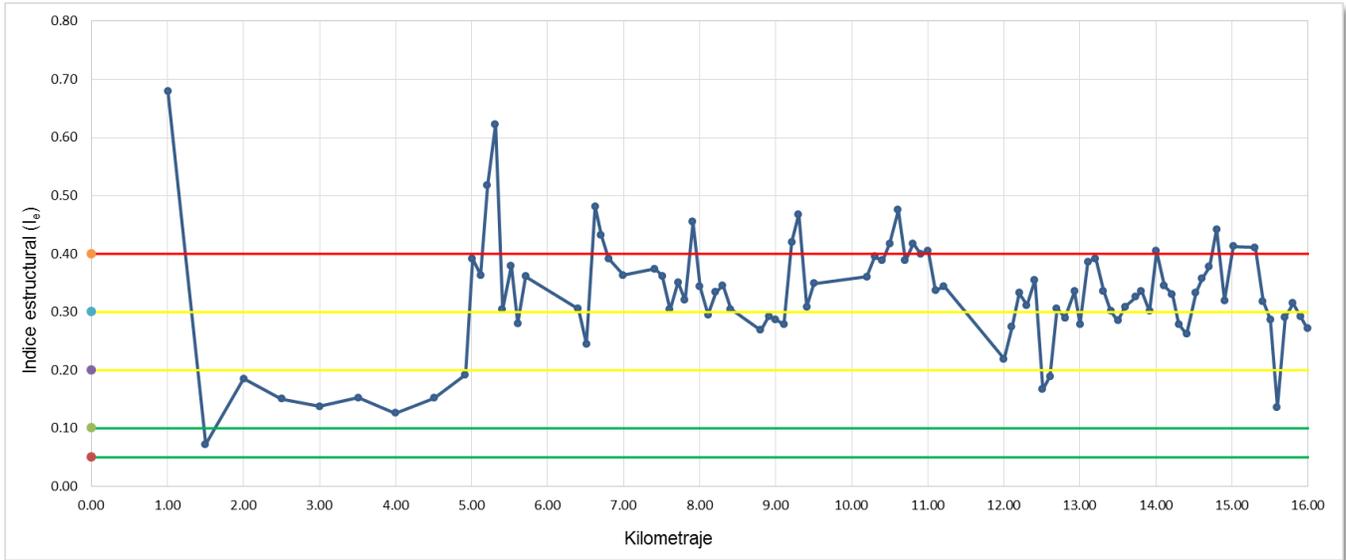


Figura 70.- Índice estructural para el proyecto 7 Cuerpo A.

2.7.1.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

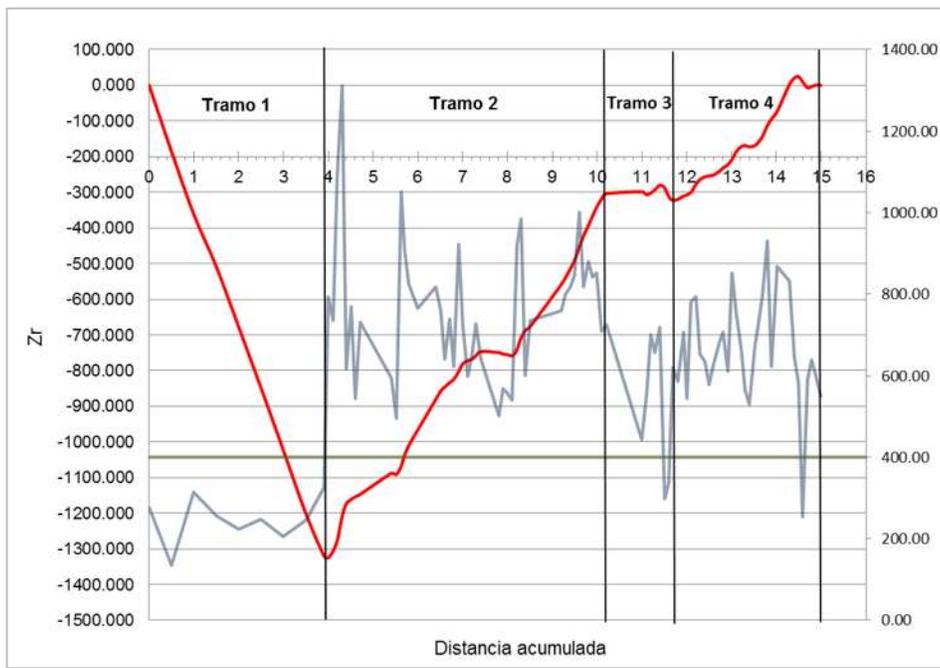


Figura 71.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 7 Cuerpo A.

2.7.2. Cuerpo B.

2.7.2.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

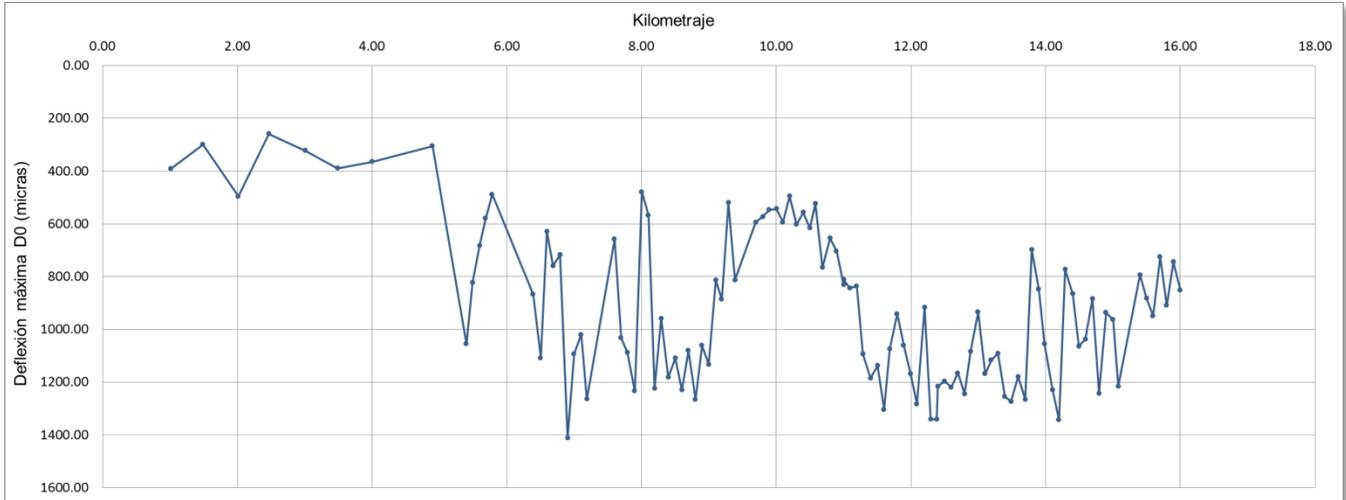


Figura 72.- Gráfico Deflexión máxima para el proyecto 7 Cuerpo B.

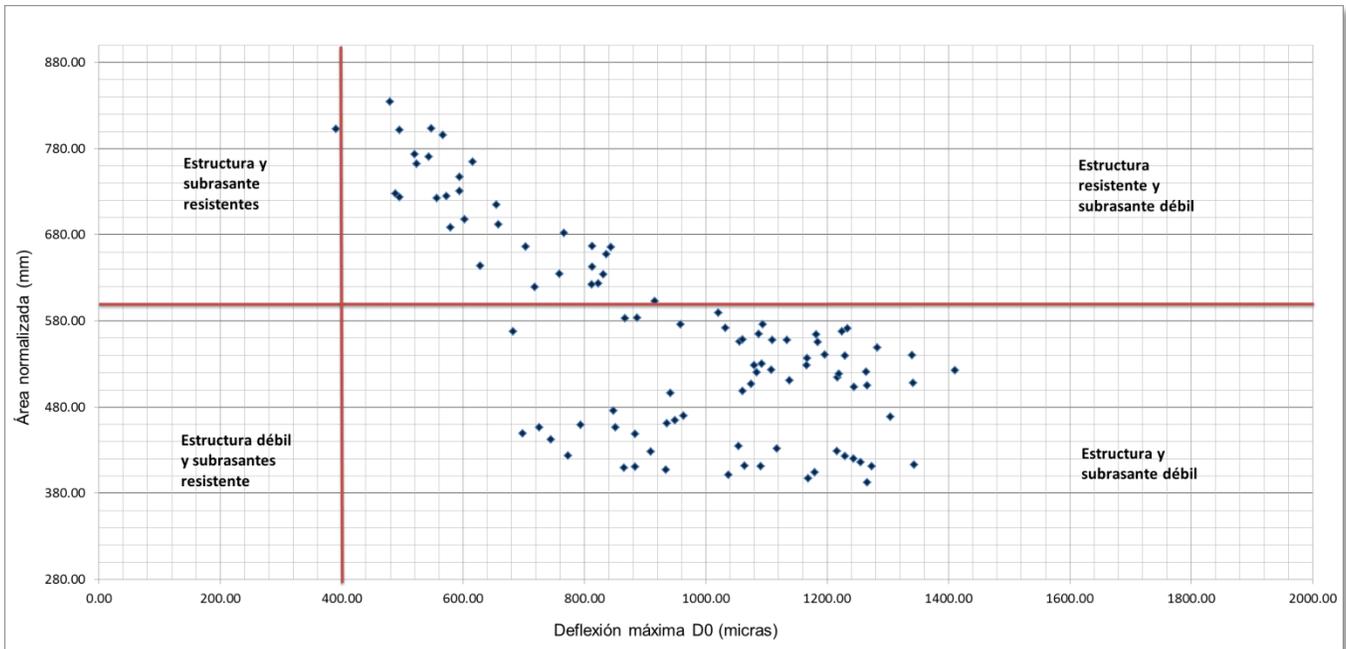


Figura 73.- Gráfico de Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 7 Cuerpo B.

2.7.2.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

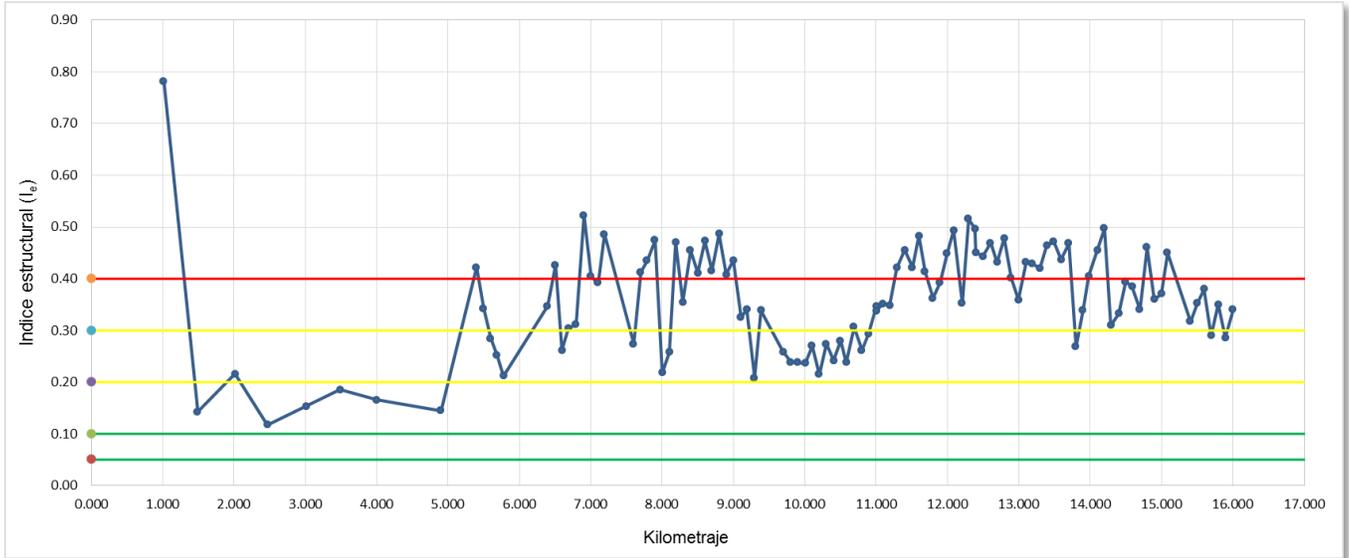


Figura 74.- Índice estructural para el proyecto 7 Cuerpo B.

2.7.2.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

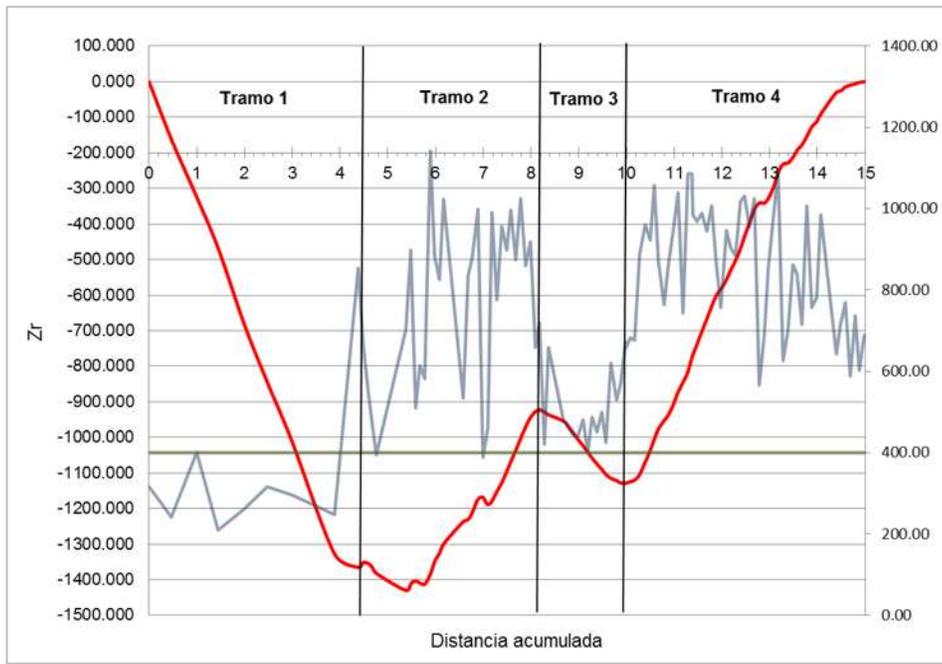


Figura 75.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 7 Cuerpo B.

Tabla 16.- Resultados de las metodologías para los cuerpos A y B del proyecto 7.

Proyecto 7			
Tramos Homogéneos		Ing. Manuel Zárate Aquino	Dr. Raúl Vicente Orozco
km inicial	km final		
Cuerpo A			
1+005	4+920	Estructura y subrasante débil	Reforzamiento con carpeta
4+920	11+210		Recuperación in situ
11+210	12+610		Recuperación in situ
12+610	15+995		Recuperación in situ
Cuerpo B			
1+014	5+494	Estructura y subrasante débil	Reforzamiento con carpeta
5+494	9+291		Recuperación in situ
9+291	11+002		Reforzamiento con carpeta
11+002	16+000		Recuperación in situ

2.8. PROYECTO 8 (33.37 km).

2.8.1. Cuerpo A.

2.8.1.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

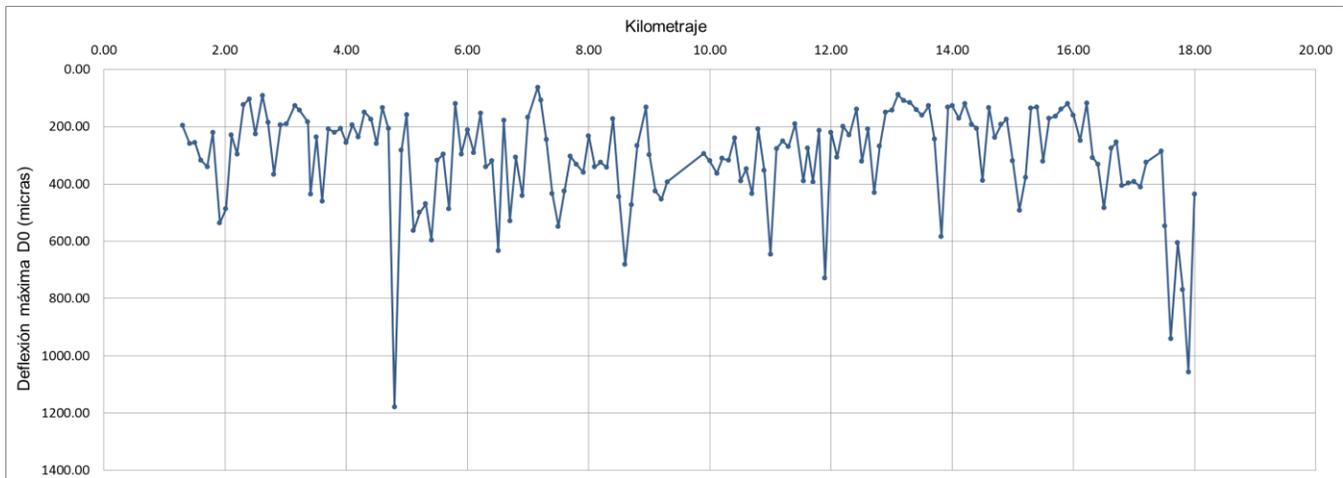


Figura 76.- Gráfico Deflexión máxima para el proyecto 8 Cuerpo A.

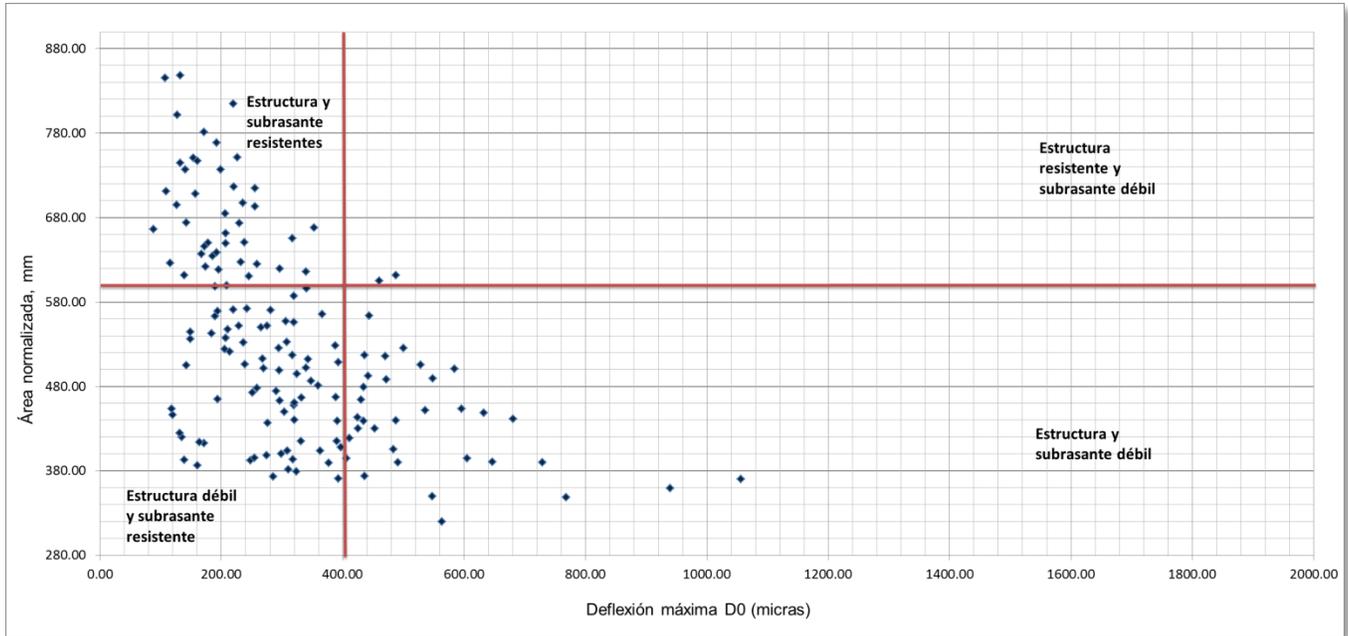


Figura 77.- Gráfico de Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 8 Cuerpo A.

