



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería en Vialidad y Transportes, Tercera Cohorte

**Factor de corrección de carga para el cálculo de deflexiones en pavimentos rígidos mediante Deflectómetro de impacto (FWD)
caso de estudio: vía Cuenca – Molleturo – El Empalme**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Ingeniería en Vialidad y Transportes.

Autor:

Wilmer Andrés Zhañay Ledesma

CI: 0104077276

willyof24@hotmail.com

Director:

Ing. Jaime Asdrúbal Bojorque Ñiguez., PhD

CI: 0102857885

Cuenca – Ecuador

11-junio-2021



Resumen: El Ministerio de Transporte y Obras Públicas MTOP anualmente invierte grandes recursos económicos en el mantenimiento de la red vial estatal con la finalidad de mantener un buen nivel de servicio para los usuarios, considerando la evaluación de los pavimentos como requisito previo para su mantenimiento y rehabilitación. Para tal fin, el MTOP, actualmente, realiza ensayos mediante pruebas No Destructivas (Non Destructive Test, NDT), utilizando para ello el Deflectómetro de Impacto FWD 1500 (Falling Weight Deflectometer). Debido a la naturaleza del ensayo FWD, se puede realizar el mismo con diferentes cargas, que después se normalizan mediante factores de corrección a 40 kN según la recomendación de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). El presente proyecto de titulación está enfocado en validar el factor de corrección de carga dado por la AASHTO para el cálculo de deflexiones en pavimentos rígidos. Este factor permite realizar la corrección de la deflexión producida por la aplicación de carga sobre la losa de pavimento y convertirla en términos de una carga normalizada, misma que es empleada para el diseño de los espesores de las sobrecarpetas. Se realiza la evaluación estructural en dos segmentos de la vía Cuenca - Molleturo - El Empalme, comprendidos en las abscisas 10+000 - 15+000 y 16+000 - 21+000, cuyos valores de Índice de Condición de Pavimento PCI son de Excelente y Muy Bueno, respectivamente. Para la verificación de la relación existente entre la carga aplicada y la carga normalizada se realiza una serie de ensayos deflectométricos con las diferentes cargas en intervalos de 5 kN partiendo desde 35 kN hasta 55 kN, y a través de un análisis de regresión se verifica la tendencia que siguen los valores de deflexión obteniéndose así el valor de deflexión correspondiente a la carga normalizada de 40 kN. Así también, se realiza un análisis de correlación para validar la ecuación de corrección por carga de la AASHTO. Se analiza, adicionalmente, la influencia de la carga en la obtención de los parámetros de diseño de sobrecarpetas como lo son; el módulo de reacción de la subrasante, el módulo de elasticidad del concreto y el módulo de rotura del concreto. Para ello, se emplean los resultados de deflexión normalizados y por medio de un análisis de correlación se comprueba que los parámetros guardan un grado de correlación excelente, cuyos valores de coeficiente de correlación están en el rango de 0.98 a 1.00, con respecto a los obtenidos mediante el método de la AASHTO que corrige las deflexiones por la carga aplicada en el ensayo. Finalmente, por medio del método de diseño de sobrecarpetas asfálticas se analiza la influencia de la aplicación de diferentes cargas durante los ensayos deflectométricos en los espesores. De los resultados se comprueba que la variación en el espesor de la losa de hormigón requerido para el tráfico en el periodo de diseño establecido varía en un porcentaje menor al 1.00%. Se determinaron variaciones en el espesor de la sobrecarpeta, sin embargo, estas variaciones no son representativas en términos de diseño ya que en los casos analizados el espesor sugerido de diseño permanece igual para los cinco estados de carga, correspondiente a 4.00 pulgadas de sobrecarpeta en el primer tramo y de 2.00 pulgadas en el segundo tramo.

Palabras claves: Evaluación de pavimentos. Estados de carga. Factor de corrección de carga. Deflexión. Retrocálculo. FWD. Rehabilitación de pavimentos.



Abstract: The Ministerio de Transporte y Obras Publicas MTOP annually invests large financial resources in the maintenance of the state road network in order to maintain a good level of service for users, considering the evaluation of pavements as a prerequisite for their maintenance and rehabilitation. To this end, the MTOP currently conducts tests using Non Destructive Tests (NDT), using the FWD 1500 Impact Deflectometer (Falling Weight Deflectometer). Due to the nature of the FWD test, it can be performed with different loads, which are then normalized by correction factors to 40 kN according to the recommendation of the AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). This degree project is focused on validating the load correction factor given by the AASHTO for the calculation of deflections in rigid pavements. This factor makes it possible to correct the deflection produced by the application of load on the paving slab and convert it in terms of a normalized load, which is used for the design of the thickness of the overlay. The structural evaluation is carried out in two segments of the Cuenca - Molleturo - El Empalme road, included in the abscissa 10+000 - 15+000 and 16+000 - 21+000, whose PCI Pavement Condition Index values are Excellent and Very Good, respectively. To verify the relationship between the applied load and the normalized load, a series of deflectometric tests are carried out with the different loads in intervals of 5 kN, starting from 35 kN to 55 kN, and through a regression analysis the trend is verified which follow the deflection values, thus obtaining the deflection value corresponding to the normalized load of 40 kN. Also, a correlation analysis is performed to validate the AASHTO load correction equation. Additionally, the influence of the load on obtaining the design parameters of overlayers, such as they are, is analyzed; the modulus of reaction of the subgrade, the modulus of elasticity of the concrete and the modulus of failure of the concrete. For this, the normalized deflection results are used and by means of a correlation analysis it is verified that the parameters keep an excellent degree of correlation, whose correlation coefficient values are in the range of 0.98 to 1.00, with respect to those obtained by the AASHTO method that corrects deflections for the applied load in the test. Finally, by means of the asphalt overlay design method, the influence of the application of different loads during the deflectometric tests on the thickness is analyzed. From the results it is found that the variation in the thickness of the concrete slab required for traffic in the established design period varies by a percentage less than 1.00%. Variations in the thickness of the overlay were determined, however, these variations are not representative in terms of design since in the cases analyzed the suggested design thickness remains the same for the five load states, corresponding to 4.00 inches of overlay in the first leg and 2.00 inches in the second leg.

Key words: Pavement evaluation. Load states. Load correction factor. Deflection. Back calculation. FWD. Pavement rehabilitation.



INDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	24
1.1	Antecedentes	24
1.2	Justificación.....	25
1.3	Alcance.....	25
1.4	Objetivos	26
1.4.1	Objetivo General	26
1.4.2	Objetivos Específicos	26
1.5	Estructura del Documento	27
2	MARCO CONCEPTUAL.....	29
2.1	Pavimento rígido	29
2.2	Pavimento flexible.....	30
2.3	Conceptos básicos	30
2.3.1	Módulo de reacción de la subrasante (k).....	30
2.3.2	Módulo resiliente de la subrasante (Mr).....	31
2.3.3	Coefficiente de Poisson (u).....	32
2.3.4	Módulo de elasticidad del concreto (Ec).....	32
2.3.5	Módulo de rotura del concreto (S'c)	33
2.3.6	Evaluación de pavimentos.....	34
2.3.7	Evaluación funcional de pavimento	34
2.3.8	Evaluación estructural de pavimento	34
2.3.9	Auscultación.....	34
2.3.10	Deflexión.....	35
2.3.11	Rehabilitación de pavimentos	35
2.4	Evaluación de pavimentos.....	35
2.4.1	Evaluación funcional de pavimentos.....	36
2.4.2	Evaluación estructural de pavimentos	39
2.5	Ensayo de deflectometría de impacto.....	44
2.5.1	Propósito de las Pruebas Deflectométricas	45
2.5.2	Deflectómetro de Impacto	45
2.5.3	Parámetros obtenidos de pruebas deflectométricas	47
2.5.4	Factores de ajuste en deflexiones	49
2.5.5	Retrocálculo de datos de deflexión	51