2.8.1.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

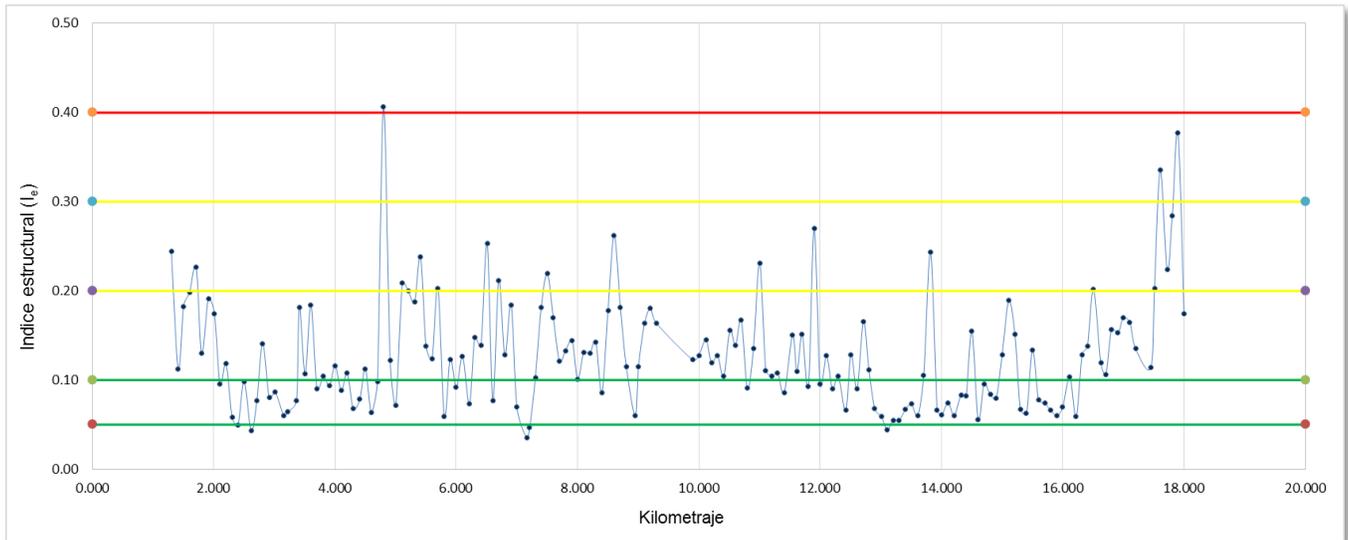


Figura 78.- Índice estructural para el proyecto 8 Cuerpo A.

2.8.1.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

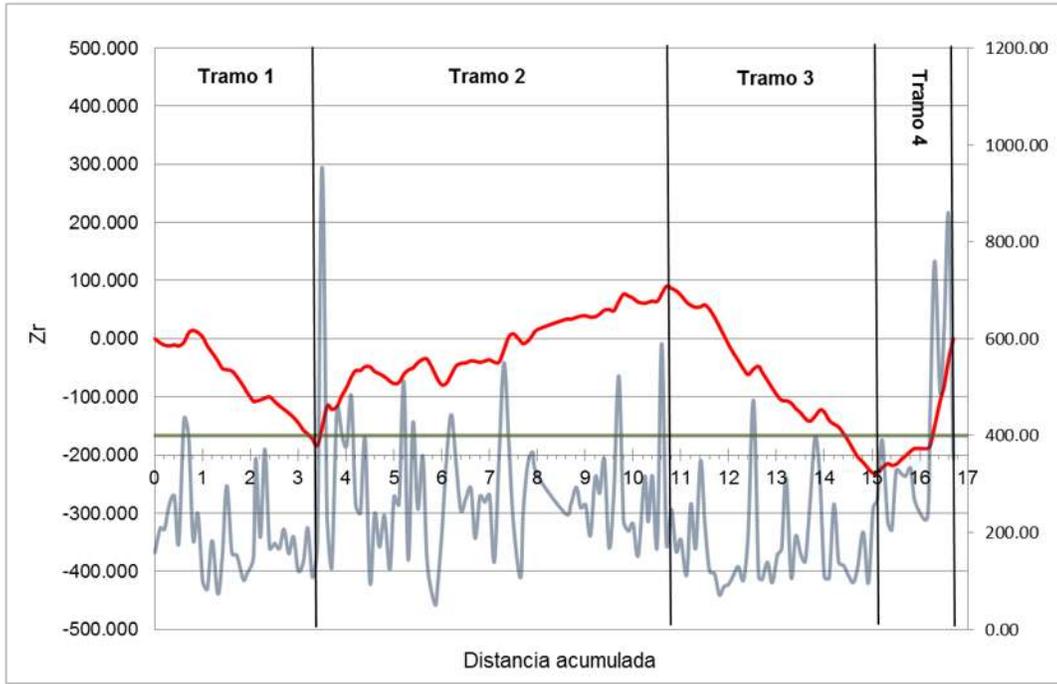


Figura 79.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 8 Cuerpo A.

2.8.2. Cuerpo B.

2.8.2.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

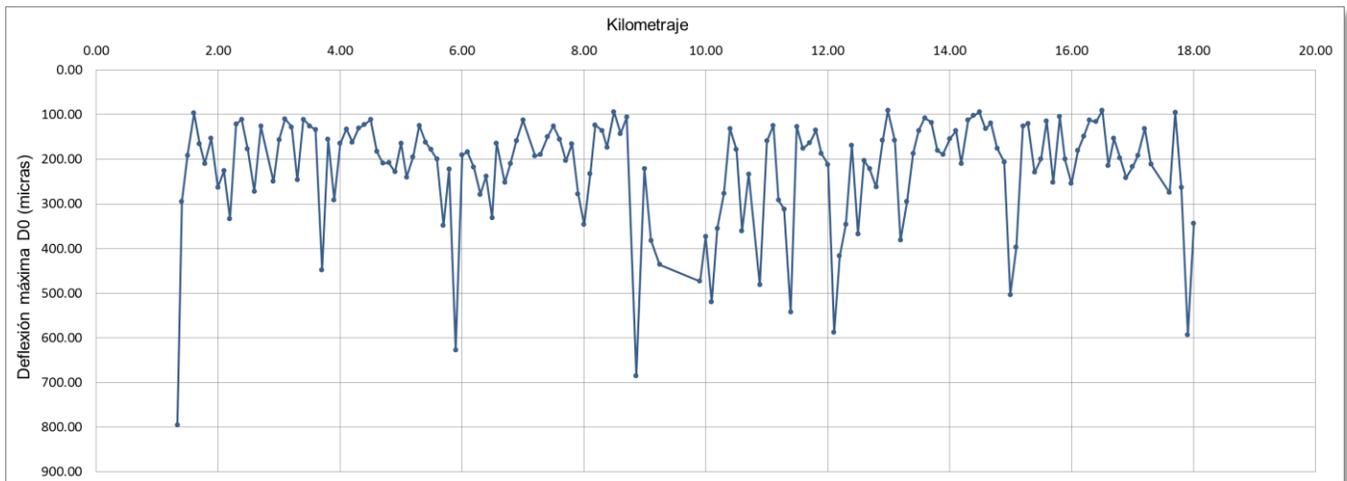


Figura 80.- Gráfico Deflexión máxima para el proyecto 8 Cuerpo B.

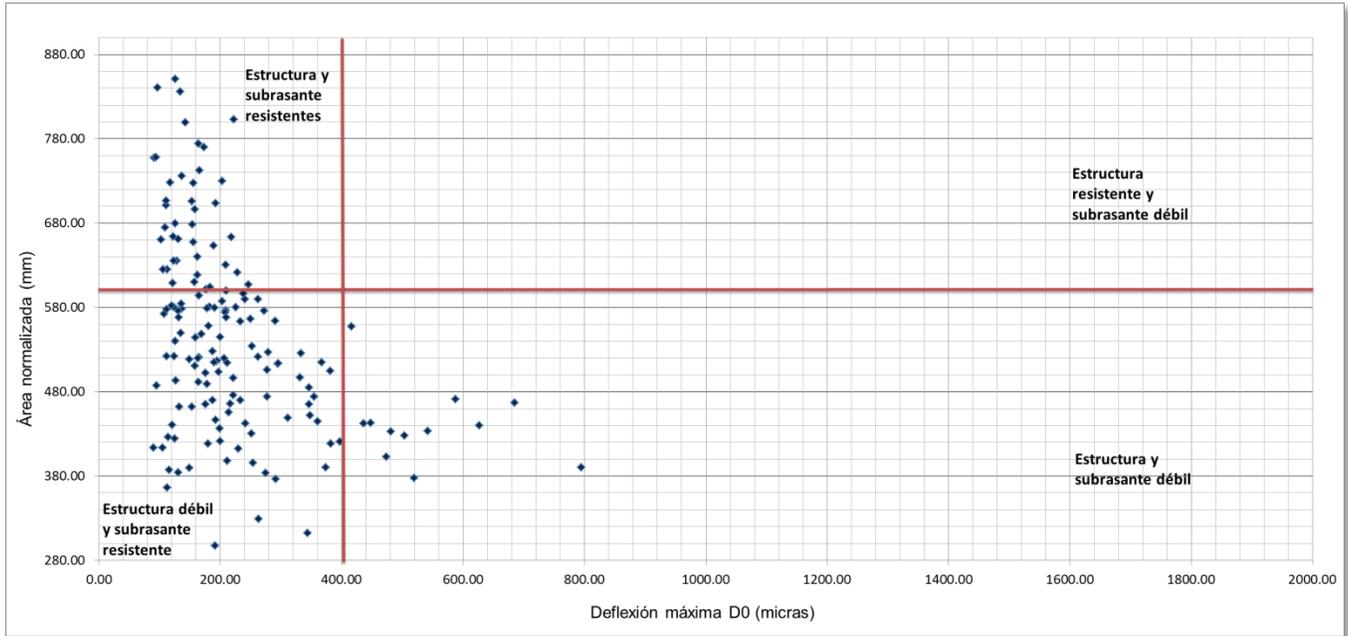


Figura 81.- Gráfico de Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 8 Cuerpo B.

2.8.2.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

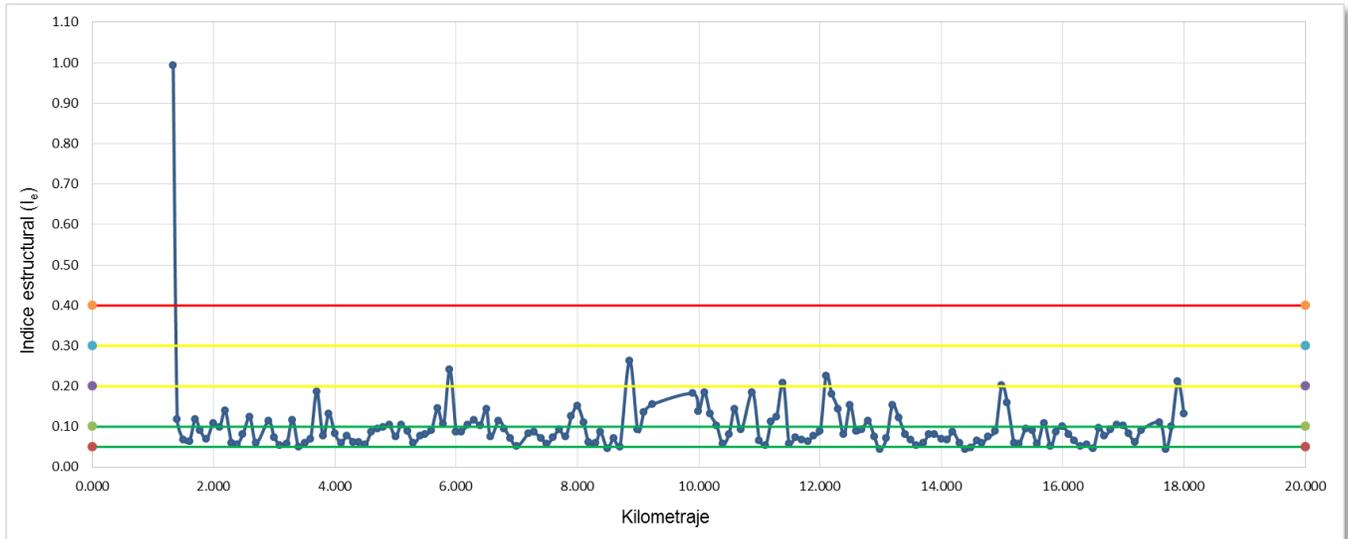


Figura 82.- Índice estructural para el proyecto 8 Cuerpo B.

2.8.2.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

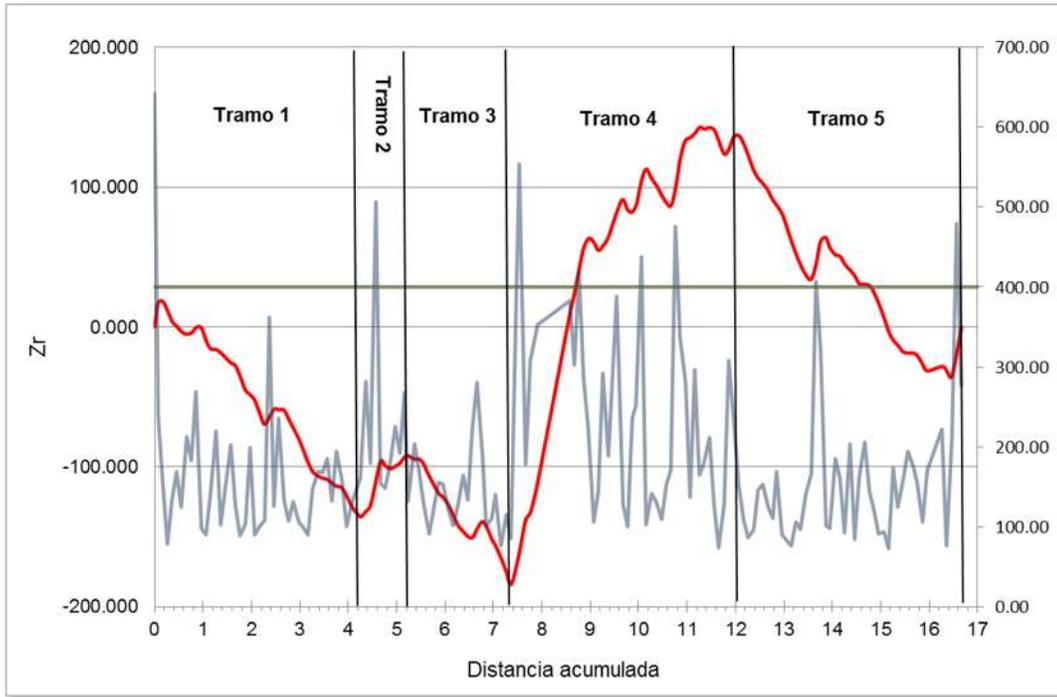


Figura 83.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 8 Cuerpo B.

Tabla 17.- Resultados de las metodologías para los cuerpos A y B del proyecto 8.

Proyecto 8			
Tramos Homogéneos		Ing. Manuel Zárate Aquino	Dr. Raúl Vicente Orozco
km inicial	km final		
Cuerpo A			
1+300	4+500	Estructura débil y subrasante resistente	Reforzamiento con carpeta
4+500	12+102		Reforzamiento con carpeta
12+102	16+508		Tratamiento superficial
16+508	18+000		Reforzamiento con carpeta
Cuerpo B			
1+331	5+588	Estructura débil y subrasante resistente	Tratamiento superficial
5+588	6+563		Tratamiento superficial
6+563	8+699		Tratamiento superficial
8+699	13+400		Reforzamiento con carpeta
13+400	18+000		Tratamiento superficial

2.9. PROYECTO 9 (236.60 km).

2.9.1. Cuerpo A (Primer tramo, 59.00 km).

2.9.1.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

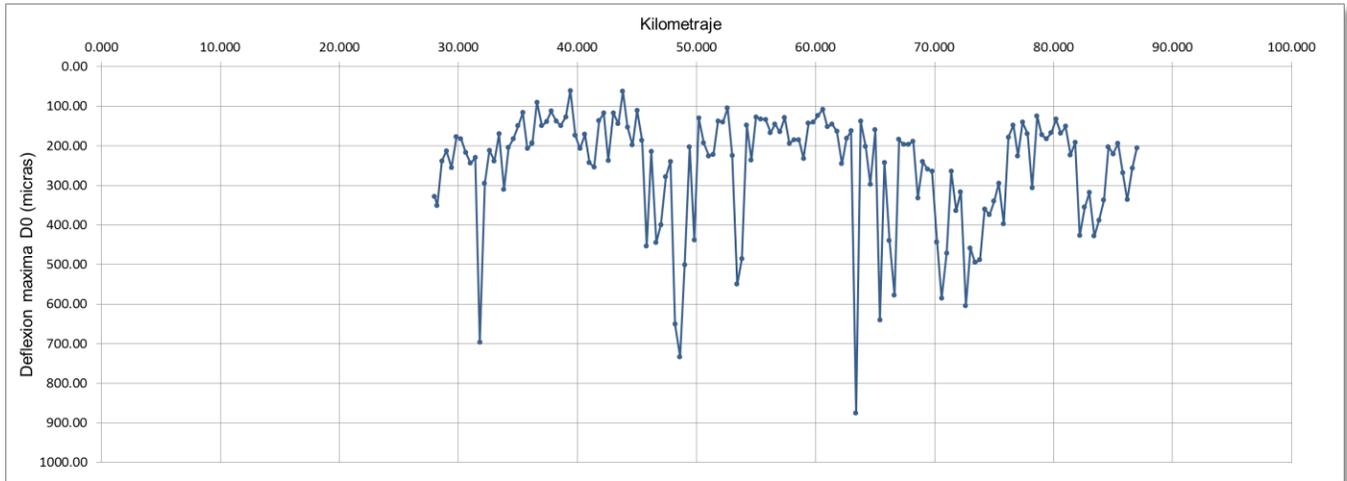


Figura 84.- Gráfico de Deflexión máxima para el proyecto 9 Cuerpo A (Primer tramo).

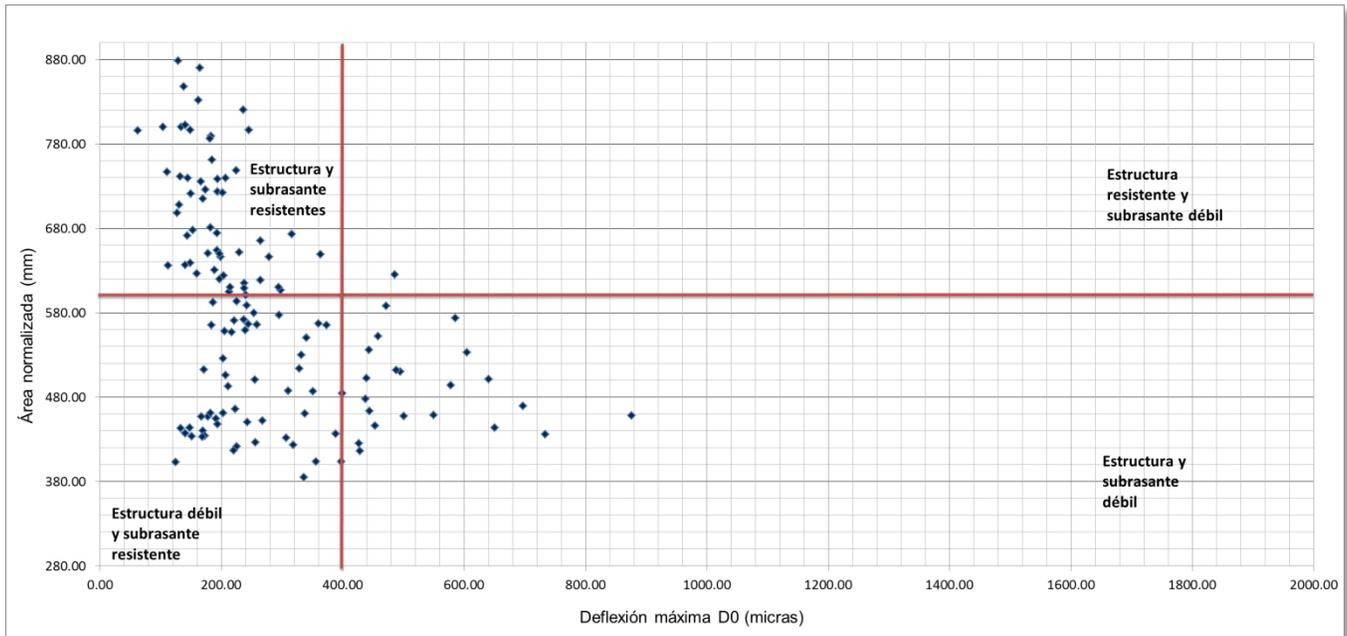


Figura 85.- Gráfico Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 9 Cuerpo A (Primer tramo).

2.9.1.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

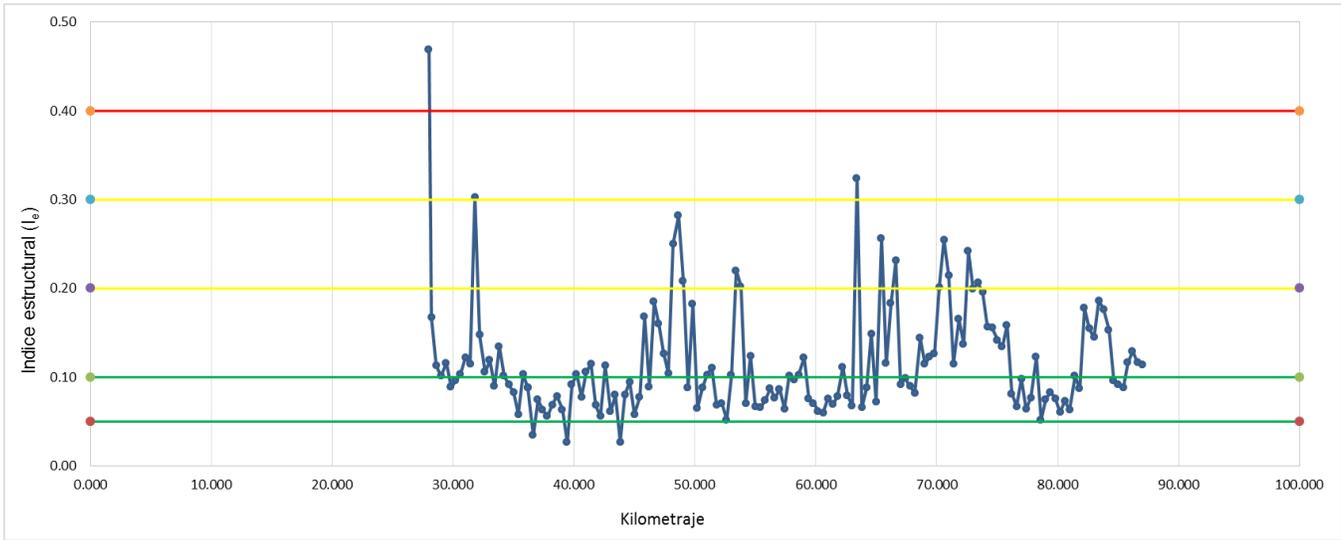


Figura 86.- Índice estructural para el proyecto 9 Cuerpo A (Primer tramo).