2.6	Metodología AASHTO 93	51
2.6.1	Módulo de reacción efectivo dinámico	51
2.6.2	Módulo de reacción efectivo estático	52
2.7	Rehabilitación de pavimentos con sobrecarpas	53
2.7.1	Tipos de sobrecarpas	53
2.7.2	Capacidad estructural y deficiencia estructural	54
2.7.3	Métodos para diseño de sobrecarpas	54
2.8	Sobrecarpas de concreto asfáltico sobre pavimento de hormigón.....	58
2.8.1	Tareas de reparación previas	58
2.8.2	Control de reflexión de fisuras	59
2.8.3	Subdrenaje.....	59
2.8.4	Diseño de espesor de sobrecarpeta.....	60
3	DESARROLLO.....	70
3.1	Ubicación del proyecto.....	70
3.2	Pruebas de deflectometría de impacto con el FWD	71
3.2.1	Ubicación de los geófonos	72
3.2.2	Calibración del equipo	73
3.2.3	Toma de datos	74
3.2.4	Almacenamiento de datos	74
3.3	Análisis de regresión	76
3.4	Cuencos de deflexión	102
3.5	Parámetros de diseño obtenidos mediante retrocálculo.....	103
3.5.1	Módulo de reacción estático k.....	103
3.5.2	Módulo de elasticidad del concreto (E_c).....	104
3.5.3	Módulo de rotura del concreto ($S'c$)	105
3.6	Normalización de deflexiones	105
3.7	Factor de corrección por carga	108
3.7.1	Análisis de correlación de deflexiones	111
3.8	Parámetros normalizados obtenidos mediante retrocálculo	115
3.9	Diseño de sobrecarpeta.....	117
3.9.1	Espesor de la losa de hormigón.....	117
3.9.2	Análisis de tráfico.....	117
3.9.3	Diseño de pavimentos rígidos método AASHTO 93	124
3.9.4	Espesor efectivo de losa del pavimento existente D_{ef}	132
3.9.5	Determinación del espesor de la sobrecarpeta.....	136



4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	138
4.1	Análisis de cuencos de deflexión	138
4.2	Análisis del AREA del cuenco de deflexión	141
4.3	Análisis de parámetros obtenidos mediante retrocálculo (estados de carga)	143
4.3.1	Módulo de reacción estático k.....	143
4.3.2	Módulo de elasticidad del concreto (E_c).....	145
4.3.3	Módulo de rotura del concreto (S^c)	147
4.4	Análisis de correlación de deflexiones.....	148
4.5	Análisis de parámetros normalizados obtenidos mediante retrocálculo.....	150
4.6	Análisis de correlación de los parámetros de diseño.....	158
4.7	Diseño de sobrecarpetas	163
4.7.1	Espesor de losa requerido.....	163
4.7.2	Espesor de sobrecarpeta	164
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	166
5.1	Conclusiones	166
5.2	Recomendaciones.....	168
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	170
7	ANEXOS	173
7.1	Valores de deflexión obtenido a través de análisis de regresión	173
7.2	Normalización de deflexiones	209
7.3	Transferencia de carga	227
7.4	Reporte grafico de secciones evaluadas	229



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Coeficientes de Poisson para diferentes materiales.....	32
Tabla 2.2. Módulos de elasticidad de materiales.....	33
Tabla 2.3. Rangos de calificación de PCI.	36
Tabla 2.4. Escala de Índice de Servicio.	39
Tabla 2.5. Escala de Índice de Servicio.	48
Tabla 2.6. Evaluación según el cuenco de deflexión.	49
Tabla 2.7. Tipos de diseños de sobrecarpetas.	53
Tabla 2.8. Trabajos de reparación en losas de hormigón.	58
Tabla 2.9. Coeficiente de transferencia de carga.....	63
Tabla 3.1. Ubicación de geófonos FWD propiedad del MTOP.	72
Tabla 3.2. Deflexiones para cargas nominales, abscisa 10+098	93
Tabla 3.3. Determinación del coeficiente de variación CV.....	98
Tabla 3.4. Deflexiones promedio, Carril izquierdo – Tramo 1 (estados de carga).	98
Tabla 3.5. Deflexiones promedio, Carril derecho – Tramo 1 (estados de carga).....	99
Tabla 3.6. Deflexiones promedio, Carril izquierdo – Tramo 2 (estados de carga).	99
Tabla 3.7. Deflexiones promedio, Carril derecho – Tramo 2 (estados de carga).....	100
Tabla 3.8. Módulo de reacción estático “k” (estados de carga).	104
Tabla 3.9. Módulo de elasticidad del concreto “Ec” (estados de carga).	104
Tabla 3.10. Módulo de rotura del concreto “S’c” (estados de carga).....	105
Tabla 3.11. Deflexiones Normalizadas Promedio, Carril izquierdo – Tramo 1 (AASHTO).....	106
Tabla 3.12. Deflexiones Normalizadas Promedio, Carril derecho – Tramo 1 (AASHTO)	107
Tabla 3.13. Deflexiones Normalizadas Promedio, Carril izquierdo – Tramo 2 (AASHTO).....	107
Tabla 3.14. Deflexiones Normalizadas Promedio, Carril derecho – Tramo 2 (AASHTO).	108



Tabla 3.15. Clasificación del coeficiente de correlación.....	110
Tabla 3.16. Parámetros calculados carga normalizada 40 kN, Carril izquierdo – Tramo 1 (AASHTO).....	116
Tabla 3.17. Parámetros calculados carga normalizada 40 kN, Carril derecho – Tramo 1 (AASHTO)	116
Tabla 3.18. Parámetros calculados carga normalizada 40 kN, Carril izquierdo – Tramo 2 (AASHTO).....	116
Tabla 3.19. Parámetros calculados carga normalizada 40 kN, Carril derecho – Tramo 2 (AASHTO).	116
Tabla 3.20. Espesor de losa de hormigón.....	117
Tabla 3.21. Proyección del TPDA tramo Sayausí - Jardín del Cajas	118
Tabla 3.22. Periodo de análisis.....	119
Tabla 3.23. Tasas de crecimiento del TPDA tramo Sayausi - Jardín del Cajas.	119
Tabla 3.24. Cargas adoptadas para cálculo de Factor de daño FC.....	120
Tabla 3.25. Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones.....	120
Tabla 3.26. Factor de distribución por dirección.....	123
Tabla 3.27. Factor de distribución por carril	123
Tabla 3.28. Ejes equivalentes acumulados para periodo de diseño.....	124
Tabla 3.29. Nivel de confianza sugeridos según la clasificación.	125
Tabla 3.30. Coeficiente de drenaje para pavimentos rígidos.	126
Tabla 3.31. Parámetros calculados para carga normalizada 40 kN, Carril izquierdo – Tramo 1... ..	130
Tabla 3.32. Parámetros calculados para carga normalizada 40 kN, Carril izquierdo – Tramo 2... ..	130
Tabla 3.33. Espesor de losa requerido para carga normalizada 40 kN (pulgadas).....	131
Tabla 3.34. Espesor de losa requerido para carga normalizada 40 kN (centímetros)	132
Tabla 3.35. Losas con grietas de esquina.	134
Tabla 3.36. Losas con grietas longitudinales.	134



Tabla 3.37. Losas con grietas transversales.	134
Tabla 3.38. Losas con parches deteriorados.....	134
Tabla 3.39. Factor de ajuste por fisuras Fjc.	135
Tabla 3.40. Pulimento de agregados.	135
Tabla 3.41. Espesor efectivo de la losa de hormigón existente.....	136
Tabla 3.42. Espesor reforzamiento estructural para carga normalizada 40 kN, Tramo 1.	137
Tabla 3.43. Espesor reforzamiento estructural para carga normalizada 40 kN, Tramo 2.	137
Tabla 4.1. AREA (mm) de cuenco de deflexión (estados de carga).	139
Tabla 4.2. Caracterización de estructura del pavimento.	141
Tabla 4.3. AREA (pulg) de cuenco de deflexión (estados de carga).	142
Tabla 4.4. Módulo de reacción estático k (pci) (estados de carga)	143
Tabla 4.5. Caracterización de la Subrasante.....	144
Tabla 4.6. Caracterización de la subrasante (carga normalizada 40 kN).	145
Tabla 4.7. Módulo de elasticidad del concreto “Ec” (estados de carga).	145
Tabla 4.8. Caracterización del módulo de elasticidad “Ec” (carga normalizada 40 kN).	146
Tabla 4.9. Módulo de rotura del concreto “S’c” (estados de carga).....	147
Tabla 4.10. Coeficiente de correlación, análisis de correlación de deflexiones.....	149
Tabla 4.11. Pendiente de la función correlación de deflexiones.	149
Tabla 4.12. Variabilidad de parámetros respecto a carga normalizada de 40 kN, Carril izquierdo – Tramo 1	154
Tabla 4.13. Variabilidad de parámetros respecto a carga normalizada de 40 kN, Carril derecho – Tramo 1	154
Tabla 4.14. Variabilidad de parámetros respecto a carga normalizada de 40 kN, Carril izquierdo – Tramo 2	155
Tabla 4.15. Variabilidad de parámetros respecto a carga normalizada de 40 kN, Carril derecho – Tramo 2	155



Tabla 4.16. Coeficiente de correlación, AREA del cuenco de deflexión..... 159

Tabla 4.17. Pendiente del ajuste de correlación, AREA del cuenco de deflexión. 160

Tabla 4.18. Coeficiente de correlación, módulo de reacción estático k. 160

Tabla 4.19. Pendiente del ajuste de correlación, módulo de reacción estático k..... 161

Tabla 4.20. Coeficiente de correlación, módulo de elasticidad E_c 161

Tabla 4.21. Pendiente del ajuste de correlación, módulo de elasticidad E_c 162

Tabla 4.22. Coeficiente de correlación, módulo de rotura S'_c 162

Tabla 4.23. Pendiente del ajuste de correlación, módulo de rotura S'_c 162

Tabla 4.24. Espesor de losa requerido (cm) 163

Tabla 4.25. Porcentaje de variación en espesor de losa requerido 164

Tabla 4.26. Espesor de sobrecarpeta requerido (pulg) 164

Tabla 4.27. Porcentaje de variación en espesor de sobrecarpeta requerido 164



INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Estructura de pavimento rígido.....	29
Figura 2.2. Estructura de pavimento flexible	30
Figura 2.3. Ensayo de carga sobre placa	31
Figura 2.4. Deformación de un espécimen bajo cargas repetitivas.	31
Figura 2.5. Campos de aplicación de la evaluación de pavimentos	35
Figura 2.6. Patologías en Pavimentos Flexibles.....	37
Figura 2.7. Patologías en Pavimentos Rígidos	37
Figura 2.8. Escala de valores del IRI y las características de los pavimentos.....	38
Figura 2.9. Nivel de Servicio vs. Tiempo.....	39
Figura 2.10. Calicata realizada a mano.	40
Figura 2.11. Calicata realizada a máquina.	40
Figura 2.12. Extracción de núcleos.	41
Figura 2.13. Núcleos de pavimento.....	41
Figura 2.14. Diagrama de cuenco de deflexión.....	42
Figura 2.15. Viga Benkelman.	43
Figura 2.16. Carga dinámica en estado estacionario.....	43
Figura 2.17. Carga de impulso.	44
Figura 2.18. Esquema de funcionamiento del deflectómetro de impacto.	46
Figura 2.19. Cuenco de deflexiones.....	48
Figura 2.20. Tipos de cuenco de deflexiones.....	49
Figura 2.21. Pérdida de la capacidad estructural en función del tiempo y del tráfico.....	54
Figura 2.22. Pérdida de la serviciabilidad en función del tráfico.....	56
Figura 2.23. Relación entre el factor de condición y la vida remanente.	57



Figura 2.24. Factor de ajuste F_{jc}	67
Figura 3.1. Localización de tramos de estudio vía Cuenca – Molleturo – El Empalme.	70
Figura 3.2. Deflectómetro PRIMAX 1500, propiedad del MTOP.....	71
Figura 3.3. Esquema para ensayos en calzada.....	71
Figura 3.4. Computador adaptado en vehículo remolque.	73
Figura 3.5. Abscisado para ejecución de ensayo.....	73
Figura 3.6. Información en Archivo “txt” del ensayo.	75
Figura 3.7. Resultados de deflexión para carga de 35 kN.....	75
Figura 3.8. Resultados de deflexión para carga de 40 kN.....	75
Figura 3.9. Resultados de deflexión para carga de 45 kN.....	75
Figura 3.10. Resultados de deflexión para carga de 50 kN.....	76
Figura 3.11. Resultados de deflexión para carga de 55 kN.....	76
Figura 3.12. Resultados de deflexión en cada geófono carril izquierdo - Tramo 1.....	79
Figura 3.13. Resultados de deflexión en cada geófono carril derecho - Tramo 1.....	82
Figura 3.14. Resultados de deflexión en cada geófono carril izquierdo - Tramo 2.....	85
Figura 3.15. Resultados de deflexión en cada geófono carril derecho - Tramo 2.....	88
Figura 3.16. Líneas de tendencia para geófonos Tramo 1, carril izquierdo.	92
Figura 3.17. Ajuste lineal de deflexiones abscisa 10+098.....	93
Figura 3.18. Cuencos de deflexión para carga nominal, Carril Izquierdo - Tramo 1.....	95
Figura 3.19. Cuencos de deflexión para carga de 40 kN, Carril Derecho - Tramo 1.....	95
Figura 3.20. Cuencos de deflexión para carga de 40 kN, Carril Izquierdo - Tramo 2.....	95
Figura 3.21. Cuencos de deflexión para carga de 40 kN, Carril Derecho - Tramo 2.....	96
Figura 3.22. Diagrama de cajas de deflexiones para carga de 40 kN.....	96
Figura 3.23. Deflexiones promedio, carril izquierdo - Tramo 1 (estados de carga).....	100
Figura 3.24. Deflexiones promedio, carril derecho - Tramo 1 (estados de carga).....	101



Figura 3.25. Deflexiones promedio, carril izquierdo - Tramo 2 (estados de carga)..... 101

Figura 3.26. Deflexiones promedio, carril derecho - Tramo 2 (estados de carga). 101

Figura 3.27. Cuenco de Deflexión, carril izquierdo - Tramo 1 (estados de carga). 102

Figura 3.28. Cuenco de Deflexión, carril derecho - Tramo 1 (estados de carga)..... 102

Figura 3.29. Cuenco de Deflexión, carril izquierdo - Tramo 2 (estados de carga). 103

Figura 3.30. Cuenco de Deflexión, carril derecho - Tramo 2 (estados de carga)..... 103

Figura 3.31. Factor de corrección por carga..... 109

Figura 3.32. Comportamiento del coeficiente de correlación. 110

Figura 3.33. Correlación de deflexión normalizada por método AASHTO y ESTADOS DE CARGA..... 111

Figura 3.34. Correlación de deflexiones Geófono 1. 112

Figura 3.35. Correlación de deflexiones Geófono 2. 113

Figura 3.36. Correlación de deflexiones Geófono 3. 113

Figura 3.37. Correlación de deflexiones Geófono 4 113

Figura 3.38. Correlación de deflexiones Geófono 5 114

Figura 3.39. Correlación de deflexiones Geófono 6 114

Figura 3.40. Correlación de deflexiones Geófono 7 114

Figura 3.41. Correlación de deflexiones Geófono 8 115

Figura 3.42. Correlación de deflexiones Geófono 9. 115

Figura 3.43. Esquema de ensayo de transferencia de carga en juntas transversales. 127

Figura 3.44. Ensayo de transferencia de carga en juntas transversales 127

Figura 3.45. Transferencia de carga en junta calzada derecha - Tramo 1..... 128

Figura 3.46. Transferencia de carga en junta calzada izquierda - Tramo 1..... 128

Figura 3.47. Transferencia de carga en junta calzada derecha - Tramo 2..... 129

Figura 3.48. Transferencia de carga en junta calzada izquierda - Tramo 2..... 129



Figura 3.49. Software Modified ASHTO Rigid Pavement Equation..... 131

Figura 3.50. Variación del espesor de losa de hormigón requerido 132

Figura 3.51. Parche asfáltico..... 133

Figura 3.52. Grieta de Esquina..... 133

Figura 3.53. Punzonamiento..... 133

Figura 3.54. Grieta transversal..... 133

Figura 3.55. Grieta longitudinal..... 133

Figura 3.56. Despostillamiento de junta..... 133

Figura 3.57. Pulimento de agregados..... 133

Figura 3.58. Parche deteriorado..... 133

Figura 3.59. Factor de ajuste F_{jc} 135

Figura 4.1. Cuenco de Deflexión carga normalizada (estados de carga) 139

Figura 4.2. Tipos de cuenco de deflexion..... 140

Figura 4.3. Abscisa 13+400 140

Figura 4.4. Abscisa 11+600 140

Figura 4.5. Abscisa 20+000 141

Figura 4.6. Abscisa 17+600 141

Figura 4.7. AREA del cuenco de deflexión (estados de carga)..... 142

Figura 4.8. Módulo de reacción estático “k” (estados de carga)..... 144

Figura 4.9. Módulo de elasticidad del concreto “ E_c ” (estados de carga)..... 146

Figura 4.10. Módulo de de rotura del concreto “ $S'c$ ” (estados de carga) 148

Figura 4.11. AREA del cuenco vs carga nominal normalizada 150

Figura 4.12. Módulo de reacción estático “k” vs carga nominal normalizada..... 152

Figura 4.13. Módulo de elasticidad “ E_c ” vs carga nominal normalizada 153

Figura 4.14. Módulo de rotura “ $S'c$ ” vs carga nominal normalizada..... 154



Figura 4.15. Variación del AREA vs. Variación módulo de elasticidad “Ec”..... 155

Figura 4.16. Variación del AREA vs. Variación módulo de rotura “S’c” 156

Figura 4.17. Variación del AREA vs. Variación módulo de reacción “k” 157

Figura 4.18. Correlación AREA de cuenco de deflexión..... 159

Figura 4.19. Correlación Módulo de reacción estático k 160

Figura 4.20. Correlación Módulo de elasticidad estático Ec..... 161

Figura 4.21. Correlación Módulo de rotura S’c. 162

Figura 4.22. Espesor de losa requerido (pulg)..... 163

Figura 4.23. Espesor de sobrecarpeta requerido..... 165



LISTA DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

Abreviaturas

MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
NDT	Non Destructive Test
FWD	Falling Weight Deflectometer
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
PCI	Pavement Condition Index
CBR	Californian Bearing Ratio
ACI	American Concrete Institute
PSI	Present Serviciability Index
IRI	Índice de Rugosidad Internacional
ASTM	American Society of Testing Materials
AASHO	American Association of State Highway Officials
IBCH	Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón
CA	Concreto Asfáltico
ESALs	Equivalent Single Axis Loads
TPDA	Trafico Promedio Diario Annual
DMI	Distance Meter Indicator