2.9.1.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

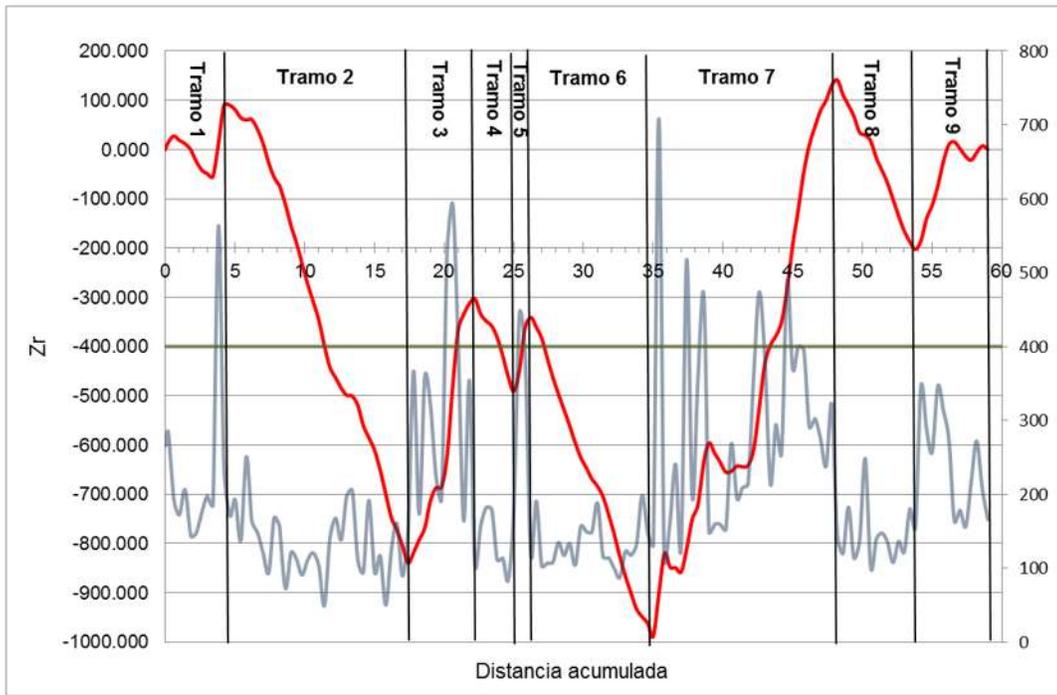


Figura 87.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 9 Cuerpo A (Primer tramo).

2.9.2. Cuerpo A (Segundo tramo, 59.20 km).

2.9.2.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

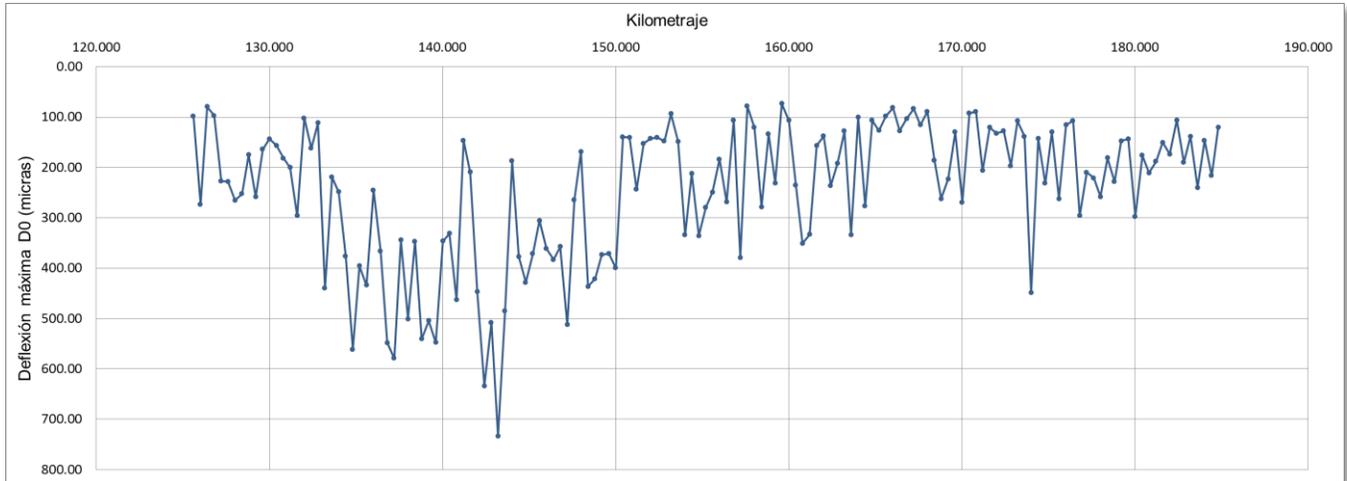


Figura 88.- Gráfico de Deflexión máxima para el proyecto 9 Cuerpo A (Segundo tramo).

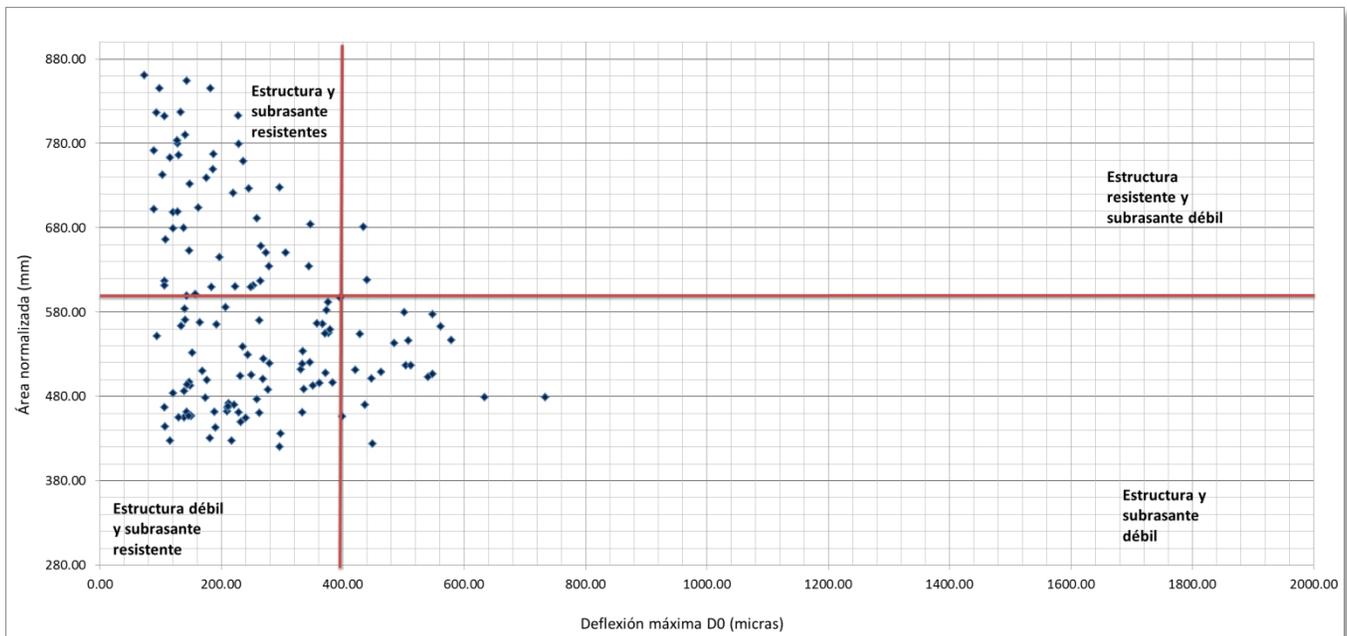


Figura 89.- Gráfico Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 9 Cuerpo A (Segundo tramo).

2.9.2.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

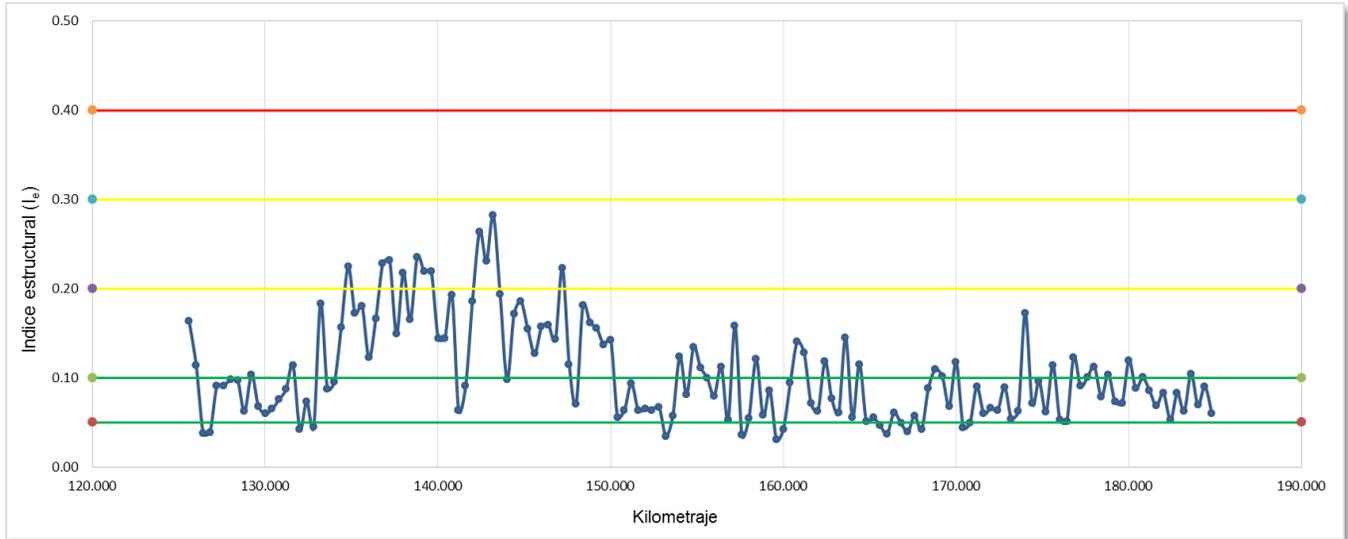


Figura 90.- Índice estructural para el proyecto 9 Cuerpo A (Segundo tramo).

2.9.2.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

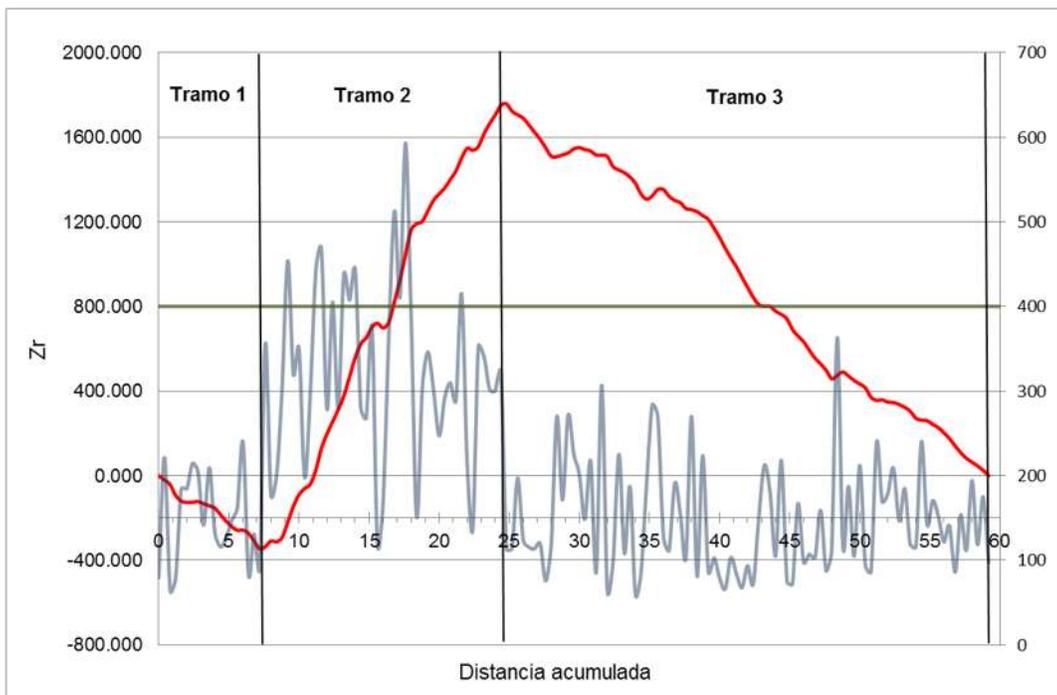


Figura 91.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 9 Cuerpo A (Segundo tramo).

2.9.3. Cuerpo B (Primer tramo, 58.40 km).

2.9.3.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

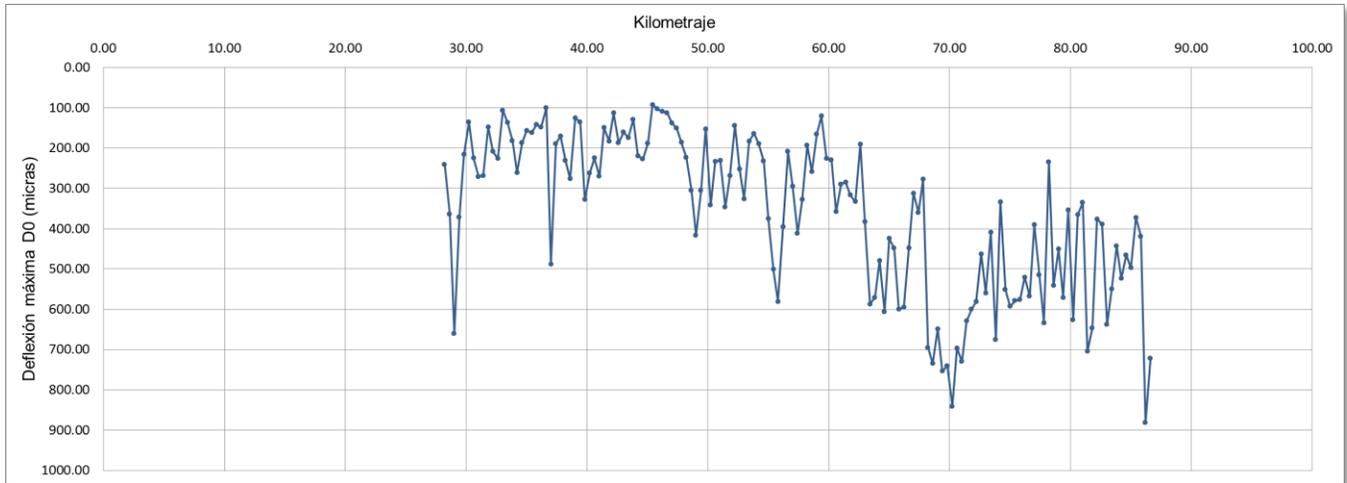


Figura 92.- Gráfico de Deflexión máxima para el proyecto 9 Cuerpo B (Primer tramo).

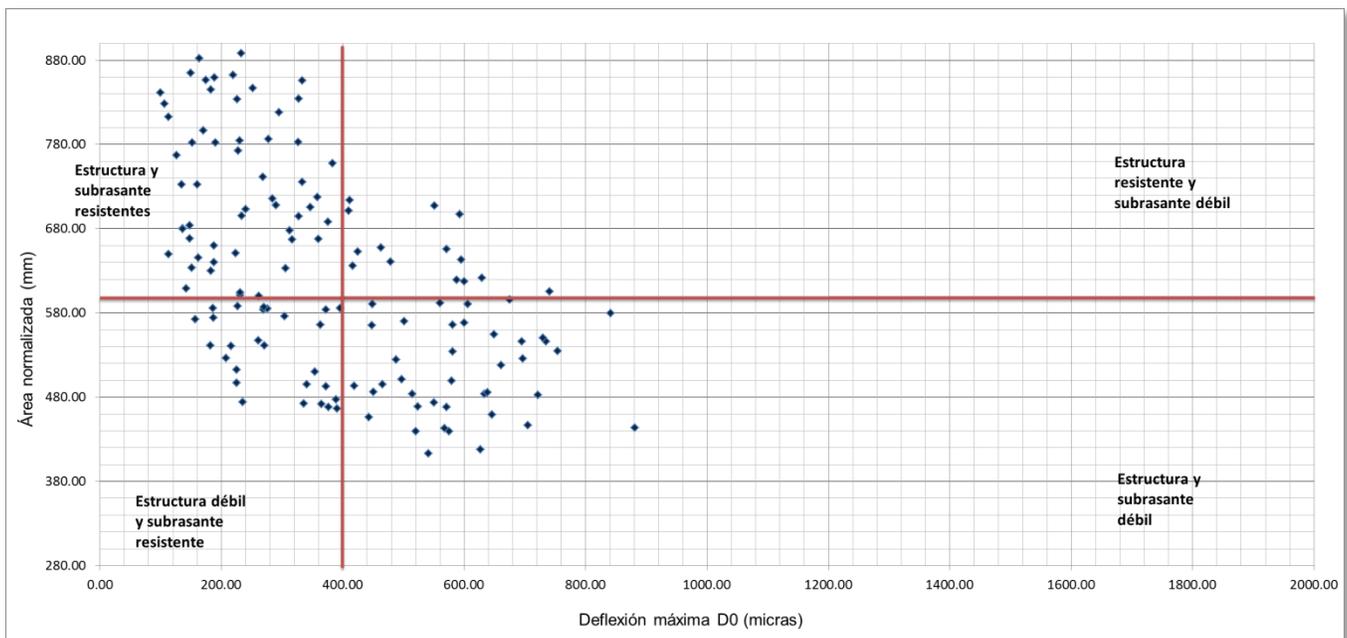


Figura 93.- Gráfico de Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 9 Cuerpo B (Primer tramo).

2.9.3.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

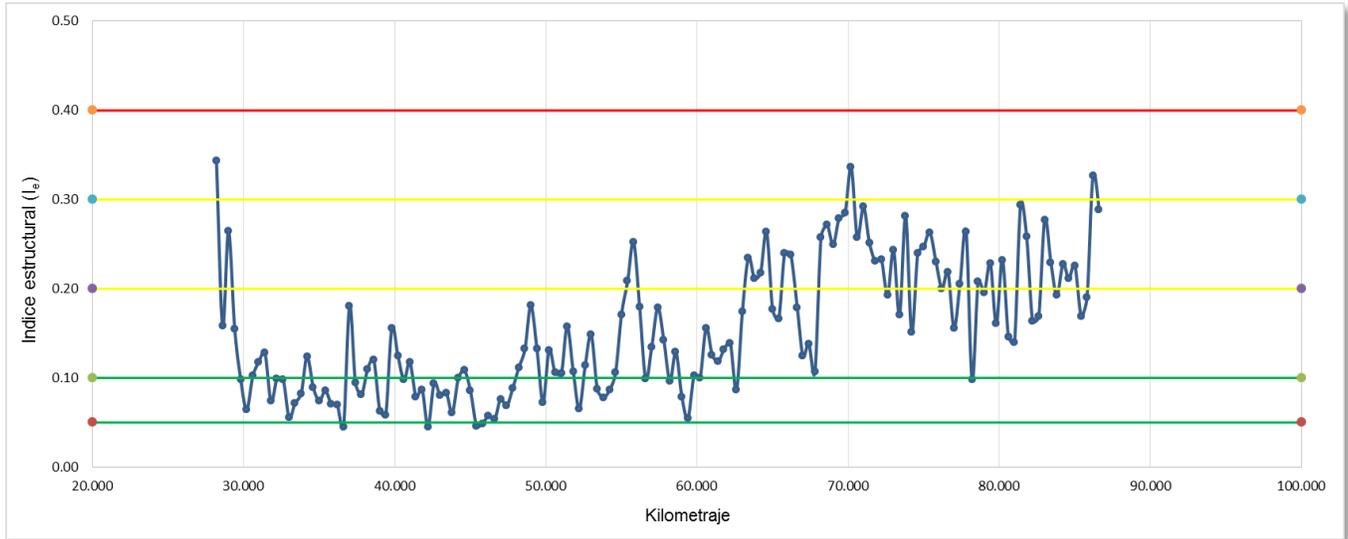


Figura 94.- Índice estructural para el proyecto 9 Cuerpo B (Primer tramo).