Símbolos

k	Módulo de reacción de la subrasante
M_r	Módulo resiliente de la subrasante
ϵ_{axial}	Deformación Axial
σ_d	Esfuerzo desviador
u	Coefficiente de Poisson
E_c	Módulo de Elasticidad del Concreto



$f'c$	Resistencia a compresión del concreto
$S'c$	Módulo de rotura del concreto
IT	Tracción indirecta
P	Carga
E	Modulo elástico
r	Distancia desde el centro del plato de carga
dr	Deflexión a la distancia r, medida desde el centro del plato de carga
d_0	Deflexión máxima bajo el plato de carga.
d_{12}	Deflexión a 12 pulgadas (30 cm) desde el plato de carga.
d_{24}	Deflexión a 24 pulgadas (60 cm) desde el plato de carga.
d_{36}	Deflexión a 36 pulgadas (90 cm) desde el plato de carga.
d_i	Lectura de deflexión del geófono del FWD en campo
$d_{normalizada}$	Deflexión ajustado a carga estandarizada
T	Temperatura
h	Espesor de la capa asfáltica
D	Espesor de la losa
l_k	Radio de rigidez relativa
a	Radio del plato de carga
γ	Constante de Euler
SC_f	Capacidad estructural de un pavimento luego de sobrecarpeta
SC_{ef}	Capacidad estructural del pavimento en un determinado tiempo
SC_o	Capacidad estructural inicial de un pavimento
SC_{ol}	Deficiencia Estructural
SN	Número estructural
N_p	Tráfico presente



$N_{1.5}$	Tráfico a nivel de falla
RL	Vida remanente
CF	Factor de condición
SC_n	Capacidad estructural del pavimento luego de N_p ESALs
SN_{ef}	Número estructural efectivo
D_{ef}	Espesor efectivo de losa existente
D_{ol}	Espesor de la sobrecarpeta
A	Factor de conversión de deficiencia del espesor del pavimento de hormigón en un espesor sobrecarpeta de concreto asfáltico
D_f	Espesor de losa necesario para soportar el tránsito futuro
Δ_{LT}	Porcentaje de transferencia de carga
Δ_{ul}	Deflexión del lado no cargado
Δ_l	Deflexión del lado cargado
B	Factor correctivo por flexión de losa.
J	Factor de transferencia de carga
LS	Perdida de soporte
R	Confiabilidad
C_d	Coefficiente de drenaje
F_{jc}	Factor de ajuste por juntas y fisuras
F_{dur}	Factor de ajuste por durabilidad
F_{fat}	Factor de ajuste por fatiga
CF	Factor de condición
Unidades	
kN	Kilonewtons
psi	Libras por pulgada cuadrada



pulg	Pulgada
MPa	Megapascales
km/h	Kilómetros por hora
mm/m	Milímetros por metro
m/km	Metros por kilometro
m	Metro
cm	Centímetro
KPa	Kilopascales
lb	Libras
mm	Milímetros
kN/m ²	Kilonewtons por metro cuadrado
Lbf	Libras fuerza
µm	Micrones
°F	Grados Fahrenheit
°C	Grados centígrados
kip	1000 libras fuerza
Km	Kilómetro
Ton	Tonelada



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Wilmer Andrés Zhañay Ledesma en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Factor de corrección de carga para el cálculo de deflexiones en pavimentos rígidos mediante Deflectómetro de Impacto (FWD) caso de estudio: vía Cuenca – Molleturo – El Empalme", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 11 de junio del 2021

Wilmer Andrés Zhañay Ledesma

C.I: 0104077276



Cláusula de Propiedad Intelectual

Wilmer Andrés Zhañay Ledesma, autor del trabajo de titulación “Factor de corrección de carga para el cálculo de deflexiones en pavimentos rígidos mediante Deflectómetro de impacto (FWD) caso de estudio: vía Cuenca – Molleturo – El Empalme”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 11 de junio del 2021

Wilmer Andrés Zhañay Ledesma

C.I: 0104077276



AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llegar a estas instancias, por su divina intervención darme salud y fortaleza para seguir adelante y cumplir otra meta más en mi vida.

Al Ing. Jaime Bojorque E. PhD, por su tiempo y brindarme su ayuda y conocimiento para la culminación de este proyecto. A la Ing. Janneth Lojano por su amistad y la predisposición a colaborar en todo lo necesario para el desarrollo del proyecto.

A mis amigos, Elizabeth Q., Lucas N., Sebas P., Emilio S. (+), Víctor B. y Miguel C., gracias por su amistad sincera y apoyarme en todo momento.



Dedicatoria

A mi amada esposa Ruth, tu cariño y apoyo incondicional me han permitido ser una mejor persona, gracias por enseñarme a no rendirme y creer en mí. A mis hijas Marcela e Isabella, por llenar mi vida de felicidad y ser la razón para seguir adelante.



CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de un país se refleja en la infraestructura vial con la que se cuenta, y es por este motivo que la ejecución de un proyecto vial debe permitir el desarrollo agrícola, ganadero, económico, comercial y turístico de los pueblos. Sin embargo, una vía que inicialmente cuenta con un nivel de servicio adecuado, conforme el paso del tiempo, experimenta reducciones en su serviciabilidad que pueden afectar el confort y la seguridad de los transeúntes.

En la actualidad, la tecnología concerniente al análisis de estructuras de pavimentos ha permitido la implementación de técnicas para ensayos de alto rendimiento conocidas como pruebas No Destructivas (Non Destructive Test, NDT); de entre estas técnicas, se destaca la utilización del deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD), cuya función es la de analizar la condición estructural de los pavimentos mediante la interpretación de las deflexiones producidas bajo cargas dinámicas que simulan el efecto del tránsito (Avila & Bojorque, 2015). De esta manera, se puede determinar la transferencia de carga en juntas, estimar el módulo de reacción efectivo de la subrasante y el módulo de elasticidad de cada una de las capas que conforman el paquete estructural de un pavimento y a la vez permite establecer pautas para diseñar su rehabilitación.

Para el diseño de una rehabilitación es preciso realizar la evaluación tanto funcional como estructural del pavimento, cuyos resultados proporcionan información que posibilitan obtener las mejores alternativas para recuperar las condiciones del pavimento y alargar su vida útil.

La colocación de sobrecarpetas de pavimento asfáltico sobre pavimentos rígidos como medidas de rehabilitación, se basan en análisis realizados por la AASHTO, mismos que en la red vial estatal de nuestro país han sido adoptados con bastante éxito, de ahí se deriva el objeto de la presente investigación.

1.1 Antecedentes

La vía Cuenca - Molleturo - El Empalme es una arteria importante que une las provincias de Azuay y Guayas, por la misma diariamente circulan un gran número de vehículos (MTO, 2019) que con el pasar de los años han incrementado ostensiblemente su volumen lo que ha significado un importante incremento de las cargas que soporta la estructura del pavimento rígido de dicha carretera.

En virtud de lo antes señalado, es importante establecer un plan de rehabilitación de esta importante vía, por lo que es necesario realizar la evaluación estructural y definir, según sea



la necesidad, los espesores de sobrecarpeta asfáltica.

Para el diseño de la rehabilitación se emplea el método de la AASHTO 93, generalmente considerando la resistencia de la estructura a través del ensayo no destructivo como el FWD, del cual se establece la calidad de la estructura según el cuenco de deflexión que se produce en el ensayo al aplicar una carga normalizada. La AASHTO ha propuesto una formulación para normalizar la deflexión a una carga estándar (40 kN), sobre la base de la deflexión así normalizada se calculan los parámetros de deformabilidad de los diferentes materiales que conforman el paquete estructural del pavimento y por tanto los espesores de sobrecarpeta para su rehabilitación.

En los ensayos FWD la carga aplicada a la estructura no es exactamente la normalizada, por lo cual los valores obtenidos de deformación con diferente carga, deben ser corregidos a la carga normalizada. Dependiendo de la magnitud de la carga aplicada, el cuenco de deflexión variará, de ahí que entender el efecto que tiene la carga sobre el cuenco de deflexión es importante.