2.9.3.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

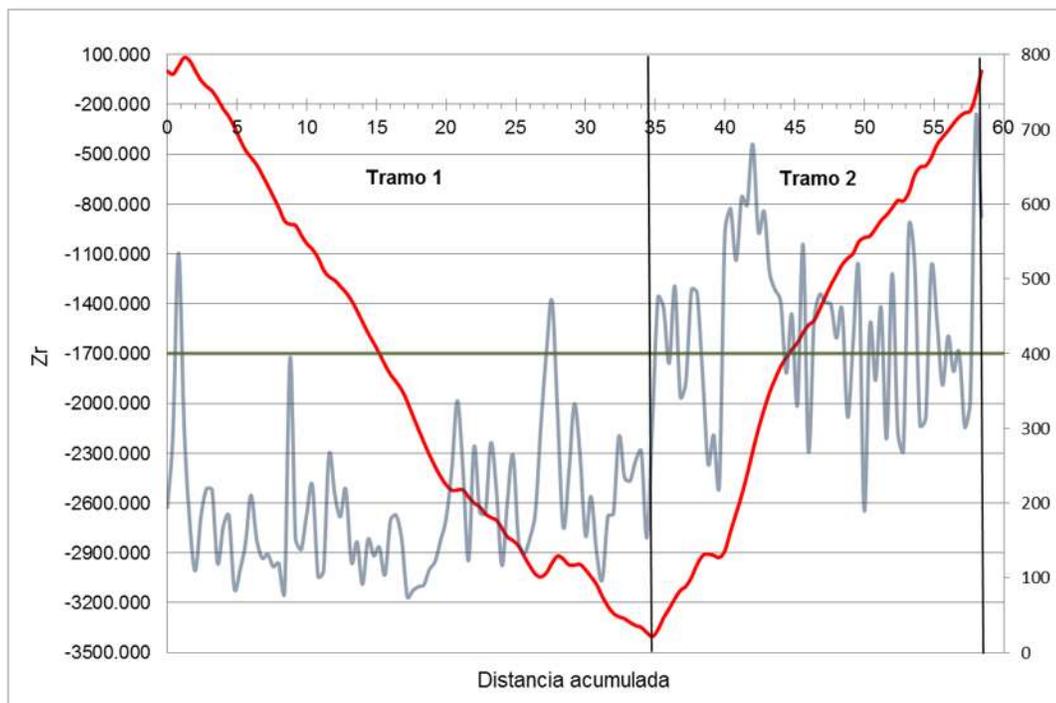


Figura 95.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 9 Cuerpo B (Primer tramo).

2.9.4. Cuerpo B (Segundo tramo, 59.99 km).

2.9.4.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

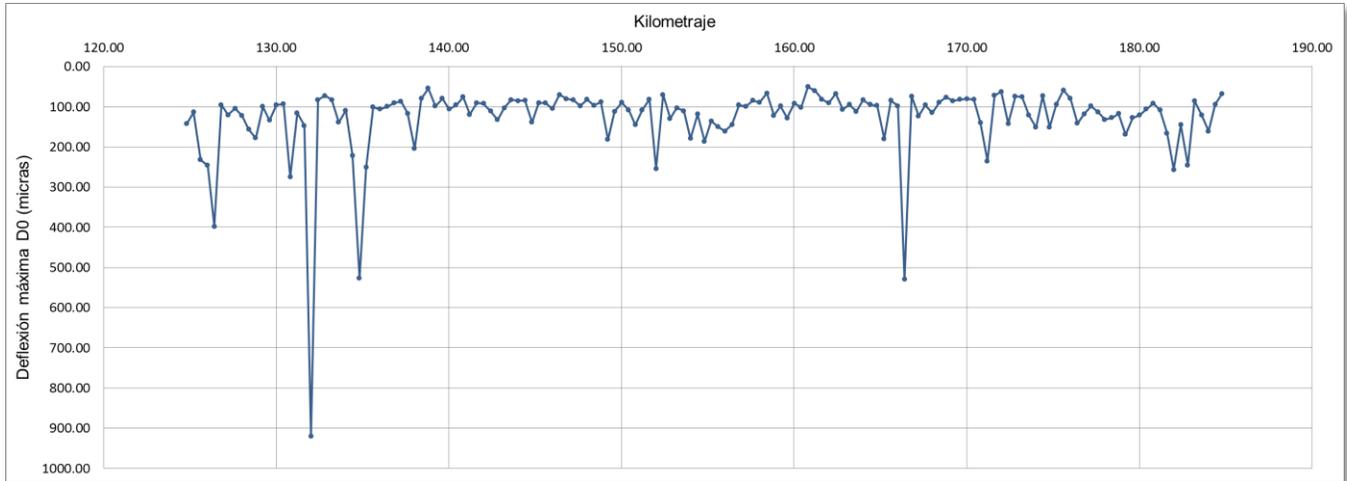


Figura 96.- Gráfico de Deflexión máxima para el proyecto 9 Cuerpo B (Segundo tramo).

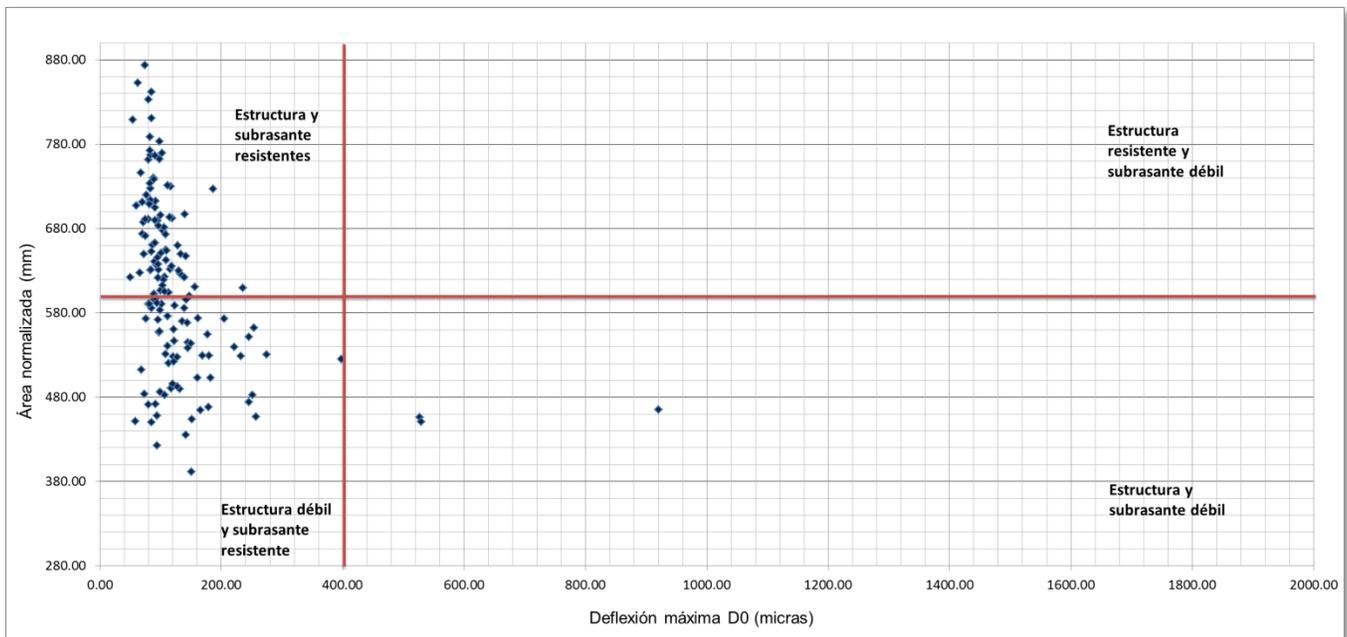


Figura 97.- Gráfico Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 9 Cuerpo B (Segundo tramo).

2.9.4.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

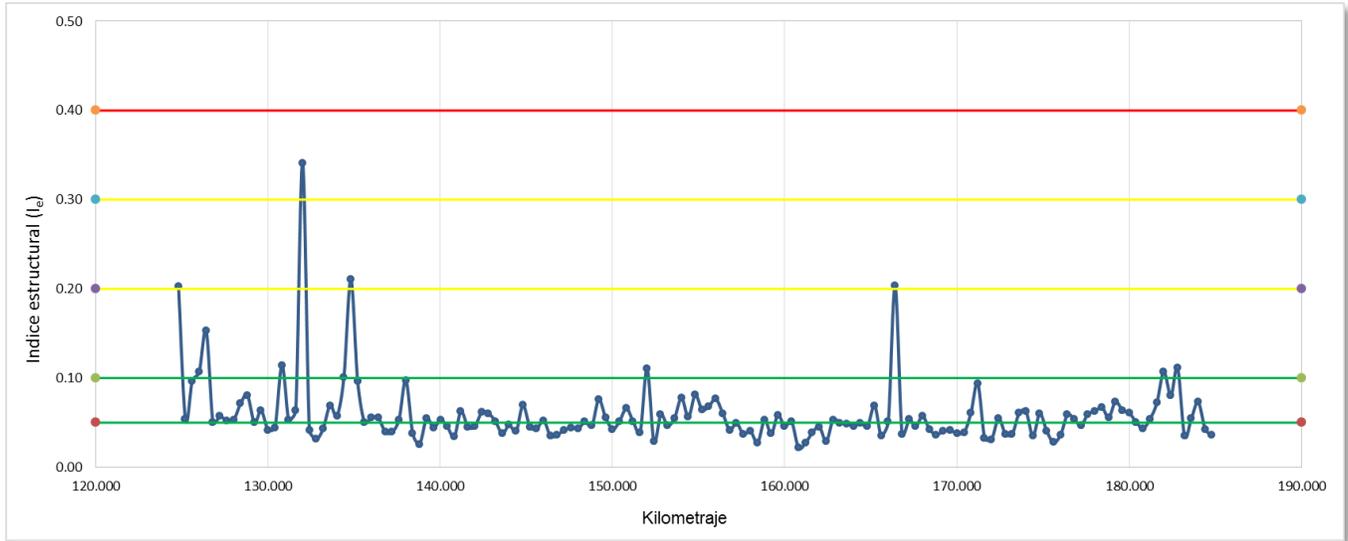


Figura 98.- Índice estructural para el proyecto 9 Cuerpo B (Segundo tramo).

2.9.4.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

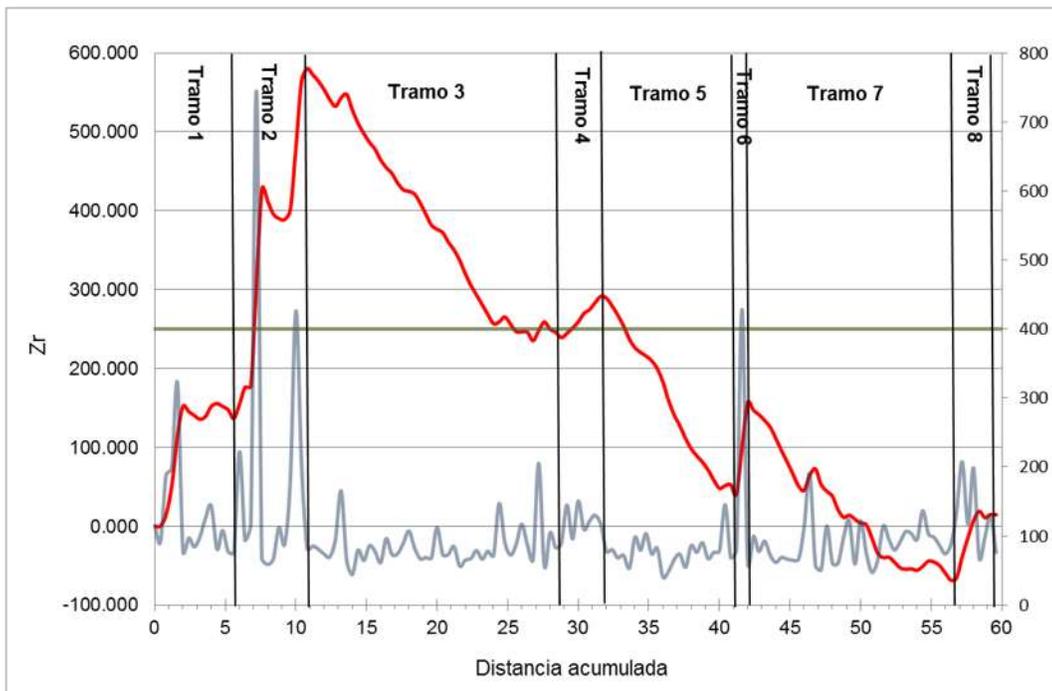


Figura 99.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 9 Cuerpo B (Segundo tramo).

Tabla 18.- Resultados de las metodologías para los cuerpos A y B del proyecto 9.

Proyecto 9			
Tramos Homogéneos		Ing. Manuel Zárate Aquino	Dr. Raúl Vicente Orozco
km inicial	km final		
Cuerpo A			
Primer tramo			
28+000	31+409	Estructura y subrasante resistentes	Reforzamiento con carpeta
31+409	34+199		Tratamiento superficial
34+611	45+412		Tratamiento superficial
45+412	50+206		Reforzamiento con carpeta
50+206	53+000		Tratamiento superficial
53+000	54+214		Reforzamiento con carpeta
54+214	63+001		Tratamiento superficial
63+001	76+205		Reforzamiento con carpeta
76+205	81+812		Tratamiento superficial
81+812	87+000		Reforzamiento con carpeta
Segundo tramo			
125+601	133+203	Estructura y subrasante resistentes	Tratamiento superficial
133+203	150+401		Reforzamiento con carpeta
150+401	184+802		Tratamiento superficial
Cuerpo B			
Primer tramo			
28+206	35+004	Estructura y subrasante resistentes	Tratamiento superficial
35+007	63+400		Tratamiento superficial
63+400	86+608		Reforzamiento con carpeta
Segundo tramo			
124+803	130+407	Estructura y subrasante resistentes	Tratamiento superficial
130+407	136+005		Tratamiento superficial
136+005	153+600		Tratamiento superficial
154+001	156+801		Tratamiento superficial
156+801	166+009		Tratamiento superficial
166+009	167+211		Tratamiento superficial
167+211	180+405		Tratamiento superficial
180+405	184+789		Tratamiento superficial

2.10. PROYECTO 10 (204.600 km).

2.10.1. Cuerpo A (102.200 km).

2.10.1.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

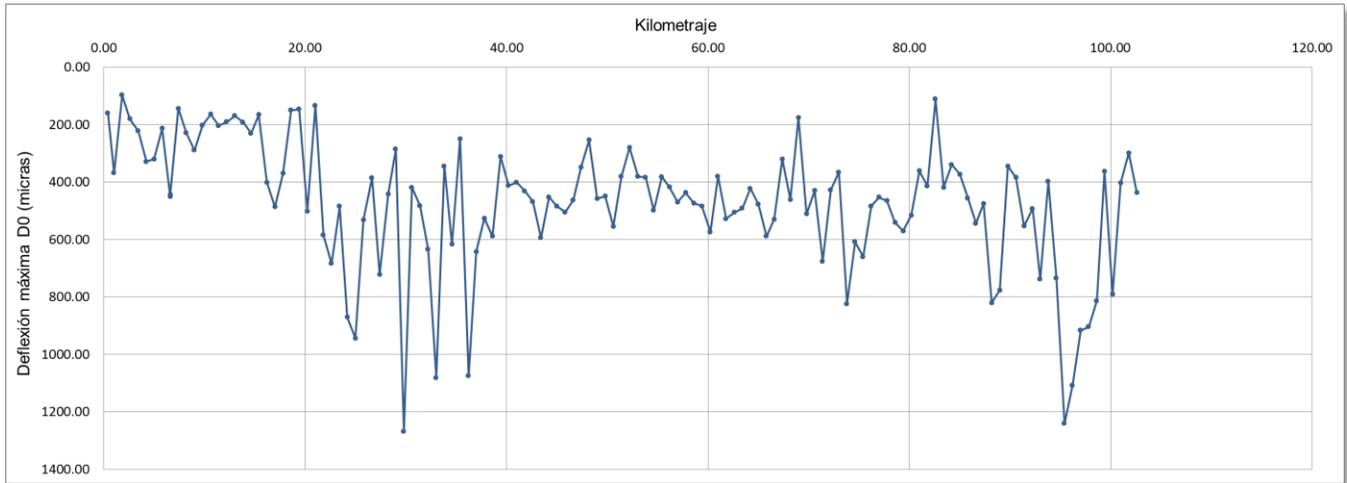


Figura 100.- Gráfico de Deflexión máxima para el proyecto 10 Cuerpo A.

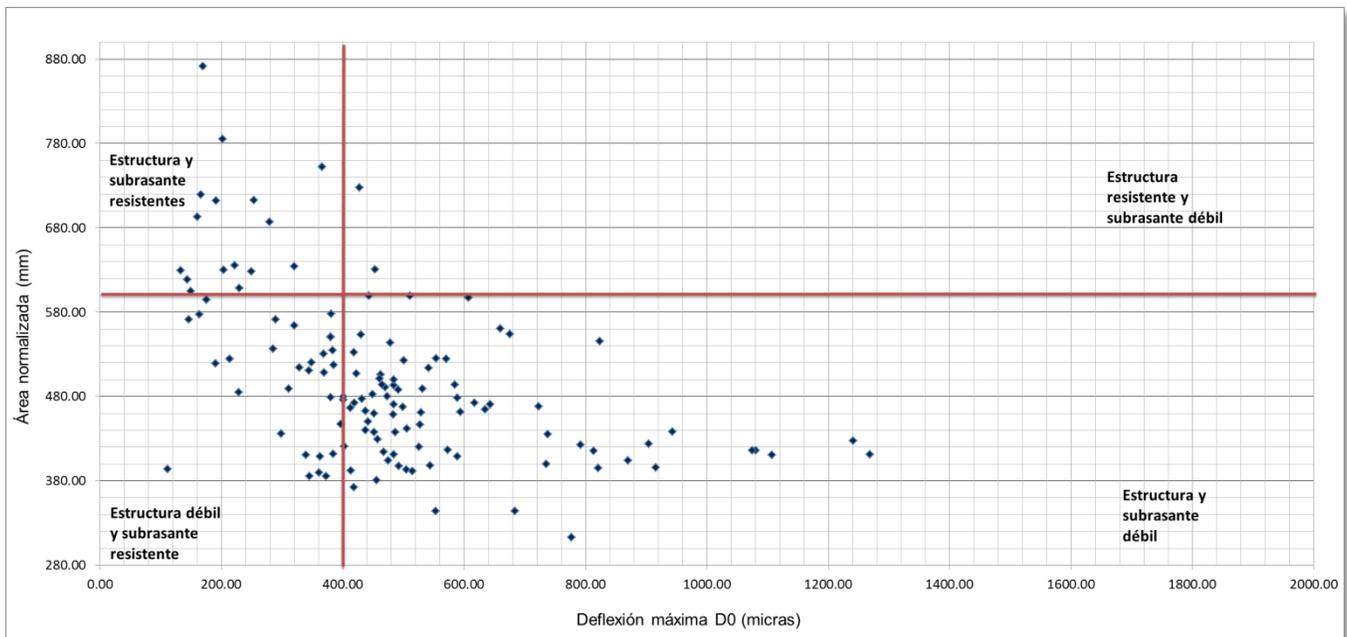


Figura 101.- Gráfico de Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 10 Cuerpo A.

2.10.1.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

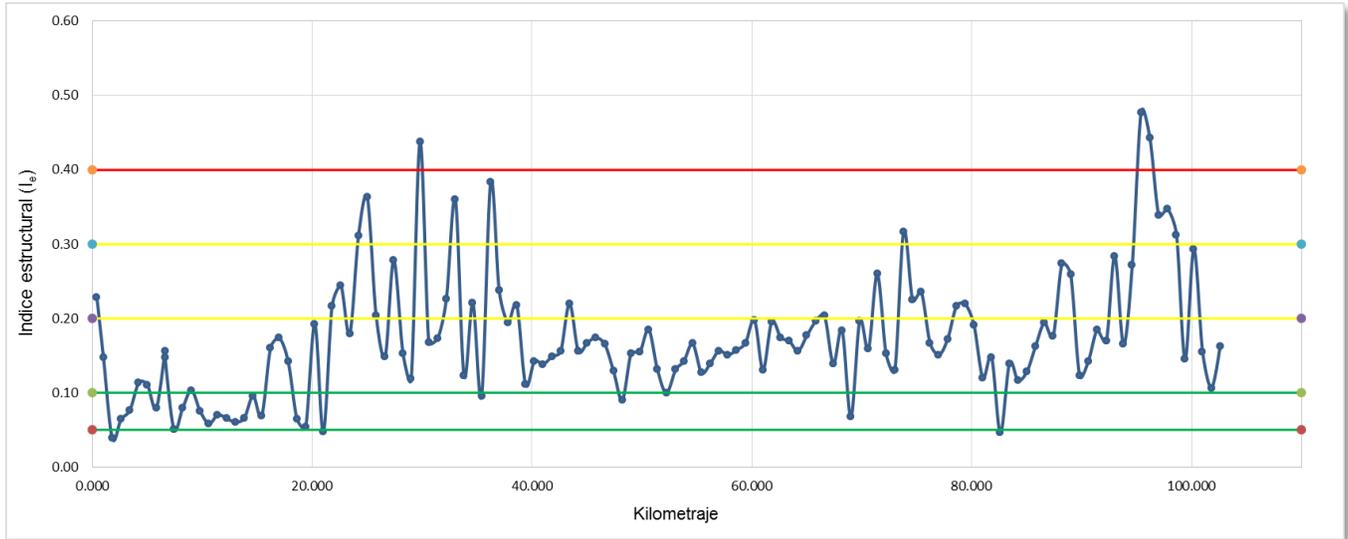


Figura 102.- Índice estructural para el proyecto 10 Cuerpo A.

2.10.1.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

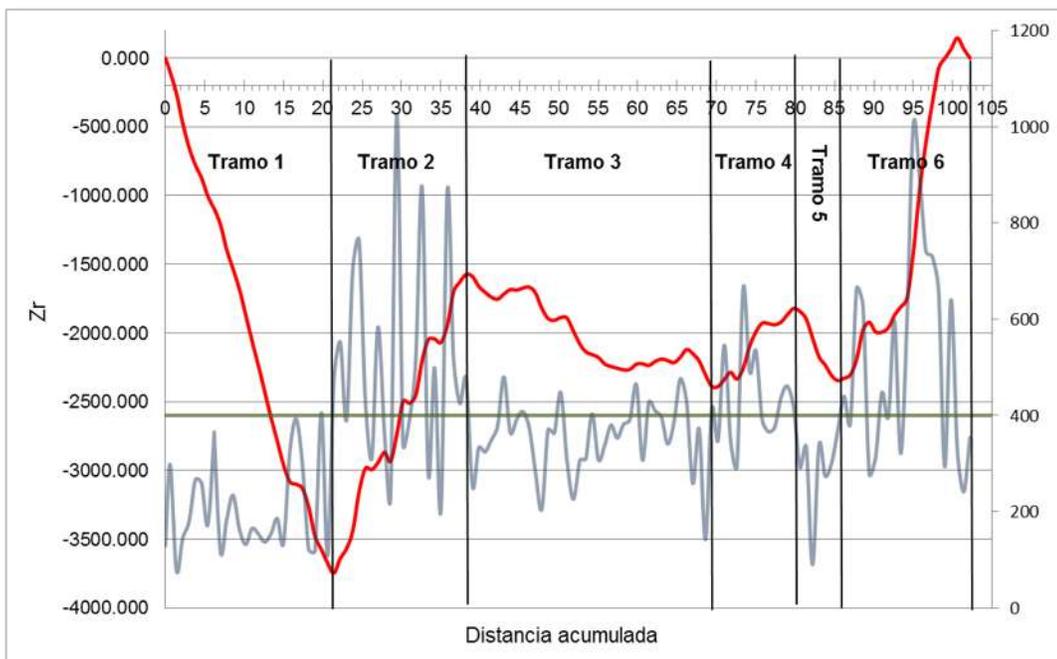


Figura 103.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 10 Cuerpo A.

2.10.2. Cuerpo B (102.400 km).

2.10.2.1. Ing. Manuel Zárate Aquino.

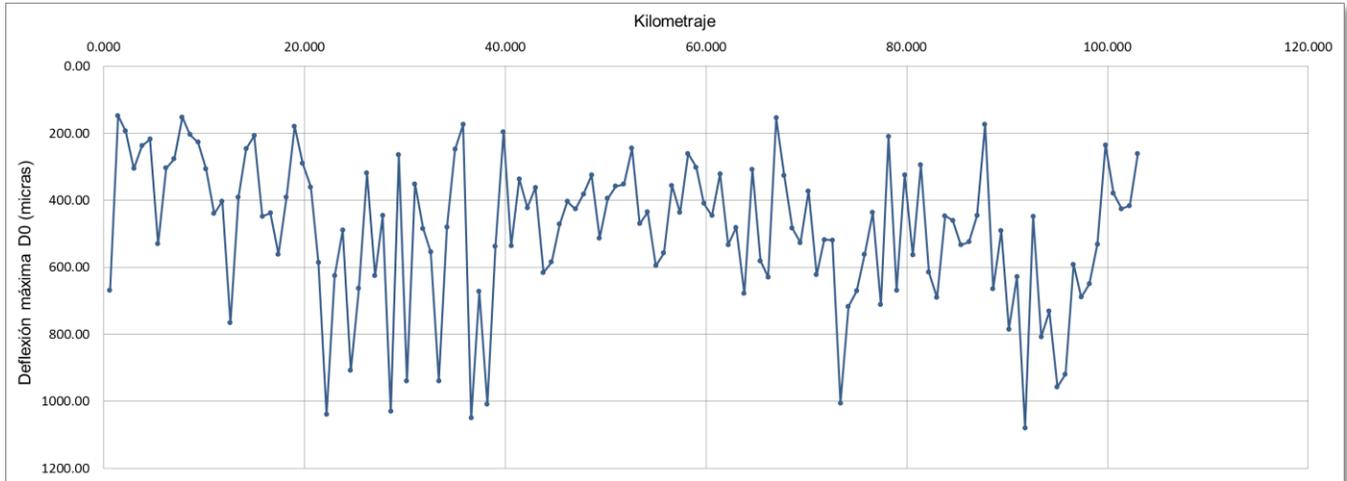


Figura 104.- Gráfico de Deflexión máxima para el proyecto 10 Cuerpo B.

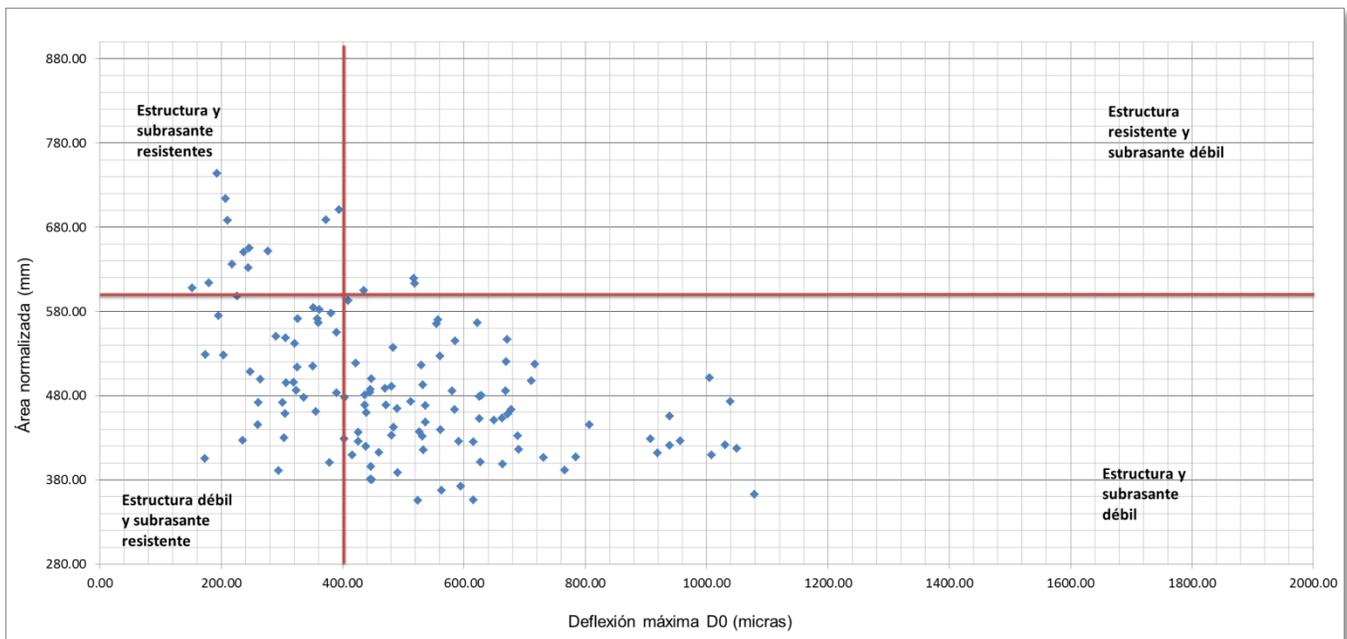


Figura 105.- Gráfico Deflexión máxima vs Área normalizada para el proyecto 10 Cuerpo B.

2.10.2.2. Dr. Raúl Vicente Orozco.

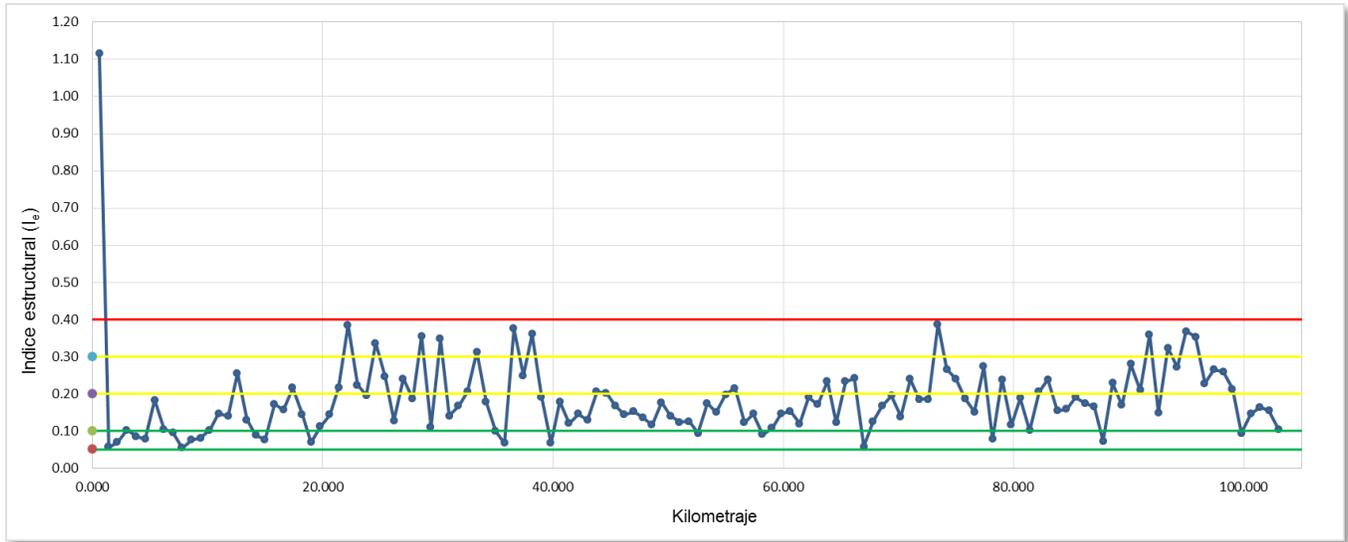


Figura 106.- Índice estructural para el proyecto 10 Cuerpo B.

2.10.2.3. Cálculo para delimitar zonas homogéneas.

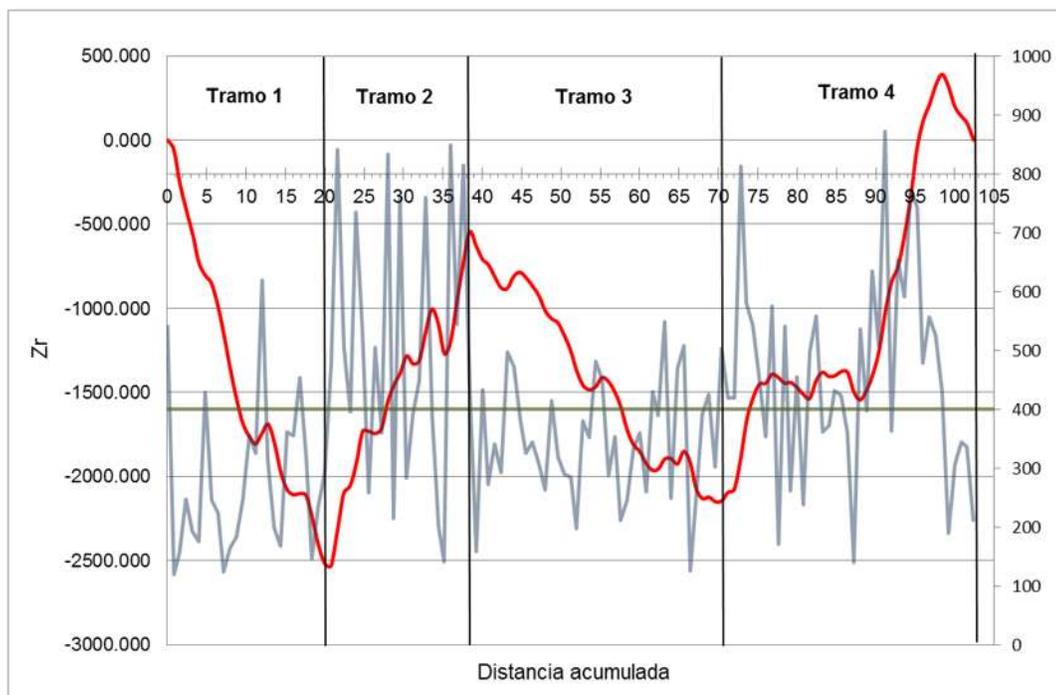


Figura 107.- Delimitación de tramos homogéneos por diferencias acumuladas (AASHTO, 93) para el proyecto 10 Cuerpo B.

Tabla 19.- Resultados de las metodologías para los cuerpos A y B del proyecto 10.

Proyecto 10			
Tramos Homogéneos		Ing. Manuel Zárate Aquino	Dr. Raúl Vicente Orozco
km inicial	km final		
Cuerpo A			
0+400	21+800	Estructura y subrasante débil	Tratamiento superficial
21+800	38+601		Reforzamiento con carpeta
38+601	70+602		Reforzamiento con carpeta
70+602	81+000		Reforzamiento con carpeta
81+000	85+800		Reforzamiento con carpeta
85+800	102+600		Reforzamiento con carpeta
Cuerpo B			
0+600	21+399	Estructura y subrasante débil	Tratamiento superficial
21+399	39+800		Reforzamiento con carpeta
39+800	71+000		Reforzamiento con carpeta
71+000	103+000		Reforzamiento con carpeta

3. ANÁLISIS DE LOS PROYECTOS SELECCIONADOS PARA SU EVALUACIÓN MEDIANTE RETROCÁLCULO.

En este apartado se analizarán dos tramos carreteros de los descritos en el Capítulo 9 empleando las diferentes metodologías empírico-mecanicistas para ejecutar el retrocálculo y obtener una estimación de la vida útil del pavimento y dar una respuesta de cómo se encuentra la estructura del pavimento y establecer las necesidades de rehabilitación.

El retrocálculo y la estimación de la vida útil del pavimento se llevará a cabo por el programa ELMOD6 que mediante las deflexiones que se obtuvieron por el deflectómetro de impacto obtiene los módulos elásticos que componen a la estructura del pavimento. Estos módulos nos darán una idea más clara de cómo se está comportando el pavimento ante la acción de una carga sobre la superficie. Para obtener los resultados de los módulos elásticos de cada capa de la estructura del pavimento mediante retrocálculo, es necesario ingresar módulos iniciales, para lo que existen varias fuentes que trabajan con valores diferentes. En este proyecto se propusieron valores iniciales sugeridos por Dynatest.

Una vez obtenidos los valores correspondientes de los módulos elásticos y complementando con la información del Capítulo 9 se propondrá la mejor solución para cada tramo carretero, ya sea un mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción para que trabaje de forma adecuada para soportar las cargas vehiculares.

De igual manera, el programa ELMOD6 nos determina el espesor de sobre carpeta necesaria.

El siguiente diagrama muestra los parámetros y metodologías necesarios para ejecutar el análisis de cada tramo en estudio, ver Figura 108.

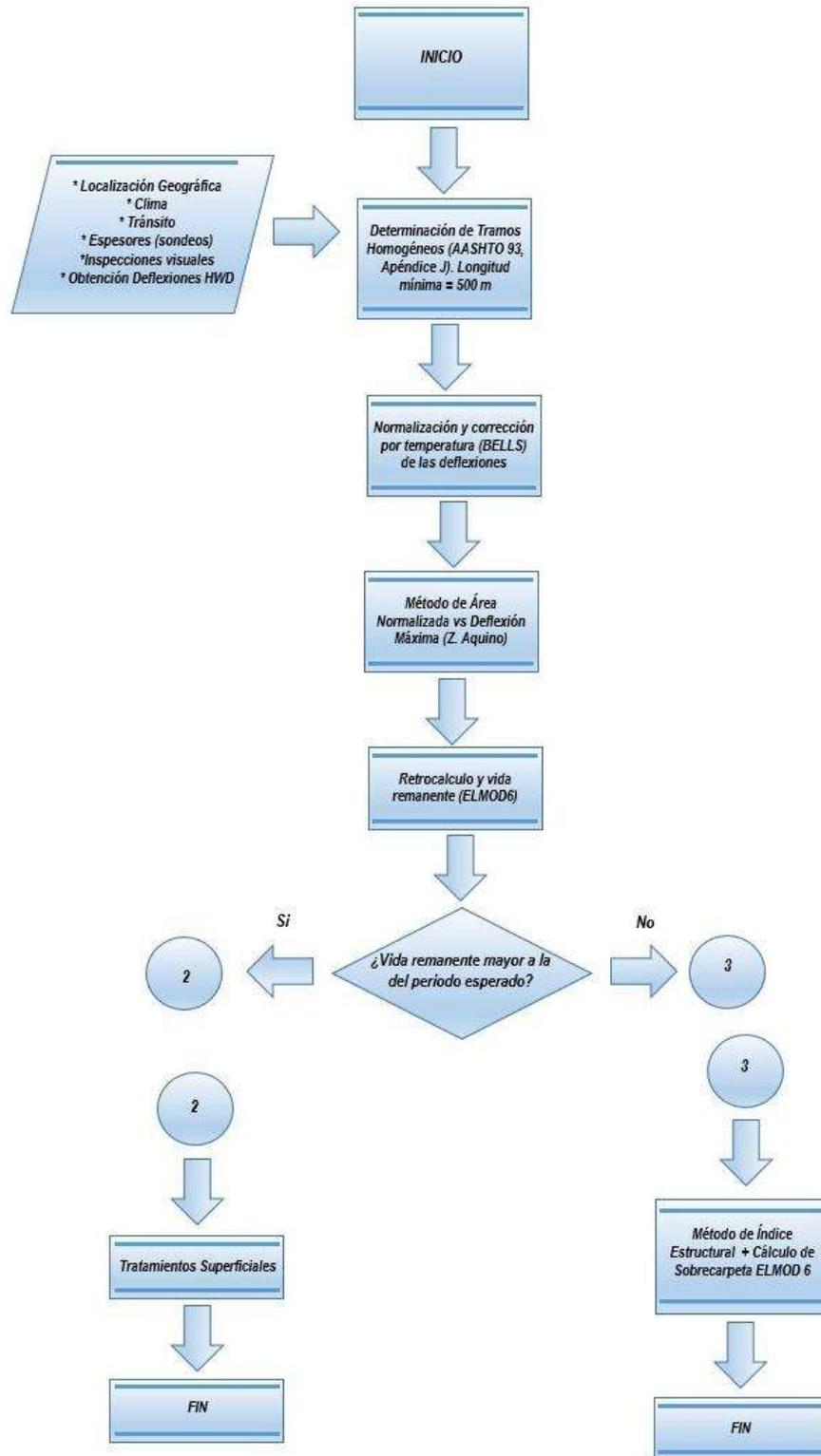


Figura 108.- Diagrama de flujo para realizar el análisis del tramo carretero.

Cómo primer paso, se necesita recaudar algunos parámetros importantes para la ejecución del análisis por medio del retrocálculo, como son los ESAL'S de proyecto, los espesores de las capas de la estructura y las deflexiones para cada tramo carretero. También es necesaria la localización geográfica, el clima y las inspecciones visuales para hacer un correcto reporte de todo el análisis del proyecto.

3.1. PROYECTO 9 (236.58 km).

Este tramo carretero cuenta con dos cuerpos A y B de los cuales en cada cuerpo existen dos tramos ya que entre cada uno de ellos existe pavimento rígido y sólo se llevará a cabo el análisis en los pavimentos flexibles, teniendo una longitud total de 236.58 kilómetros de pavimento flexible para poder realizar el diagnóstico.

3.1.1. Localización geográfica.



Figura 109. Localización geográfica.

3.1.2. Clima.

Tabla 20.- Climatología para el proyecto 9.

Mes	Temperatura promedio, °C	Precipitación promedio, mm
Enero	15.7	31.5
Febrero	16.0	82.5
Marzo	20.1	2.5
Abril	23.0	5.3
Mayo	24.5	4.1
Junio	23.1	85.1
Julio	21.2	173.2
Agosto	21.5	70.6
Septiembre	20.9	92.7
Octubre	18.8	0.3
Noviembre	17.5	0.0
Diciembre	14.8	0.0

3.1.3. Tránsito.

Los ESAL'S se calcularon mediante el TDPA obtenido de los datos viales de la SCT y con la ayuda del programa DISPAV5 para diez años de vida proyecto, ya que el programa ELMOD6 necesita estos valores por año para hacer la estimación de la vida remanente y obtener el espesor de sobre carpeta para la estructura del pavimento.