1.2 Justificación

Debido a su importancia de la vía Cuenca - Molleturo - El Empalme, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) realiza programas de mantenimiento para su conservación y extender su vida útil. Como punto de partida para la ejecución de estos programas de mantenimiento esta la recopilación de información del estado de la estructura del pavimento que la conforma con el uso del deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD). El diseño de pavimentos nuevos así como de sobrecarpetas para refuerzo estructural se ejecutan en base a la metodología inserta en el Manual de Diseño de Estructuras de Pavimentos de la AASHTO 93, por lo que se ha visto necesario realizar por medio de ensayos de estados de carga un análisis de validación del “factor de corrección por carga”, y determinar si la ecuación para la corrección por carga de la AASHTO 93 es aplicable en nuestro medio en base a los ensayos ejecutados en la vía Cuenca - Molleturo - El Empalme.

1.3 Alcance

La ejecución de este proyecto de investigación se lleva a cabo en la vía Cuenca - Molleturo - El Empalme, ubicado en las provincias de Azuay y Guayas. Mediante información del PCI (Pavement Condition Index) proporcionada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas MTOP, se seleccionaron dos segmentos de la vía para la ejecución de los ensayos deflectométricos aplicando diferentes estados de carga. El primer segmento tiene un PCI ubicado en el rango de 85 a 100 catalogado en los manuales de administración de pavimentos como una condición Excelente y el otro segmento se encuentra dentro del rango de 70 a 85 catalogado como Muy Bueno. Estos ensayos se realizaron en segmentos de 5 km según las



condiciones de PCI descritas

A través del uso del deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD), se ha realizado en total 102 ensayos de estado de carga en los centros de las losas de hormigón hidráulico que conforman la capa de rodadura de esta vía, la carga considerada para la ejecución de las pruebas deflectométricas varía en intervalos de 5 kN partiendo desde 35 kN hasta llegar a la carga de 55 kN obteniendo una serie de puntos que permitan a través de un análisis de regresión determinar una curva real del comportamiento de las deflexiones en función de la carga. Aplicando la metodología AASHTO 93, los resultados de deflexión provenientes de las pruebas deflectométricas son normalizados por la ecuación de corrección de carga que permite obtener las deflexiones correspondientes a la carga normalizada de 40 kN, un análisis de correlación con el resultado de deflexión proveniente de la curva real de comportamiento de las deflexiones permitirá conocer si la ecuación de la AASHTO es aplicable para los segmentos de la vía Cuenca - Molleturo - El Empalme escogidos para el análisis.

Con los resultados de deflexión corregidos por el factor de corrección por carga, mediante la metodología de retrocálculo de la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimento AASHTO 93 se obtendrán los parámetros de módulo de reacción de la subrasante k , módulo de elasticidad del concreto E_c y módulo de rotura del concreto S^c , donde se comprobará la influencia que tiene la carga aplicada durante el ensayo de deflectometría en los resultados de los parámetros estructurales. Además se ha realizado el cálculo del espesor de sobrecarpeta de refuerzo estructural requerido, evaluándose la variación de este espesor de acuerdo a la carga aplicada durante el ensayo deflectométrico una vez que esta haya sido normalizada.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Realizar la validación del factor de corrección de carga para el cálculo de deflexiones en pavimentos rígidos mediante la ejecución de estados de carga y su efecto en el cuenco de deflexión con el Deflectómetro de Impacto (FWD), aplicado a dos segmentos del pavimento rígido de la vía Cuenca - Molleturo - El Empalme.

1.4.2 Objetivos Específicos

Analizar a través de la aplicación de estados de carga realizados con el Deflectómetro de Impacto FWD el factor de corrección de carga dado por la AASHTO para el cálculo de deflexiones en pavimentos rígidos.

Determinar la influencia de la aplicación estados de carga en el cuenco de deflexión y en la obtención del módulo de reacción de la subrasante, módulo de elasticidad del concreto y módulo de rotura del concreto.



Realizar la comparación entre los espesores de la sobrecarpeta asfáltica para rehabilitación del pavimento resultante de la deflexión obtenida con la carga normalizada de la AASHTO a través de la aplicación de estados de carga, mediante el método de diseño de la AASHTO.

1.5 Estructura del Documento

Con el fin de abordar los temas propuestos en el alcance de este proyecto de titulación y para un desarrollo adecuado se ha decidido dividir este documento en los siguientes cinco capítulos.

- 1. Introducción:** En el presente capítulo se indica el alcance del proyecto, así como la metodología que se empleará para el desarrollo del proyecto de titulación y los objetivos que se persiguen.
- 2. Marco Conceptual:** Se presenta una descripción de la estructura de los pavimentos que conforman una red vial típica, así como los conceptos básicos concernientes a los parámetros relacionados con la subrasante y la capa de rodadura, una descripción de la evaluación funcional y estructural de un pavimento este último incluye los métodos de auscultación destructivos y no destructivos haciendo mayor énfasis en la deflectometría de impacto y los resultados que se obtienen de este proceso. Este capítulo, adicionalmente, contiene la descripción de la metodología de retrocálculo presentada por AASHTO para la obtención de parámetros empleados en el diseño de estructuras de pavimento rígido a partir de ensayos de deflectometría. Finalmente, se describe la metodología para el diseño de sobrecarpetas de hormigón asfáltico contenidas en el manual de diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO 93.
- 3. Desarrollo:** Este capítulo contiene la metodología para recolección de información en campo y los resultados que se obtuvieron a partir de los ensayos de deflectometría. Adicionalmente, contiene los resultados producto de la aplicación de la metodología AASHTO 93 para la obtención de parámetros de diseño de pavimentos rígidos y el diseño de la sobrecarpeta de hormigón asfáltico para los diferentes escenarios planteados en la metodología de trabajo.
- 4. Análisis de resultados:** En función de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología AASHTO 93 se realiza una interpretación de los parámetros obtenidos para los estados de carga propuestos en la metodología de trabajo, además de un análisis de correlación. Se analiza la influencia de las cargas de aplicación en los ensayos deflectométricos en la obtención de espesores de sobrecarpetas, todo esto con relación a la carga normalizada dada por la AASHTO.



- 5. Conclusiones y recomendaciones:** Finalmente, este capítulo comprende en presentar las conclusiones que se han surgido en el desarrollo del proyecto, así como recomendaciones para el desarrollo de futuras investigaciones.

CAPÍTULO 2

En este capítulo se realiza una descripción de los conceptos generales básicos concernientes al campo de pavimentos, diseño, evaluación y rehabilitación que se emplean en el desarrollo del presente proyecto de titulación. Dentro del área de evaluación de pavimentos se detalla a mayor profundidad los métodos no destructivos mediante el empleo de dispositivos de carga de impulso (Deflectómetro de Impacto FWD) y la información que permite recolectar en campo. Adicionalmente, se realiza una revisión del manual de diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO 93 en lo referente al capítulo de obtención de parámetros de la subrasante y de la losa de concreto mediante la metodología de retrocálculo y su aplicación en la rehabilitación de pavimentos mediante la implementación de sobrecarpetas de hormigón asfáltico.

2 MARCO CONCEPTUAL

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados (Montejo, 2002). Esta estructura está colocada sobre una subrasante la misma que debe tener características adecuadas para que en conjunto tengan la capacidad de soporte adecuado de las cargas de tráfico que se consideran dentro de un lapso de tiempo determinado conocido como periodo de diseño. En general, la capa de rodadura se clasifica en dos grupos de pavimentos; rígidos y flexibles.

2.1 Pavimento rígido

Es una estructura de pavimento que distribuye las cargas a la subrasante, consta de una losa de concreto de cemento portland de resistencia a la flexión relativamente alta (AASHTO, 1993). La distribución de las cargas se realiza de tal manera que los esfuerzos que se producen en la subrasante son bajas. El costo inicial en la construcción de estos pavimentos es superior a los flexibles. La vida útil de este tipo de pavimentos varía de 20 a 40 años (AASHTO, 1993) donde el mantenimiento se enfoca en las juntas y al drenaje. En la Figura 2.1 se muestra la estructura típica de un pavimento rígido.

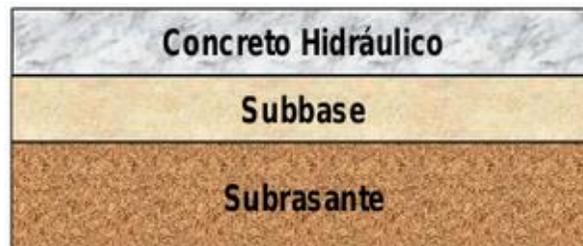


Figura 2.1. Estructura de pavimento rígido.

2.2 Pavimento flexible

Esta estructura de pavimento consta de una capa de rodadura bituminosa, la cual se encuentra sobre dos capas granulares que son la base y la subbase tal como se muestra en la Figura 2.2.

El dimensionamiento de las diferentes capas que conforman este paquete estructural obedece a las necesidades de soportar de manera adecuada las cargas de tráfico que actúan dentro del periodo de diseño. Las desventajas que presenta este pavimento con relación a los pavimentos rígidos es que su periodo de vida útil es inferior mismo que varía de 15 a 20 años además las obras de mantenimiento a realizarse sobre este son mayores para poder cumplir con su vida útil.