Tabla 21.- ESALS para los cuerpos A y B para el proyecto 9.

km inicial	km final	ESAL'S PARA 10 AÑOS		ESAL'S ANUALES	
		CUERPO A	CUERPO B	CUERPO A	CUERPO B
		ESAL'S, millones	ESAL'S, millones	ESAL'S, millones	ESAL'S, millones
27+900	46+800	103.9	104.9	10.39	10.49
46+800	61+900	87.2	94.3	8.72	9.43
61+900	87+000	76.3	78.2	7.63	7.82
87+000	124+740	74	68.3	7.4	6.83
124+740	155+800	74	68.3	7.4	6.83
155+800	176+500	111.7	111.6	11.17	11.16
176+500	185+000	111.7	111.6	11.17	11.16

3.1.4. Espesores (sondeos).

Este es un parámetro que se requiere para la obtención de los módulos elásticos, por lo tanto es necesario obtener una estructura base, ya que los valores de los espesores suelen variar a lo largo del tramo, por lo tanto los espesores que se obtuvieron son los que se presentan en la Figura 110 y cuenta con dicha estructura a lo largo de la carretera.

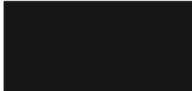
Tipo de capa	Espesor	Diagrama
Carpeta Asfáltica	32 cm	
Base Granular	22 cm	
Subbase	22 cm	
Subrasante	INDEF.	

Figura 110.- Estructura base a lo largo de la carretera.

3.1.5. Inspecciones visuales.

Las inspecciones visuales son de suma importancia para tener una idea de cómo se encuentra el pavimento y así determinar si dichos valores que se obtienen mediante el retrocálculo son los adecuados o se encuentran de una forma representando lo que se está viendo en las imágenes.



Figura 111.- Imágenes en sitio de los Cuerpos A y B del proyecto 9.

3.1.6. Obtención de deflexiones con el HWD.

Las deflexiones se obtuvieron a cada 400m mediante el deflectómetro de impacto HWD. Empezando para el Cuerpo A del kilómetro 28+206 al 87+000 para el primer tramo y en el segundo tramo del kilómetro 125+601 al 184+802. Para el Cuerpo B comienza en el kilómetro 28+206 al 86+608 para el primer tramo y para el segundo tramo del kilómetro 124+803 al 184+789. Con una distancia entre los geófonos de 0 - 20 - 30 - 45 - 60 - 90 - 120 cm.

3.1.7. Determinación de tramos homogéneos (AASHTO, 93. Apéndice J).

La determinación de los tramos homogéneos se realizó mediante la respuesta del pavimento en deflexiones, por lo tanto los resultados son los siguientes (Capítulo 1.10):

3.1.7.1. Cuerpo A y Cuerpo B

Tabla 22.- Tramos homogéneos del Cuerpo A y Cuerpo B para el proyecto 9.

Tramos Homogéneos	
km inicial	km final
Cuerpo A	
Primer tramo	
28+000	31+409
31+409	34+199
34+611	45+412
45+412	50+206
50+206	53+000
53+000	54+214
54+214	63+001
63+001	76+205
76+205	81+812
81+812	87+000
Segundo tramo	
125+601	133+203
133+203	150+401
150+401	184+802
Cuerpo B	
Primer Tramo	
28+206	63+400
63+400	86+608
Segundo tramo	
124+803	130+407
130+407	136+005
136+005	153+600
154+001	156+801
156+801	166+009
166+009	167+211
167+211	180+405
180+405	184+789

3.1.8. Normalización y corrección por temperatura (Bells) de las deflexiones.

En el Capítulo 1.6 se explicó cómo se realiza la normalización y corrección por temperatura de las deflexiones. En el programa ELMOD6 no es necesario que se lleve este análisis para poder obtener resultados ya que al momento de obtener las lecturas de las deflexiones, el equipo toma la temperatura del ambiente y de la

superficie del pavimento y el programa ejecuta por sí solo las correcciones correspondientes utilizando el criterio de la ecuación de Bells.

En este caso se tomó en cuenta la corrección por temperatura a 25 °C.

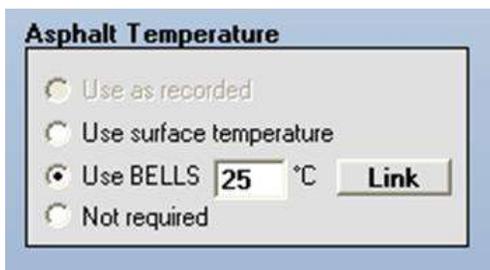


Figura 112.- Captura de pantalla del programa ELMOD6.

3.1.9. Método de área normalizada vs deflexión máxima (Ing. Manuel Zárate Aquino).

3.1.9.1. Cuerpo A.

Tabla 23.- Metodología del Ing. Manuel Zárate Aquino del Cuerpo A para el proyecto 9.

Tramos Homogéneos		Ing. Manuel Zárate Aquino
km inicial	km final	
Cuerpo A		
Primer tramo		
28+000	31+409	Estructura y subrasante resistentes
31+409	34+199	
34+611	45+412	
45+412	50+206	
50+206	53+000	
53+000	54+214	
54+214	63+001	
63+001	76+205	
76+205	81+812	
81+812	87+000	
Segundo tramo		
125+601	133+203	Estructura y subrasante resistentes
133+203	150+401	
150+401	184+802	

3.1.9.2. Cuerpo B.

Tabla 24.- Metodología del Ing. Manuel Zárate Aquino del Cuerpo B proyecto 9.

Tramos Homogéneos		Ing. Manuel Zárate Aquino
km inicial	km final	
Cuerpo B		
Primer Tramo		
28+206	63+400	Estructura y subrasante resistentes
63+400	86+608	
Segundo tramo		
124+803	130+407	Estructura y subrasante resistentes
130+407	136+005	
136+005	153+600	
154+001	156+801	
156+801	166+009	
166+009	167+211	
167+211	180+405	
180+405	184+789	

3.1.10. Retrocálculo y vida remanente (ELMOD6).

Para poder realizar el retrocálculo se necesita de los espesores de la estructura del pavimento y los módulos de referencia o módulos iniciales para la determinación de los módulos elásticos finales. Para el proyecto 9 los valores iniciales del módulo elástico son los siguientes:

Layer	Thickness (mm)	Seed Modulus (MPa)	Material
1	320	3000	AC_A1
2	220	300	Granular
3	220	300	Granular
4		50	Subgrade
5			

Figura 113. Módulos elásticos de referencia en el programa ELMOD6.

Cabe resaltar, que para un solo tramo pueden existir varios módulos elásticos retrocalculados, ya que existe un rango demasiado alto en los módulos de referencia como se puede observar en la Tabla 25 propuesta por Dynatest, por lo tanto, si la

variación es alta, se deben proponer otros módulos de referencia para que la variación baje, y los módulos elásticos finales sean los correctos (ver Figura 114).

Tabla 25.- Valores de módulos de referencia propuestos por Dynatest.

Material	Valores			
	Mínimo, Mpa	Máximo, Mpa	Mínimo, kg	Máximo, kg
Carpeta Asfáltica	2758	6895	28123	70307
Concreto Hidráulico	20684	41369	210921	421842
Base Hidráulica	103	1034	1055	10546
Base estabilizada con cemento	10342	17237	105460	175767
Sub-base Hidráulica	103	1034	1055	10546
Subrasante	34	345	352	3515

Layer	N	Mean	Std.
E1 *	8	3726	1.983
E2 *	8	484	1.872
E3 *	8	142	1.696
E4 *	8	41	1.449

Figura 114. Variación en el programa ELMOD6.

Una vez que se tienen los valores en el programa y los tramos homogéneos propuestos anteriormente, se procede a hacer el retrocálculo y obtener los módulos elásticos, de los cuales los resultados son los siguientes:

Tabla 26. Módulos elásticos para los cuerpos A y B

Tramos Homogéneos		Módulos de Elasticidad, MPa			
km inicial	km final	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4
Cuerpo A					
Primer tramo					
28+000	31+409	2805	516	429	77
31+409	34+199	3726	484	142	41
34+611	45+412	3683	1120	1023	135
45+412	50+206	1497	197	208	85
50+206	53+000	3896	751	647	113
53+000	54+214	1901	261	261	63
54+214	63+001	4914	676	591	109
63+001	76+205	1950	176	180	78
76+205	81+812	3517	436	435	110
81+812	87+000	2112	249	262	76
Segundo tramo					
125+601	133+203	3764	1275	768	143
133+203	150+401	4794	334	261	64
150+401	184+802	6539	1328	718	141
Cuerpo B					
Primer tramo					
28+206	35+004	2404	602	592	106
35+007	63+400	2457	589	584	104
63+400	86+608	1008	95	105	56
Segundo tramo					
124+803	130+407	4344	2150	1371	172
130+407	136+005	4448	1642	1077	165
136+005	153+600	7817	3691	1641	209
154+001	156+801	3313	2718	1012	189
156+801	166+009	4557	5336	2504	236
166+009	167+211	3146	2787	1500	160
167+211	180+405	6940	2856	1723	211
180+405	184+789	9045	2085	1005	166

Después de la obtención de los módulos elásticos se procede a calcular la vida remanente para cada tramo carretero (ver Anexo 2), obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 27. Vida remanente para los cuerpos A y B.

Tramos Homogéneos		Módulos de Elasticidad, MPa				Vida remanente promedio, años
km inicial	km final	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	
Cuerpo A						
Primer tramo						
28+000	31+409	2805	516	429	77	12
31+409	34+199	3726	484	142	41	13
34+611	45+412	3683	1120	1023	135	179
45+412	50+206	1497	197	208	85	14
50+206	53+000	3896	751	647	113	67
53+000	54+214	1901	261	261	63	21
54+214	63+001	4914	676	591	109	66
63+001	76+205	1950	176	180	78	11
76+205	81+812	3517	436	435	110	37
81+812	87+000	2112	249	262	76	9
Segundo tramo						
125+601	133+203	3764	1275	768	143	7
133+203	150+401	4794	334	261	64	0.7
150+401	184+802	6539	1328	718	141	26
Cuerpo B						
Primer tramo						
28+206	35+004	2404	602	592	106	463
35+007	63+400	2457	589	584	104	377
63+400	86+608	1008	95	105	56	2
Segundo tramo						
124+803	130+407	4344	2150	1371	172	60
130+407	136+005	4448	1642	1077	165	93
136+005	153+600	7817	3691	1641	209	152
154+001	156+801	3313	2718	1012	189	36
156+801	166+009	4557	5336	2504	236	159
166+009	167+211	3146	2787	1500	160	85
167+211	180+405	6940	2856	1723	211	45
180+405	184+789	9045	2085	1005	166	198

El cálculo de los espesores para la sobre carpeta sólo se llevará a cabo en los tramos en donde su vida remanente sea menor a diez, ya que el proyecto se hizo con una estimación de diez años de vida útil. Así mismo, los tramos son los siguientes:

Tabla 28. Vida remanente y espesores en los tramos con vida remanente menor a diez.

Tramos Homogéneos		Módulos de Elasticidad, MPa				Vida remanente promedio, años	Espesor, ELMOD6, mm
km inicial	km final	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4		
Cuerpo A							
Primer tramo							
81+812	87+000	2112	249	262	76	9	172
Segundo tramo							
125+601	133+203	3764	1275	768	143	7	132
133+203	150+401	4794	334	261	64	0.7	421
Cuerpo B							
Primer tramo							
63+400	86+608	1008	95	105	56	2	487

Una vez que se obtuvieron los espesores se procede a analizar mediante la metodología del Dr. Raúl Vicente Orozco para establecer qué tipo de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción es necesaria para cada uno de los tramos que se presentan en la Tabla 28.

3.1.11. Metodología del Dr. Raúl Vicente Orozco.

3.1.11.1. Cuerpo A (Primer tramo, km 81+812 al 87+000).

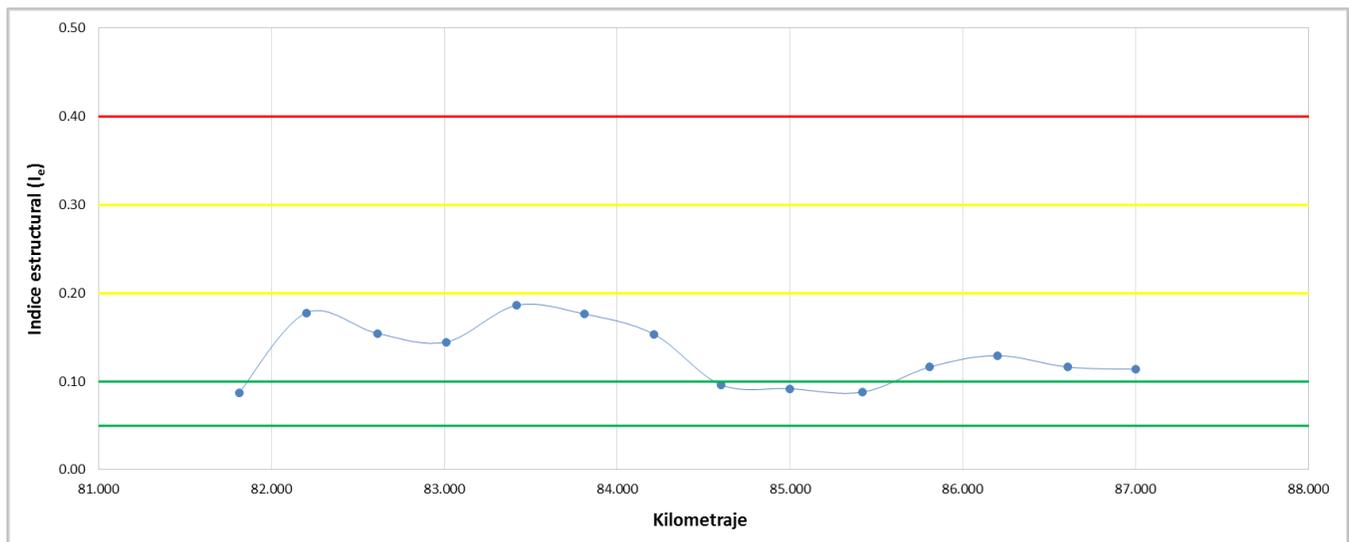


Figura 115.- Cuerpo A (Primer tramo, km 81+812 al 87+000).

Se puede observar que la tendencia del índice estructural está entre 0.10 y 0.20 (ver *Figura 115*) siendo su calificación buena–regular y por lo tanto necesita un reforzamiento de carpeta.

3.1.11.2. Cuerpo A (Segundo tramo, km 125+601 al 133+203 y km 133+203 al 150+401).

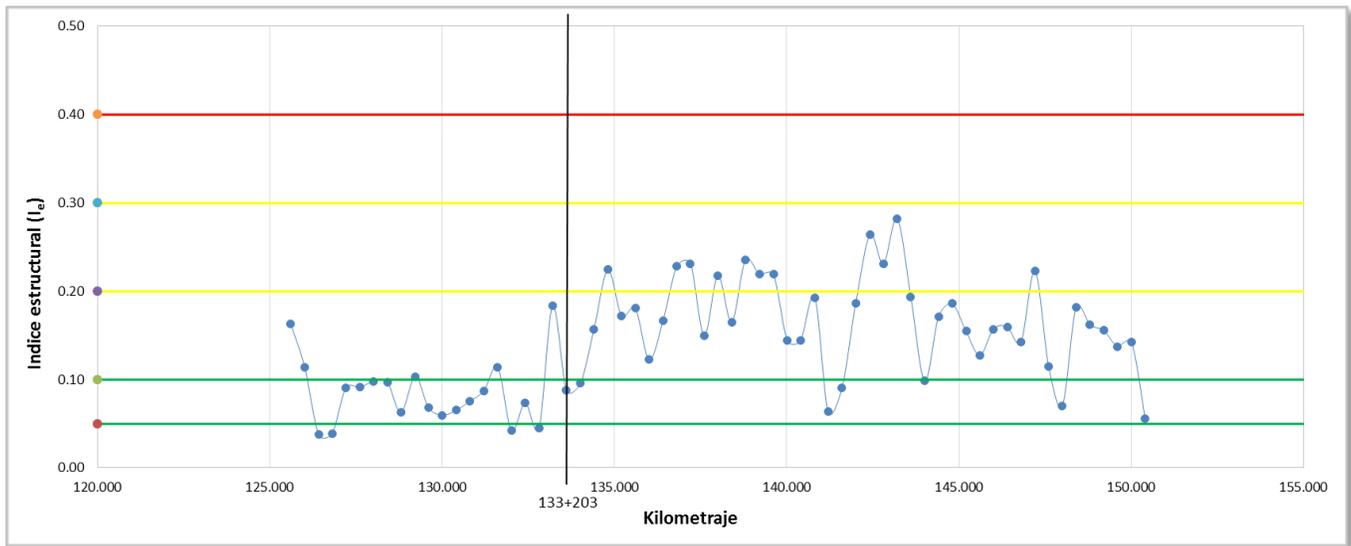


Figura 116.- Cuerpo A (Segundo tramo, km 125+601 al 133+203 y km 133+203 al 150+401).

En la Figura 116 se observa que en el tramo del km 125+501 al 133+203 el valor del índice estructural varía de 0.05 a 0.10 por lo cual, su calificación es excelente–muy buena y requiere de un tratamiento superficial. Para el tramo del km 133+203 al 150+401 su índice estructural varía del 0.10 al 0.20, por lo tanto, su calificación es buena-regular y requiere de un reforzamiento por carpeta.

3.1.11.3. Cuerpo B (Segundo tramo, km 63+400 al km 86+608).

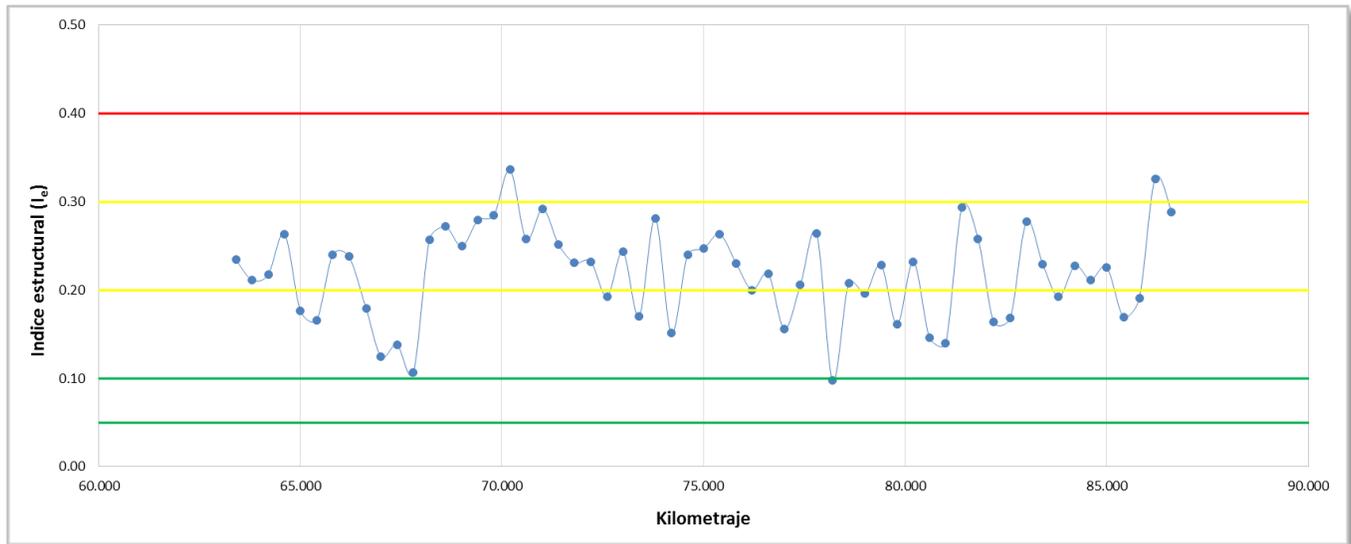


Figura 117.- Cuerpo B (Segundo tramo, km 63+400 al km 86+608).

Para el tramo del km 63+400 al km 86+608 en el cuerpo B su índice estructural varía de 0.10 al 0.30 en donde su calificación es buena–regular y requiere de un reforzamiento por carpeta.

Una vez analizado por la metodología del Dr. Raúl Vicente Orozco, los resultados son los siguientes:

Tabla 29.- Resultados finales para el mantenimiento del tramo carretero.