Figura 2.2. Estructura de pavimento flexible

2.3 Conceptos básicos

2.3.1 Módulo de reacción de la subrasante (k)

Para diseñar un pavimento es necesario conocer, entre otros factores, la reacción o soporte de la subrasante. Esta resistencia, generalmente, se evalúa a través del módulo de reacción de la subrasante.

Este factor da idea de cuánto se asienta la subrasante cuando se le aplica un esfuerzo de compresión. Numéricamente, es igual a la carga en libras por pulgada cuadrada (psi) sobre un área de carga, dividido por la deflexión en pulgadas para esa carga (AASHTO, 1993). Para obtener este parámetro se aplica la prueba de carga sobre placa la cual consiste en una placa circular de 30 pulgadas de diámetro tal como se muestra en la Figura 2.3. Se aplica una carga a una velocidad normada hasta que marque una presión de 10 psi, esta presión permanece constante hasta que la flexión aumente no más de 0.001 pulg por minuto durante tres minutos. Se realiza el promedio de los tres valores obtenidos cada minuto siendo este resultado el valor de la deflexión. Esta prueba resulta costosa y requiere de tiempo en la ejecución del ensayo, por tal motivo el valor de “k” es estimado a través de correlaciones con ensayos más sencillos como lo es el Californian Bearing Ratio (CBR), este resultado es un valor estimado y su variabilidad no afecta considerablemente el diseño de espesores.

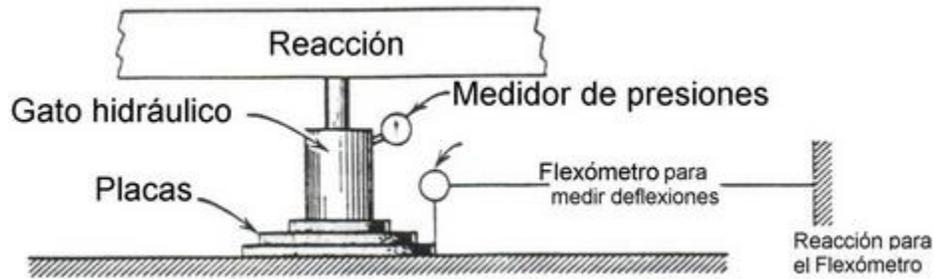


Figura 2.3. Ensayo de carga sobre placa (Huang, 2004)

2.3.2 Módulo resiliente de la subrasante (M_r)

El paso de los vehículos sobre un pavimento somete a esta a ciclos de carga y descarga mismas que producen esfuerzos y deformaciones, sin embargo, si la resistencia del material es mayor a las cargas impuestas y la deformación es recuperable (proporcional a la carga) se considera que tienen un comportamiento elástico. La mayoría de los materiales de pavimentación no son elásticos, pero experimentan una deformación permanente después de cada aplicación de carga (Huang, 2004).

Hveem y Carmany en 1948 reconocieron que el módulo de elasticidad dinámico para subrasantes es un parámetro de gran importancia para entender el agrietamiento (por fatiga) de las superficies de asfalto y que la carga monotónica podría no ser la adecuada para su determinación (Huang, 2004).

En la Figura 2.4 se muestra un espécimen sometido a una carga repetitiva, donde se aprecia que al inicio de la aplicación de la carga existe una deformación considerable, pero conforme aumenta las repeticiones de carga esta deformación va disminuyendo por lo que al final es prácticamente recuperable, tal como lo indica el valor ϵ_{axial} .

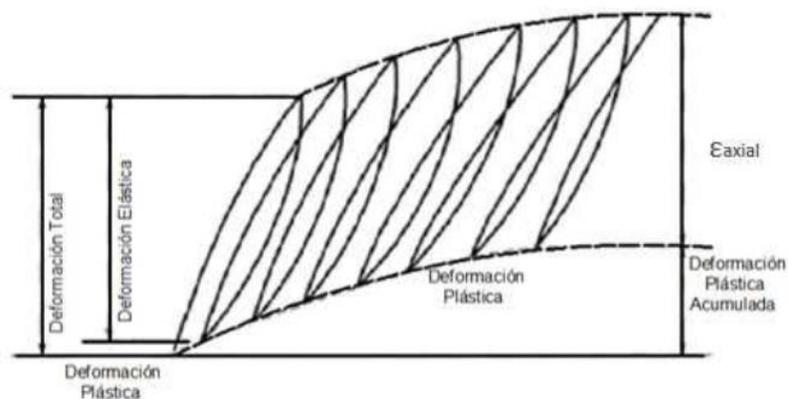


Figura 2.4. Deformación de un espécimen bajo cargas repetitivas (Huang, 2004).



El módulo elástico basado en la tensión recuperable bajo cargas repetidas se llama módulo resiliente M_r , y está definido por la Ecuación 2.1 como:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_{axial}} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

σ_d es el esfuerzo desviador de una prueba de compresión no confinada o el esfuerzo desviador en una prueba de compresión triaxial.

2.3.3 Coeficiente de Poisson (ν)

El coeficiente de Poisson se define como la relación entre la deformación lateral y la deformación axial. Durante la prueba de módulo resiliente, se pueden medir deformaciones axial y lateral, lo que conlleva a determinar la relación de Poisson. El coeficiente de Poisson tiene un efecto relativamente pequeño en la respuesta de los pavimentos y se acostumbra asumir un valor razonable para usar en diseño (Huang, 2004). La Tabla 2.1, muestra los valores de coeficiente de Poisson para diferentes tipos de materiales empleados para construcción de pavimentos.

Tabla 2.1. Coeficientes de Poisson para diferentes materiales (Huang, 2004)

Material	Rango	Valor Típico
Mezcla Asfáltica en Caliente	0.30–0.40	0.35
Cemento portland	0.15–0.20	0.15
Materiales granulares sin tratar	0.30–0.40	0.35
Materiales granulares tratados con cemento	0.10–0.20	0.15
Suelos granulares finos tratados con cemento	0.15–0.35	0.25
Materiales estabilizados con cal	0.10–0.25	0.20
Mezcla de ceniza–cal	0.10–0.15	0.15
Arena limosa o arena suelta	0.20–0.40	0.30
Arena densa	0.30–0.45	0.35
Suelos granulares finos	0.30–0.50	0.40
Arcillas suaves saturadas	0.40–0.50	0.45

2.3.4 Módulo de elasticidad del concreto (E_c)

Es un parámetro que indica la rigidez y la capacidad de distribuir cargas que tiene una losa de pavimento. Es la relación entre la tensión (esfuerzo) y la deformación. Las deflexiones, curvaturas y tensiones están directamente relacionadas con el módulo de elasticidad del concreto. En los pavimentos de concreto armado continuo, el módulo de elasticidad junto con el coeficiente de expansión térmica y el de contracción del concreto, son los que rigen el estado de tensiones en la estructura (AASHTO, 1993). El Instituto Americano del Concreto



(ACI, por sus siglas en inglés) propone la siguiente relación entre el módulo de elasticidad del concreto y su resistencia a la compresión simple tal como se muestra en la Ecuación 2.2:

$$E_c = 57000(f'_c)^{0.5} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

f'_c : Resistencia a compresión del concreto en psi.

La Tabla 2.2 muestra los rangos valores de módulo de elasticidad para los diferentes materiales empleados en pavimentos.

Tabla 2.2. Módulos de elasticidad de materiales. (Pavement Research Center, 2008)

Material	Rango E (psi)	Valor típico (psi)
Hormigón	2030530 - 8122110	3625940
Concreto asfáltico	69620 - 2030530	398850
Base granular	10150 - 145040	50040
Subbase granular	4931 - 29000	14500
Suelo estabilizado	10150 - 203050	50040

2.3.5 Módulo de rotura del concreto ($S'c$)

El módulo de rotura del concreto ($S'c$) es un parámetro muy importante como variable de entrada para el diseño de pavimentos rígidos, ya que va a controlar el agrietamiento por fatiga del pavimento, originado por las cargas repetitivas de camiones. Se le conoce también como resistencia a la tracción por flexión del concreto (AASHTO, 1993).

Una losa de hormigón que es sometida a cargas de tráfico experimenta esfuerzos de flexión y compresión producto de la flexión que se produce en esta, por tal motivo, el módulo de rotura del hormigón es un parámetro importante en el diseño de pavimentos rígidos ya que el espesor de la losa se ve directamente afectada por el esfuerzo de flexión producido.

El módulo de rotura del concreto se obtiene a partir del ensayo de flexión sobre una viga de hormigón a los 28 días aplicando la carga a los tercios, sin embargo, puede ser determinado a través de correlaciones entre la resistencia a compresión o la resistencia a tracción indirecta.