Tramos Homogéneos		Módulos de Elasticidad, MPa				Vida remanente promedio, años	Espesor promedio, mm	Dr. Raúl Vicente Orozco
km inicial	km final	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4			
Cuerpo A								
Primer tramo								
81+812	87+000	2112	249	262	76	9	172	Reforzamiento con carpeta
Segundo tramo								
125+601	133+203	3764	1275	768	143	7	132	Tratamiento superficial
133+203	150+401	4794	334	261	64	0.7	421	Reforzamiento con carpeta
Cuerpo B								
Primer tramo								
63+400	86+608	1008	95	105	56	2	487	Reforzamiento con carpeta

De acuerdo a los resultados en la Tabla 29 estas son las actividades que se deben llevar a cabo para que la estructura del pavimento se encuentre trabajando de una manera eficaz en los tramos que más están deteriorados y no cumplen con los años de proyecto que se proponen. Sin embargo, también se debe realizar un tratamiento superficial a todo el tramo carretero para la conservación del pavimento (superficie de rodamiento) o por si se encuentran algunas grietas que no se hayan visto a simple vista para que no presente algún daño mayor a lo largo de su vida útil, para que todo se conserve en buen estado para el paso continuo de las cargas vehiculares.

Así mismo, se puede observar en los resultados de los espesores que pueden variar entre cada uno. Por ejemplo, del kilómetro 81+812 al 87+000 tiene una vida remanente de nueve años y el espesor requerido es mayor que del kilómetro 125+601 al 133+203 en donde su vida remanente es de siete años. Esto puede ocurrir debido a la configuración de los módulos elásticos que se obtuvieron en la capa 2 en donde decae su valor.

Pueden existir muchas variables del porqué pueden decaer los valores de los módulos, de los cuales podrían ser una mala construcción en campo, la temperatura en la capa asfáltica o la presencia de humedad en capas inferiores.

3.2. PROYECTO 10 (204.600 km).

Este tramo cuenta con dos cuerpos A y B teniendo una longitud total de 236.58 km entre los dos cuerpos de pavimento flexible para llevar el análisis correspondiente, con una configuración de corona de 12 m de ancho con acotamientos de 2 m

3.2.1. Localización geográfica.



Figura 118.- Localización geográfica para el proyecto 10.

3.2.2. Clima.

Tabla 30.- Climatología para el proyecto 10.

Mes	Temperatura promedio, °C	Precipitación promedio, mm
Enero	14.29	20.1
Febrero	15.62	15.92
Marzo	19.02	15.26
Abril	22.11	34.48
Mayo	23.71	80.11
Junio	23.88	106.45
Julio	22.55	117.26
Agosto	22.7	98.76
Septiembre	22.02	114.84
Octubre	20.08	52.85
Noviembre	17.26	18.07
Diciembre	14.72	14.58

3.2.3. Tránsito.

Tabla 31.- ESALS para los cuerpos A y B para el proyecto 10.

km inicial	km final	ESAL'S PARA 20 AÑOS		ESAL'S ANUALES	
		Cuerpo A	Cuerpo B	Cuerpo A	Cuerpo B
		ESAL'S (millones)		ESAL'S (millones)	
0+400	103+000	30		1.5	

3.2.4. Espesores (sondeos).

Este proyecto cuenta con una capa de base con asfalto espumado, una de las tecnologías que se está utilizando recientemente para reciclar una parte de las capas que se extrae mediante el uso de asfalto, agua, aire y agregado, y obtener una especie de espuma para lograr el acabado deseado.



Figura 119.- Estructura base para el proyecto 10.

3.2.5. Inspecciones visuales.



Figura 120.-Inspecciones visuales tomadas en campo del Cuerpo A y B para el proyecto 10.

3.2.6. Obtención de deflexiones con el HWD.

Se obtuvieron las deflexiones a cada 800 m mediante el deflectómetro de impacto HWD. Empezando con el Cuerpo A del kilómetro 0+400 al 102+600 y para el Cuerpo B comienza del kilómetro 0+600 al 103+000.

3.2.7. Determinación de tramos homogéneos (AASHTO, 93. Apéndice J).

Al igual que en el proyecto 9, la determinación de los tramos homogéneos se hizo mediante la respuesta del pavimento en deflexiones y los resultados son los siguientes:

3.2.7.1. Cuerpo A y B.

Tabla 32.- Tramos homogéneos del Cuerpo A y B para el proyecto 10.

Tramos Homogéneos	
km inicial	km final
Cuerpo A	
0+400	21+800
21+800	38+601
38+601	70+602
70+602	81+000
81+000	85+800
85+800	102+600
Cuerpo B	
0+600	21+399
21+399	39+800
39+800	71+000
71+000	103+000

3.2.8. Normalización y corrección por temperatura (Bells) de las deflexiones.

En este caso se tomó en cuenta la corrección por temperatura a 25°C, al igual que en el proyecto 9.

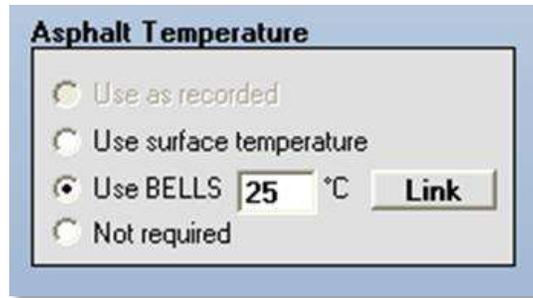


Figura 121.- Captura de pantalla del programa ELMOD6.

3.2.9. Método de área normalizada vs deflexión máxima (Ing. Manuel Zárate Aquino).

3.2.9.1. Cuerpo A y B.

Tabla 33.- Metodología del Ing. Manuel Zárate Aquino para el proyecto 10.

Tramos Homogéneos		Ing. Manuel Zárate Aquino
km inicial	km final	
Cuerpo A		
0+400	21+800	Estructura y subrasante débil
21+800	38+601	
38+601	70+602	
70+602	81+000	
81+000	85+800	
85+800	102+600	
Cuerpo B		
0+600	21+399	Estructura y subrasante débil
21+399	39+800	
39+800	71+000	
71+000	103+000	

3.2.10. Retrocálculo y vida remanente (ELMOD6).

Los espesores y los valores iniciales de módulo elástico para el proyecto 10 son los siguientes:

Layer	Thickness (mm)	Seed Modulus (MPa)	Material
1	60	3000	AC_Ai
2	120	3000	AC_Ai
3	480	300	Granular
4		50	Subgrade
5			

Figura 122.- Módulos de referencia en el programa ELMOD6 para el proyecto 10.

Una vez que se tengan los datos de los módulos iniciales, los espesores de la estructura y la corrección por temperatura, se da comienzo al cálculo de los módulos elásticos.

Tabla 34. Módulos elásticos para el proyecto 10.

Tramos Homogéneos		Módulos de Elasticidad, MPa			
km inicial	km final	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4
Cuerpo A					
0+400	21+800	1148	2324	585	154
21+800	38+601	696	1372	163	92
38+601	70+602	754	1767	215	98
70+602	81+000	776	2017	176	65
81+000	85+800	943	2620	313	105
85+800	102+600	604	1551	162	71
Cuerpo B					
0+600	21+399	779	1777	408	140
21+399	39+800	616	1650	192	68
39+800	71+000	791	1809	242	104
71+000	103+000	744	1723	179	70

Teniendo los módulos elásticos y los ESAL'S de proyecto, se procede al cálculo de la estimación de la vida remanente para cada tramo.

Tabla 35.- Vida remanente para los cuerpos A y B.

Tramos Homogéneos		Módulos de Elasticidad, MPa				Vida remanente, año
km inicial	km final	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	
Cuerpo A						
0+400	21+800	1148	2324	585	154	27
21+800	38+601	696	1372	163	92	1
38+601	70+602	754	1767	215	98	1

70+602	81+000	776	2017	176	65	0
81+000	85+800	943	2620	313	105	110
85+800	102+600	604	1551	162	71	0
Cuerpo B						
0+600	21+399	779	1777	408	140	11
21+399	39+800	616	1650	192	68	3
39+800	71+000	791	1809	242	104	3
71+000	103+000	744	1723	179	70	0

Los tramos en donde su vida remanente sea menor a veinte años (vida proyecto) se obtendrá su espesor, y los resultados son los siguientes:

Tabla 36.- Espesores para los tramos homogéneos menores a veinte años.

Tramos Homogéneos		Módulos de Elasticidad, MPa				Vida remanente, año	Espesor, ELMOD 6, mm
km inicial	km final	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4		
Cuerpo A							
21+800	38+601	696	1372	163	92	1	297
38+601	70+602	754	1767	215	98	1	222
70+602	81+000	776	2017	176	65	0	258
85+800	102+600	604	1551	162	71	0	282
Cuerpo B							
0+600	21+399	779	1777	408	140	11	141
21+399	39+800	616	1650	192	68	3	276
39+800	71+000	791	1809	242	104	3	205
71+000	103+000	744	1723	179	70	0	318

Ya terminado el análisis mediante el programa ELMOD6 y después de obtener los datos que requerimos, se analiza cada tramo por la metodología del Dr. Raúl Vicente Orozco para saber qué tipo de rehabilitación es necesaria en los tramos con vida remanente menor a la establecida en el proyecto.

3.2.11. Metodología del Dr. Raúl Vicente Orozco.

3.2.11.1. Cuerpo A (km 21+800 al 81+000).

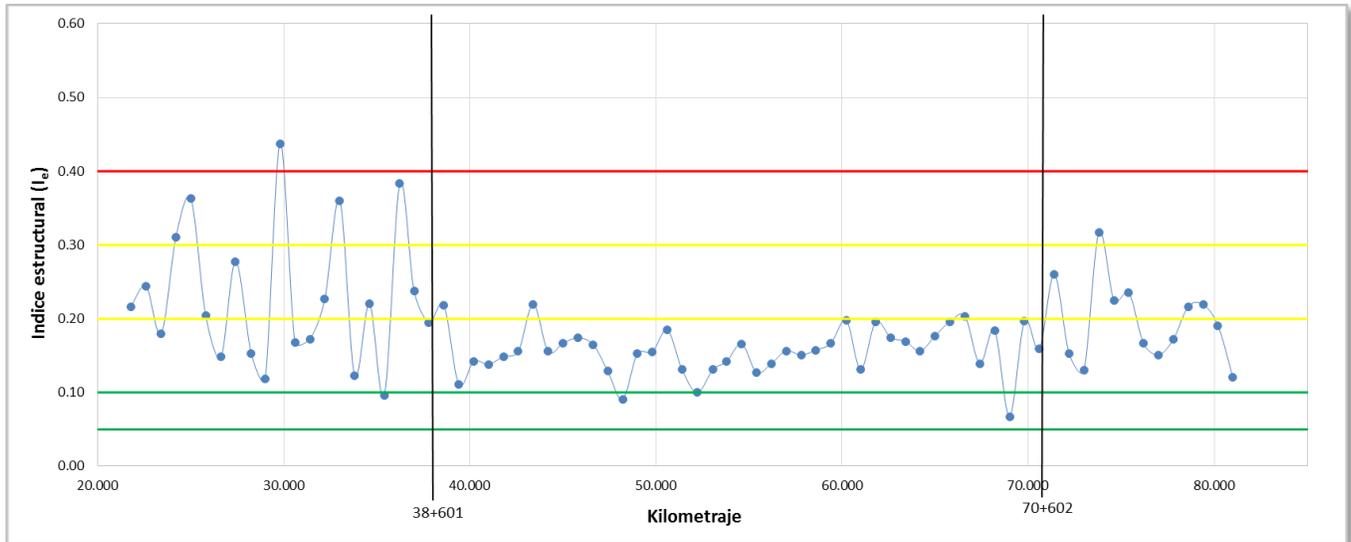


Figura 123.- Cuerpo A (Km 21+800 al 81+000).

En el tramo del km 21+800 al 38+601 varía el índice estructural entre los valores 0.10 a 0.30 por lo tanto, su calificación es buena–regular y se requiere un reforzamiento por carpeta. Del km 38+601 al 70+602 su índice estructural está en los valores de 0.10 a 0.20 con una calificación buena–regular y requiere de un reforzamiento por carpeta. Por último, para el tramo del km 70+602 al 81+000 su índice estructural está por los valores de 0.10 al 0.30 con una calificación buena–regular y de igual manera requiere de un reforzamiento por carpeta.

3.2.11.2. Cuerpo A (km 85+800 al 102+600).

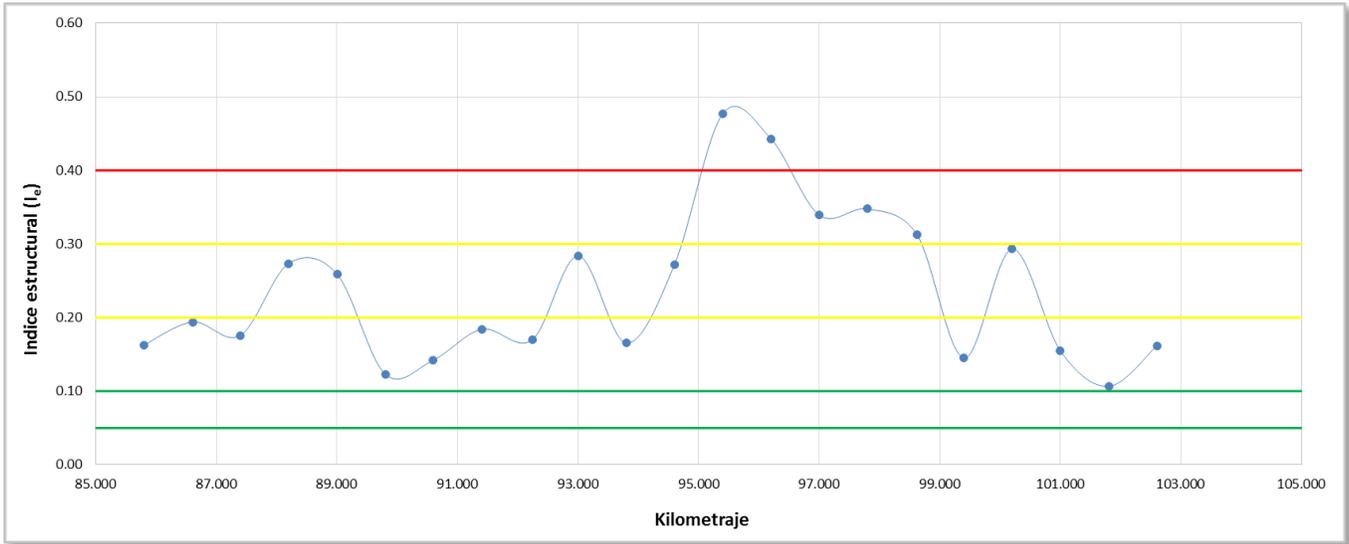


Figura 124.- Cuerpo A (Km 85+800 al102+600).

Para el tramo del km 85+000 al 102+600 su índice estructural varía de 0.10 a 0.30 siendo su calificación buena–regular y requiere de un reforzamiento por carpeta.

3.2.11.3. Cuerpo B (km 0+600 al 103+000).

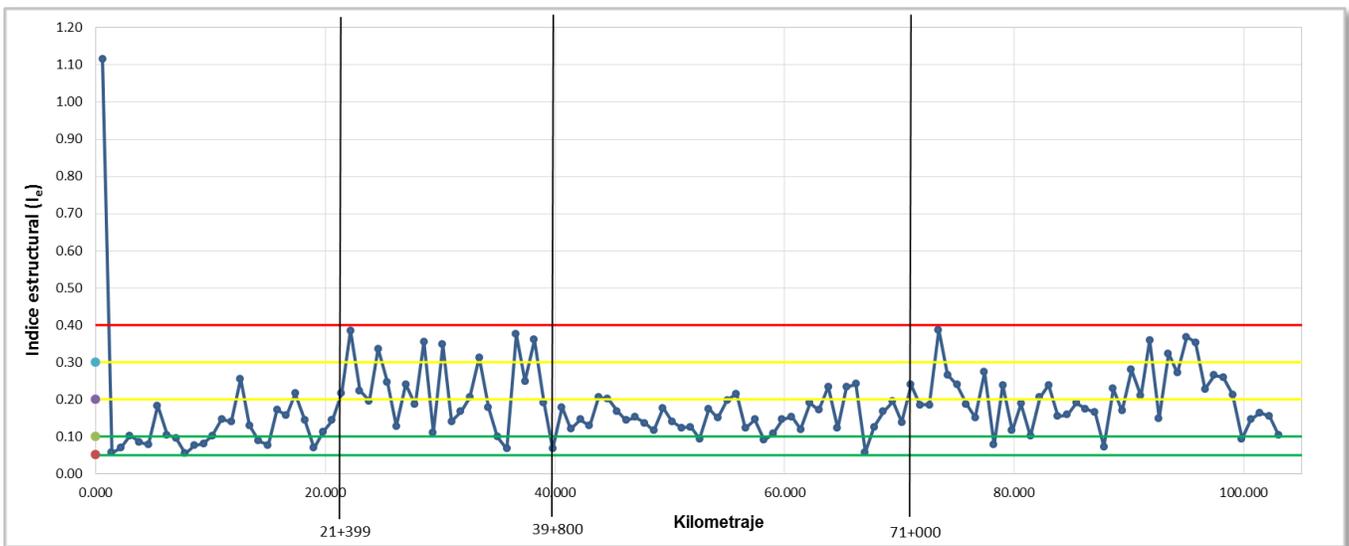


Figura 125.- Cuerpo B (Km 0+600 al 103+000).

Para el cuerpo B la totalidad de los tramos nos dio una vida remanente menor a veinte años y se puede observar que la variación del índice estructural está entre los valores de 0.10 al 0.30 por lo tanto su calificación sería buena–regular y se requiere de un reforzamiento por carpeta.

Tabla 37.- Resultados finales para el mantenimiento del tramo carretero.

Tramos Homogéneos		Módulos de Elasticidad, MPa				Vida remanente promedio, años	Espesor promedio, mm	Dr. Raúl Vicente Orozco
km inicial	km final	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4			
Cuerpo A								
21+800	38+601	696	1372	163	92	1	297	Reforzamiento con carpeta
38+601	70+602	754	1767	215	98	1	222	Reforzamiento con carpeta
70+602	81+000	776	2017	176	65	0	258	Reforzamiento con carpeta
85+800	102+600	604	1551	162	71	0	282	Reforzamiento con carpeta
Cuerpo B								
0+600	21+399	779	1777	408	140	11	141	Reforzamiento con carpeta
21+399	39+800	616	1650	192	68	3	276	Reforzamiento con carpeta
39+800	71+000	791	1809	242	104	3	205	Reforzamiento con carpeta
71+000	103+000	744	1723	179	70	0	318	Reforzamiento con carpeta

Al igual que en el proyecto anterior, en la Tabla 37 se muestran las actividades que se deben llevar a cabo en el tramo carretero que se está analizando. Y también se recomienda un tratamiento superficial para los demás tramos para su conservación.

A comparación del proyecto anterior, en este caso se puede observar en la configuración de los módulos elásticos que definitivamente sí es la carpeta asfáltica la que falla, y los valores que se obtuvieron de las metodologías concuerda con el tipo de rehabilitación que se requiere, ya que como se sabe, una carpeta asfáltica da módulos de 1500 a 3500 MPa, por lo tanto se encuentran muy bajos, a comparación con la base espumada que se comporta de buena manera.

Una vez finalizado el análisis, para los dos proyectos, con las diferentes metodologías para cada tramo y una vez definido lo que se debería aplicar en campo para que cada tramo trabaje de una manera eficaz ante las cargas vehiculares que transitan día a día mediante ella, es necesario mencionar que en el ámbito laboral las empresas optan por no llevar a cabo las rehabilitaciones que obtuvimos como resultado o no proponen los espesores que el programa nos arroja, ya que esto depende mucho del recurso económico, por lo tanto, esto sólo les da

una idea de cómo se encuentra y mediante esto la dependencia ejecuta un “mantenimiento de la carretera”. En donde, la mayoría de las veces, ejecutan un “sobrecarpeteo” de 5cm, o en su caso, un fresado de 5cm más un “sobrecarpeteo” de 10cm, y se vuelve a ejecutar un análisis más sencillo mediante el programa DISPAV5 con la configuración de la nueva estructura y los ESAL’S de proyecto y se ve si cumple con dicha propuesta de rehabilitación, y si esta cumple, se ejecuta.

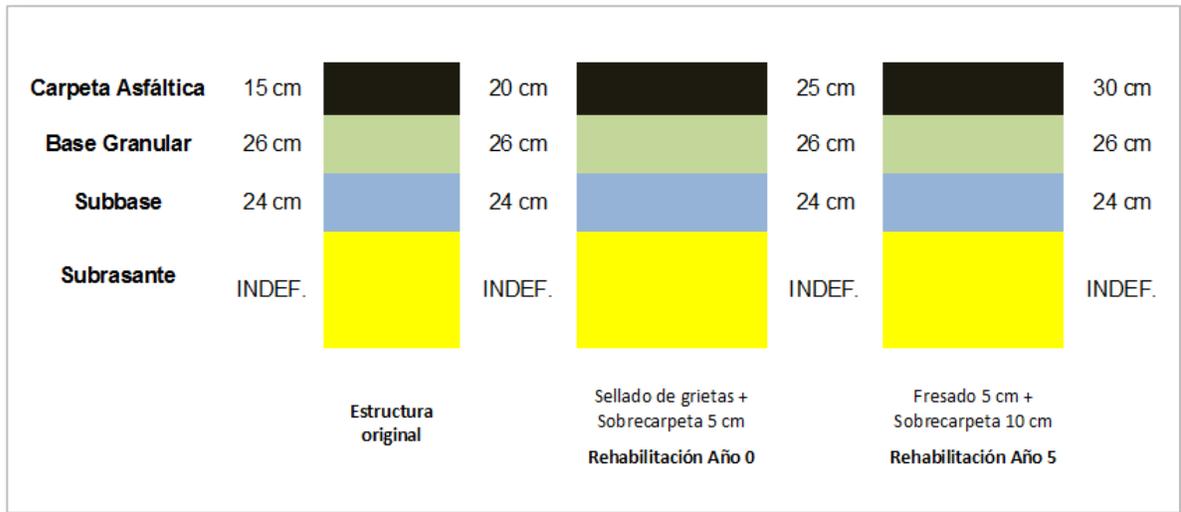


Figura 126.- Representación gráfica de las rehabilitaciones, para vida de proyecto de 10 años.

Por ejemplo, en el proyecto 9 su vida proyecto es a diez años, y en el tramo del kilómetro 81+812 al 87+000 requiere de 17 cm de reforzamiento de carpeta, pero si se sigue el procedimiento que se observa en la Figura 126 a los 10 años de hacer una constante rehabilitación cada 5 años al final de los diez años de la vida de proyecto se sumarían 15 cm de sobre carpeta y se aproximaría a lo que requiere para que se encuentre en buen estado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- **Conclusiones**

Este trabajo se desarrolló con la finalidad de obtener, mediante el equipo de deflectometría HWD, una respuesta del pavimento en deflexiones o cuenco de deflexiones, que con la ayuda de las metodologías empírico-mecanicistas nos permiten obtener parámetros que nos dan una respuesta global de cómo se encuentra la estructura del pavimento, y así mismo, saber qué tipo de trabajos, ya sea un mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción en la carretera se debe llevar a cabo para que resista las cargas vehiculares a las que se encontrará expuesto.

El análisis de las deflexiones que se obtienen mediante el deflectómetro de impacto son necesarias para el análisis mediante las metodologías empíricas con las respectivas correcciones de temperatura y por carga, dichas correcciones se pueden llevar a cabo mediante el programa ELMOD6 y ser exportadas para la realización del análisis por cada una de las metodologías. Cabe resaltar, que dichas deflexiones medidas pueden variar por varios factores, como son: la temperatura en las capas asfálticas, el proceso de construcción, los materiales y existencia de humedad en las capas granulares.

El retrocálculo o cálculo inverso es un proceso en donde se determinan los módulos elásticos de las diferentes capas existentes en la estructura del pavimento para saber una respuesta física de cómo se comportan los materiales que la constituyen. Debido a que las combinaciones de los módulos de referencia o iniciales existentes son demasiados, pueden existir varios módulos elásticos retrocalculados para una sola estructura del pavimento. Por lo tanto, es de suma importancia encontrar la mínima variación entre cada uno de las iteraciones que se lleven a cabo en el programa ELMOD6.

La estimación de la vida remanente y los espesores requeridos se realizan una vez que se hayan fijado los módulos iniciales para cada uno de los tramos, y así conocer si las estructuras cumplen con los años de proyecto establecidos y si no es

así, determinar los espesores requeridos. Dichos valores pueden llegar a ser muy grandes, por lo tanto, el valor que corresponde se puede llegar a efectuar a lo largo de las rehabilitaciones que corresponden a los años de proyecto que se definen en cada caso.

Los tramos homogéneos deben delimitarse para poder entender el comportamiento de la estructura mediante los diferentes parámetros que se pueden obtener del pavimento, y así mismo, aplicar las metodologías correspondientes para cada uno de los tramos.

Los proyectos que se analizaron por las metodologías empíricas, se encuentran en un estado crítico, requiriendo rehabilitaciones a lo largo de toda su longitud. Por lo tanto, es necesario un análisis mecanicista para determinar si dichos valores son similares, ya que las metodologías empíricas sólo definen el estado del pavimento mediante un parámetro (deflexiones) y en las metodologías mecanicistas se utilizan más parámetros (temperatura, espesores, carga aplicada, módulos iniciales, tráfico, etc.) para determinar cómo se comportan los materiales de dicha estructura y obtener los módulos elásticos, la vida remanente y sus espesores correspondientes.

La importancia de aplicar las metodologías empírico-mecanicistas en la auscultación o evaluación de carreteras se debe a que se puede obtener una respuesta del pavimento de una manera simple sin alterar la configuración de la estructura. Por lo tanto, es importante implementar estos equipos en pavimentos, ya que mediante los procesos destructivos se lleva más tiempo y costo en extraer núcleos in situ. Cabe resaltar que con la utilización de estos equipos, aún pueden existir errores y requiere de la comparación de los resultados con los de laboratorio.

Esta tecnología nos permite evaluar cada una de nuestras redes carreteras de forma rápida, y si se logra implementar en gran masa se podría llegar a analizar la red carretera existente en nuestro país y tener una base de datos para llevar a cabo el mantenimiento que se requiere sin que se llegue a un deterioro mayor del que ya existe e ir evaluando constantemente cada una de ellas para que se encuentren en buen estado y trabajen de la manera adecuada para lo que fueron construidas.

- **Recomendaciones**

Las mediciones mediante el deflectómetro se deben llevar a cabo de una forma gradual estableciendo a que distancia se hará cada medición, y si queda inconcluso el análisis, determinar las próximas deflexiones a una hora semejante a la cual las primeras deflexiones se obtuvieron. Ya que pueden existir variaciones por la temperatura.

Los tramos homogéneos se pueden realizar mediante la respuesta del pavimento en deflexiones, ya que si se sigue lo que se establece en la metodología, se incrementa el número de tramos. Por lo tanto, se pueden comparar los resultados entre dicha metodología y la que se realizó mediante las deflexiones y poder establecer una similitud entre las dos.

Se recomienda “correr” el programa ELMOD6 con diferentes módulos de referencia para comparar la variación que existe entre una y otra, y obtener la mínima variación para que represente de una manera más precisa lo que existe en campo.

BIBLIOGRAFÍA

- a) American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO (1993). ***“Design of pavement structures”***, Washington D.C, EUA.
- b) Andrade C., Machado I. y Rufino J. (2015). ***“Metodología de análisis de la condición del pavimento a partir del cuenco de deflexión”***, Revista Infraestructura Vial LANAMME UCR, Volumen 17, Número 29, San José Costa Rica.
- c) Bazi, G. (2010). ***“Evaluation of layer moduli and overlay design ELMOD”***, Dynatest ELMOD 6 Consulting Inc Training , México.
- d) Beltrán, G. y Romo M. (2012). ***“Análisis de índices derivados de pruebas de deflexión por impacto para evaluación de pavimentos”***, XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica SMIG, Cancún Quintana Roo, México.
- e) Coria C. (2013). ***“Modelo de respuesta estructural multicapa para diseño de pavimentos flexibles”***, Tesis de maestría UMSNH PNPC CONACYT, Morelia Michoacán, México.
- f) Coria C. (2014). ***“Análisis de daño por deformación permanente en pavimentos flexibles mediante metodología empírico-mecanicista (MEM) utilizando modelos de deterioro para capas no estabilizadas”***, Tercer Coloquio de Jóvenes Geotecnistas, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica SMIG, UNAM, México, DF.
- g) Coria C. y Caraza J. (2015). ***“Calibración de ecuaciones de predicción para obtener módulos elásticos en capas de pavimentos flexibles mediante deflexiones obtenidas con el deflectómetro de impacto HWD”***, Cuarto Coloquio de Jóvenes Geotecnistas, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica SMIG, IPN, México, DF.
- h) Crespo R. y Ruiz F (2001). ***“Evaluación estructural de firmes de carretera. El área del cuenco de deflexiones. El módulo de la explanada”***, Área de auscultación de firmes AEPO Ingenieros Consultores, Madrid, España.
- i) De Solminihac H. (2005). ***“Gestión de Infraestructura Vial”***, Ediciones Universidad Católica de Chile, tercera edición, Santiago de Chile.

- j) Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) (2015). **“Guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras en México 2014”**, Secretaría de Comunicaciones y Transportes SCT, México.
- k) Federal Aviation Administration (FAA) (2011). **“Backcalculation BAKFAA”**, Atlantic City NJ.
- l) Federal Highway Administration FHWA (2000). **“Temperature predictions and adjustment factors for asphalt pavement”**, US Department of transportation, Publicación No. FHWA-RD-98-085, Washington DC.
- m) Federal Highway Administration FHWA (2002). **“Introduction to Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavements”**, National Highway Institute, Reference Manual Module 5.1 Structural evaluation of existing pavements, NHI Course No. 131064, EUA.
- n) Garnica P. y Pérez A. (2015). **“Influencia de la temperatura en la determinación de la capacidad estructural de pavimentos flexibles”**, *Revista Asfáltica de la Asociación Mexicana del Asfalto AMAAC*, No 42 pp. 18-26, México DF.
- o) Garnica P. y Hernández R. (2015). **“El nuevo simulador de vehículos pesados del IMT”**, *Revista Asociación Mexicana de Ingeniería en Vías Terrestres AMIVTAC* No 37, pp. 4-7, México DF.
- p) Hoffman, M. (2003). **“Direct method for evaluating the structural needs of flexible pavements with Falling Weigh Deflectometer deflections”**, *In Transportation Research Board TRB, Issue 1860*, pp. 41-47, Washington DC, EUA.
- q) Higuera C. (2007). **“Mecánica de pavimentos. Principios básicos”**, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), GRINFRAVIAL, Boyacá, Colombia.
- r) Horak, E. (1987). **“Aspects of deflection basin parameters used in a mechanistic rehabilitation design procedure for flexible pavements in South Africa”**, PhD thesis, Department of Civil Engineering at, Pretoria, Sudáfrica.

- s) Instituto Mexicano del Transporte IMT (2015). “**Taller de evaluación de características superficiales y estructurales de pavimentos**”, *Curso de Actualización Post-profesional*, Sanfandila Querétaro, México.
- t) Instituto Mexicano del Transporte IMT (2015). “**Análisis y Diseño Mecanicista de Pavimentos en Carreteras Mexicanas**”, *Curso de Actualización Post-profesional*, Sanfandila Querétaro, México.
- u) López C. (2016). “**Auscultación de pavimentos y su aplicación para estrategias de conservación**”, Seminario *Diagnóstico de la situación actual y desarrollo de las nuevas tecnologías para el diseño y conservación de pavimentos*, Asociación Mexicana en Ingeniería en Vías Terrestres (AMIVTAC), Pachuca, Hidalgo.
- v) Montejo A. (2008). “**Ingeniería de pavimentos: Evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías**”, Tomo 2, tercera edición, Universidad Católica de Colombia, Bogotá Colombia.
- w) Orozco, R. (2005). “**Evaluación de pavimentos flexibles con métodos no destructivos**”, *Instituto de Ingeniería de la UNAM, Tesis doctoral*, México DF.
- x) Orozco, R. (2007). “**Un nuevo índice para evaluar la capacidad estructural de pavimentos flexibles**”, *Revista Asfáltica de la Asociación Mexicana del Asfalto AMAAC No 8*, pp. 29-37, México DF.
- y) Poon C. (2016). “**Infraestructura carretera en México**”, Seminario Internacional del Asfalto: *Nuevas tecnologías sustentables en los pavimentos asfálticos*, Asociación Mexicana del Asfalto AMAAC, Guadalajara Jalisco.
- z) Rao C. y Von Quintus H. (2016). “**Determination of In-Place Elastic Layer Modulus: Backcalculation Methodology and Procedures**”, Seminar TRB Committee on Pavement Structural Modeling and Evaluation. EUA.
- aa) Ulloa A. (2015). “**Retrocálculo de módulos de capas y diseño mecanístico-empírico de pavimentos**”, XXXI Reunión Anual ANALISEC, Villahermosa, Tabasco.
- bb) Zarate, M. (2009). “**Análisis de la respuesta de pavimentos flexibles utilizando el deflectómetro de impacto HWD**”, *Revista Asfáltica de la Asociación Mexicana del Asfalto AMAAC No 19*, pp. 3-18, México DF.

- cc) Zarate M. (2013). ***“Uso de HWD en pavimentos flexibles”***, Asociación Mexicana de Ingeniería en Vías Terrestres AMIVTAC, revista No. 22, pp. 4-8, México, DF.

ANEXOS

ANEXO 1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

El análisis de sensibilidad consiste en ir iterando con diferentes valores de módulos de referencia (Seed Modulus, ver Figura 127) dejando los demás valores fijos para poder observar la variación que se tiene de los módulos fijos respecto al módulo que se está cambiando y deducir cual es la combinación en donde no exista una variación muy grande para encontrar la estructura del pavimento que representa las características de los materiales que se encuentran en el sitio de estudio. En este caso se utilizaron los rangos de módulos de referencia dados por DYNATEST.

Layer	Thickness (mm)	Seed Modulus (MPa)	Material
1	60	3000	AC_AI
2	120	3000	AC_AI
3	480	300	Granular
4		50	Subgrade
5			

Figura 127.- Módulos de referencia en el programa ELMOD6.

La estructura que se utilizó para el análisis de sensibilidad es la siguiente:



Figura 128.- Estructura base para el análisis de sensibilidad.

Como existe un número muy grande de variaciones entre los rangos que propone DYNATEST, es difícil ir variando con valores pequeños, por lo tanto, se ajustó para que sólo se llegase a ocho iteraciones. Por lo tanto, los valores son los siguientes:

- Capa Asfáltica.

Tabla 38.- Análisis de sensibilidad para la primera capa, E1 (Carpeta asfáltica).

Módulos sugeridos, DYNATEST				Retrocálculo ELMOD6, Mpa			
AC	AC	Granular	Subgrade	E1	E2	E3	E4
3000	3000	300	50	1148	2324	585	154
3500	3000	300	50	1249	2199	589	157
4000	3000	300	50	1322	2125	588	154
4500	3000	300	50	1423	2033	594	151
5000	3000	300	50	1574	1912	592	157
5500	3000	300	50	1628	1862	602	148
6000	3000	300	50	1703	1830	596	152
6500	3000	300	50	1803	1747	600	156

- Base con asfalto espumado.

Tabla 39.- Análisis de sensibilidad para la segunda capa, E2 (Base con asfalto espumado).

Módulos sugeridos, DYNATEST				Retrocálculo ELMOD6, Mpa			
AC	AC	Granular	Subgrade	E1	E2	E3	E4
3000	3000	300	50	1148	2324	585	154
3000	3500	300	50	1100	2463	572	160
3000	4000	300	50	1078	2478	567	164
3000	4500	300	50	1007	2636	561	164
3000	5000	300	50	952	2764	552	167
3000	5500	300	50	987	2712	548	176
3000	6000	300	50	937	2871	551	169
3000	6500	300	50	906	2946	548	166

- Subbase.

Tabla 40.- Análisis de sensibilidad para la tercera capa, E3 (Subbase).

Módulos sugeridos, DYNATEST				Retrocálculo ELMOD6, Mpa			
AC	AC	Granular	Subgrade	E1	E2	E3	E4
3000	3000	200	50	1149	2358	563	165
3000	3000	300	50	1148	2324	585	154
3000	3000	400	50	1160	2324	595	146
3000	3000	500	50	1185	2269	610	135
3000	3000	600	50	1128	2369	620	128
3000	3000	700	50	1135	2362	624	123
3000	3000	800	50	1221	2262	622	124
3000	3000	900	50	1169	2294	641	116

- Subrasante.

Tabla 41.- Análisis de sensibilidad para la cuarta capa, E4 (Subrasante).

Módulos sugeridos, DYNATEST				Retrocálculo ELMOD6, Mpa			
AC	AC	Granular	Subgrade	E1	E2	E3	E4
3000	3000	300	34	1105	2425	614	125
3000	3000	300	50	1148	2324	585	154
3000	3000	300	100	1251	2250	516	238
3000	3000	300	150	1475	2060	466	380
3000	3000	300	200	1587	1983	434	514
3000	3000	300	250	1634	1967	421	596
3000	3000	300	300	1537	2030	412	641
3000	3000	300	345	1531	2029	406	698

Se puede observar que en la Tabla 38 en las iteraciones de la primera capa de la carpeta asfáltica (AC–Asphalt Cement) que el valor del módulo de referencia entre mayor sea va disminuyendo el módulo calculado de la segunda capa (base con asfalto espumado). Igualmente pasa cuando se modifica el módulo de referencia para la capa 2 (Tabla 39), la capa subyacente disminuye conforme aumenta el módulo al igual que la capa superior, se puede decir que “castiga” a las demás capas.

En el programa ELMOD6 la configuración de los módulos de referencia en donde la variación es menor, los módulos calculados son los siguientes:

Layer	N	Mean	Std.
E1 *	29	1135	1.607
E2 *	29	2362	1.586
E3 *	29	624	1.972
E4 *	29	123	1.708

Figura 129.- Variación menor de los módulos calculados para el análisis de sensibilidad.

ANEXO 2. EJEMPLO DE VIDA REMANENTE Y ESPESOR REQUERIDO EN EL PROGRAMA ELMOD 6.

Para obtener la vida remanente de los tramos carreteros que se están evaluando es necesario ingresar algunos datos después de que se haya llegado a los módulos elásticos que corresponden para cada uno de ellos, para que al generar la estimación de la vida remanente sea la correcta.



Figura 130.- Pantalla del programa ELMOD6 para la estimación de la vida remanente y espesores.

Por lo tanto, una vez que se tenga la estructura y los módulos elásticos correspondientes, es necesario ir a “Overlay Design” (ver Figura 131) e ingresar los siguientes datos:

1. Los ESAL´S, para los tramos que se están analizando.
2. Seleccionar los tramos en donde se desea hacer la estimación.
3. El material y módulo.

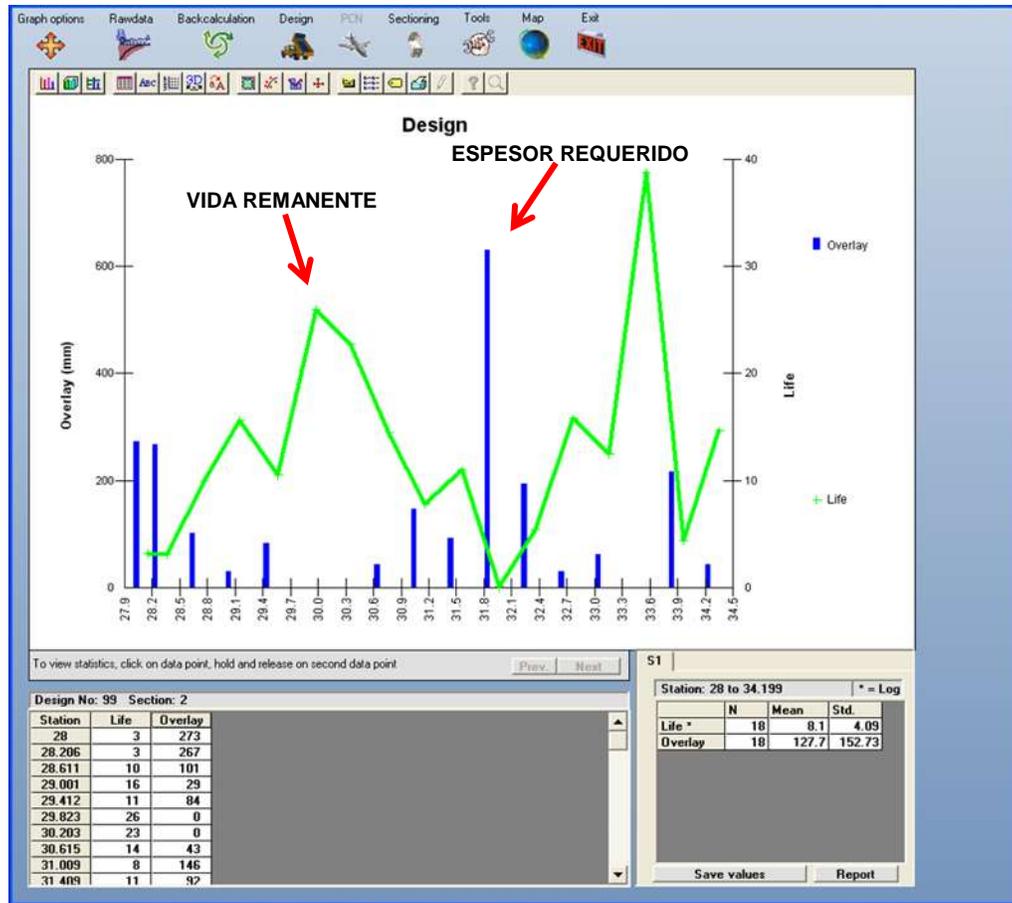


Figura 132.- Captura de pantalla del programa ELMOD6. Vida remanente y espesores.

El programa ELMOD6 elabora el cálculo para cada sección de los tramos que se analizaron obteniendo un promedio de la vida remanente y el espesor. Siendo la línea verde la que representa la vida remanente y la línea azul el espesor que se requiere para que esa sección trabaje de una manera eficaz al tránsito diario.

Una vez que se hayan obtenido los resultados estos se pueden exportar a Excel para poder hacer los promedios correspondientes para cada tramo.