- Estimación a través de la resistencia a compresión del concreto a través de la Ecuación 2.3.

$$S'c = k(f'_c)^{0.5} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

f'_c : Resistencia a compresión del concreto en psi.



k : constante cuyo valor esta entre 7 y 12 para resistencia del hormigón a los 28 días

- Estimación a través de la resistencia a la tracción indirecta a través de la Ecuación 2.4.

$$S'c = 210 + 1.02 IT \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

IT: Tracción indirecta medida en las probetas en psi.

Los valores del módulo de rotura varían entre 2.8 MPa (400 psi) y 4.8 MPa (700 psi), llegando incluso a valores de 8.2 MPa (1200 psi), en concretos con alta resistencia inicial (AASHTO, 1993).

2.3.6 Evaluación de pavimentos

Procedimiento mediante el cual se determina el estado en el que se encuentra un pavimento tanto superficial como estructuralmente, y a través de los resultados obtenidos elaborar programas de mantenimiento y rehabilitación.

2.3.7 Evaluación funcional de pavimento

Es el reconocimiento de aquellas deficiencias que se relacionan principalmente con la calidad de la superficie y el estado general de las condiciones del pavimento, considerando todos aquellos factores que afectan negativamente a la serviciabilidad, seguridad y costos del usuario.

2.3.8 Evaluación estructural de pavimento

La evaluación estructural del pavimento, tiene por objeto la cuantificación de la capacidad estructural remanente del pavimento. La falta de capacidad estructural de un pavimento genera en este un deterioro progresivo que se manifiesta en niveles excesivos de agrietamientos y deformaciones, no recuperables a través de la simple aplicación de acciones de conservación preventivas.

2.3.9 Auscultación

Es la exploración de un tramo carretero a través de equipos puntuales o de alto rendimiento que generan datos que permiten conocer el estado físico en el que se encuentra cada tramo (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2013-2018).

2.3.10 Deflexión

Es la medida de deformación elástica o de movimiento vertical que experimenta un pavimento al paso de una carga y está en función, no sólo del tipo y estado del pavimento sino también del método y dispositivo de medición, así como la temperatura y humedad de la sección de pavimento (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2013-2018).

2.3.11 Rehabilitación de pavimentos

Trabajo realizado para extender la vida útil de un pavimento existente. Esto incluye la colocación de material de superficie adicional y/u otro trabajo necesario para devolver una calzada existente, incluidos los arcenes a una condición de adecuación estructural o funcional. Esto podría incluir la eliminación completa y el reemplazo de la estructura del pavimento (AASHTO, 1993).

2.4 Evaluación de pavimentos

El diagnóstico de un pavimento a través de la identificación y valoración de su condición actual son de gran importancia para implementar alternativas con el fin de mejorar su desempeño aplicando procesos de rehabilitación que a la vez brindará un mejor servicio a los usuarios y una mayor vida útil de la infraestructura vial.

La evaluación de pavimentos tiene varios usos y se pueden distinguir cuatro grandes áreas de aplicación: estudios de rehabilitación de pavimentos, control de calidad, investigación, y gestión de pavimentos. En éstas se emplean equipos similares y lo que varía es el propósito de la evaluación (Chang Albitres, 2010) tal como muestra la Figura 2.5. Campos de aplicación de la evaluación de pavimentos

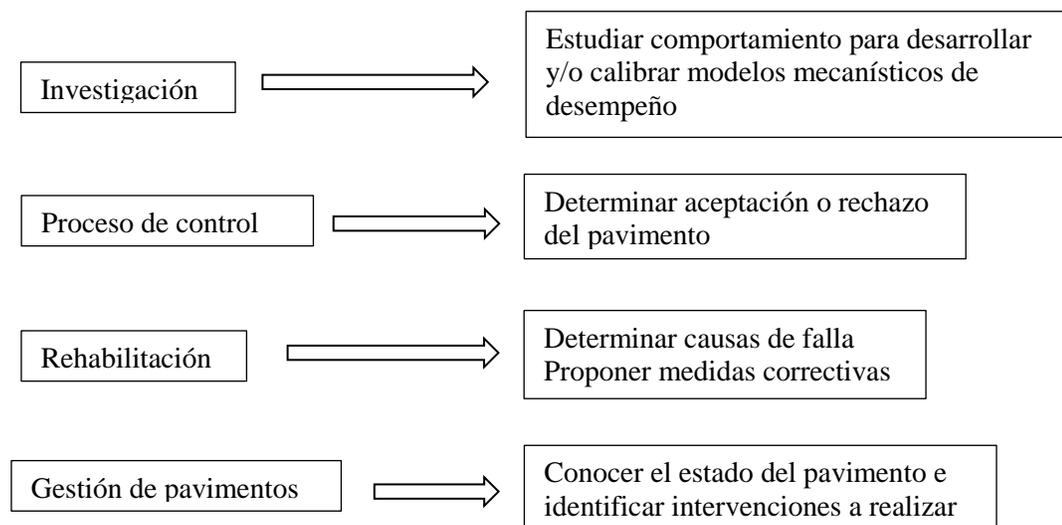


Figura 2.5. Campos de aplicación de la evaluación de pavimentos (Chang Albitres, 2010)



La evaluación de un pavimento se lo hace a través de parámetros que permiten caracterizar la condición funcional y estructural de un pavimento (Avila & Albarracín, 2014). La evaluación de un pavimento comprende la evaluación funcional y la evaluación estructural, se puede describir a la condición funcional como el confort que experimenta el usuario durante su traslado en una vía, por otra parte, la condición estructural comprende la capacidad de un pavimento para responder satisfactoriamente a las cargas de tráfico impuestas.

2.4.1 Evaluación funcional de pavimentos

El objetivo de la evaluación funcional es de determinar el estado de la superficie del pavimento en base al reconocimiento de las denominadas fallas de carácter funcional y como estas inciden en los usuarios de manera perceptual, esto es, la deficiencia en la fricción superficial, textura rugosa, efectos de hidroplaneo, ahuellamientos, hundimientos, asentamientos etc. Los indicadores empleados en una evaluación funcional son el PSI, IRI y PCI.

- **Índice de Condición del Pavimento (PCI – Pavement Condition Index)**

El Índice de Condición del Pavimento (PCI) se constituye en la metodología más completa para la evaluación y calificación objetiva de pavimentos, flexibles y rígidos, dentro de los modelos de Gestión Vial disponibles en la actualidad. La metodología es de fácil implementación y no requiere de herramientas especializadas (Vásquez, 2002).

La metodología se basa en la determinación de carácter visual del tipo de daño presente en la superficie, su severidad y la densidad presente, el valor numérico obtenido en este proceso el cual varía de 0 a 100 es calificado cualitativamente y de esta manera representar la condición superficial del pavimento, además, el PCI permite identificar la relación con los agentes que producen estos daños sea estos el clima o las cargas del tráfico. La Tabla 2.3 muestra los rangos de PCI a los cuales se les asignan su calificación cualitativa.

Tabla 2.3. Rangos de calificación de PCI. (Vásquez, 2002)

Rango	Clasificación
100 – 85	Excelente
85 – 70	Muy Bueno
70 – 55	Bueno
55 – 40	Regular
40 – 25	Malo
25 – 10	Muy Malo
10 - 0	Fallado

Dependiendo del tipo de superficie se han catalogado una serie de patologías que se emplean para la determinación del PCI (Vásquez, 2002). La Figura 2.6 presenta las patologías en pavimentos flexibles y la Figura 2.7 las patologías en pavimentos rígidos.

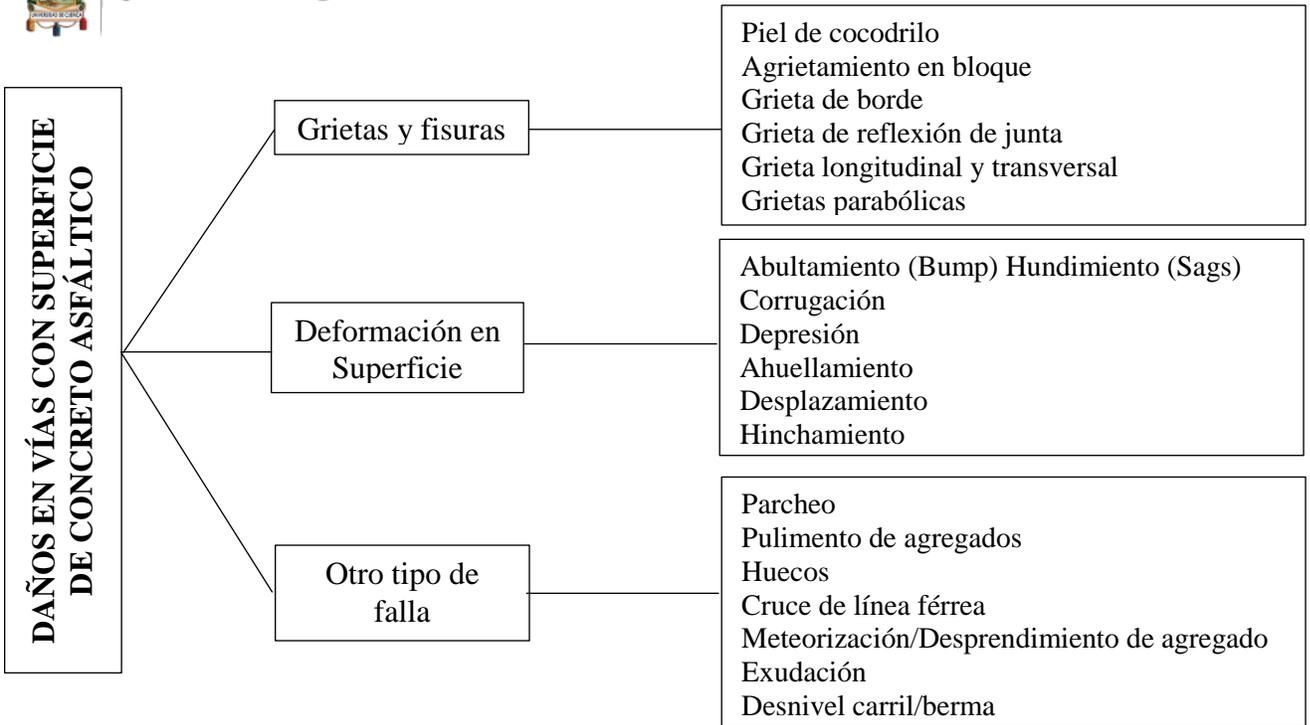


Figura 2.6. Patologías en Pavimentos Flexibles

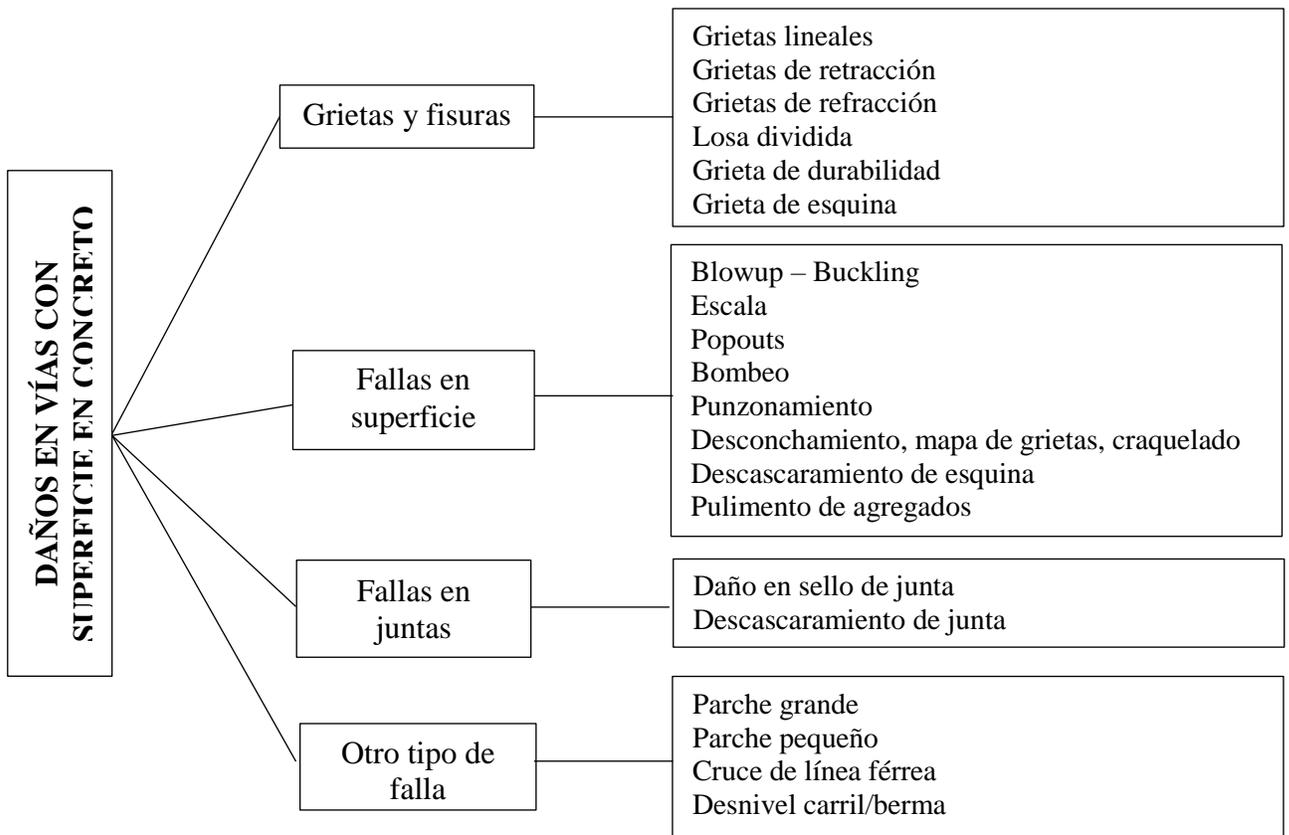


Figura 2.7. Patologías en Pavimentos Rígidos

▪ Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

La irregularidad o rugosidad de la superficie de una vía es una medida de su serviciabilidad, es decir, refleja el grado de comodidad del usuario (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998). La determinación del valor de IRI se basa en realizar la sumatoria de los desplazamientos del sistema de suspensión del vehículo tipo dividida para la distancia de recorrido del vehículo a una velocidad de 80 km/h, las unidades con las cuales se representa el valor de IRI son mm/m ó m/km. La Figura 2.8 muestra las escalas de IRI que dependen del tipo de vía, edad y la condición superficial.

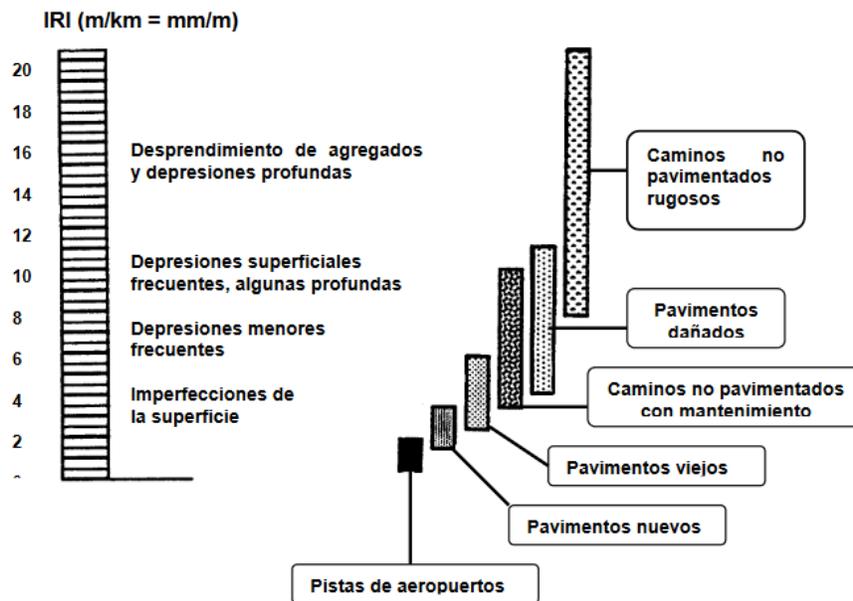


Figura 2.8. Escala de valores del IRI y las características de los pavimentos. (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998)

▪ Índice de servicio (PSI)

El índice de servicio se basa en proporcionar una calificación a la vía tomando en consideración el grado de confort y la seguridad que proporciona al usuario cuando este se desplaza a la velocidad de operación. La calificación cualitativa de una vía en función de su PSI se lo realiza mediante una escala cuyo valor mínimo es de 0 para una superficie intransitable (menor nivel de serviciabilidad) y de 5 para una vía en óptimas condiciones perfectas (mayor nivel de serviciabilidad). Para pavimentos rígidos se recomienda que el índice de serviciabilidad inicial sea de 4.5 y para pavimentos flexibles sea de 4.2 (U.S. Department of Transportation, 2017). La Tabla 2.4 muestra la escala de medición de nivel de serviciabilidad.

Tabla 2.4. Escala de Índice de Servicio. (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998)

5		Muy bueno
4		Bueno
3		Regular
2		Malo
1		Pésimo
0		

El tiempo es un factor que influye directamente en la serviciabilidad de un pavimento ya que mientras pasa el tiempo esta va disminuyendo tal como se muestra en la Figura 2.9, la selección del índice de capacidad de servicio terminal o PSI más bajo permitido se basa en el valor más bajo que se tolerará antes de que sea necesaria la rehabilitación, repavimentación o reconstrucción. Se sugiere un índice de 2.5 o superior para el diseño de las principales autopistas y 2.0 para las carreteras con menores volúmenes de tráfico (AASHTO, 1993).

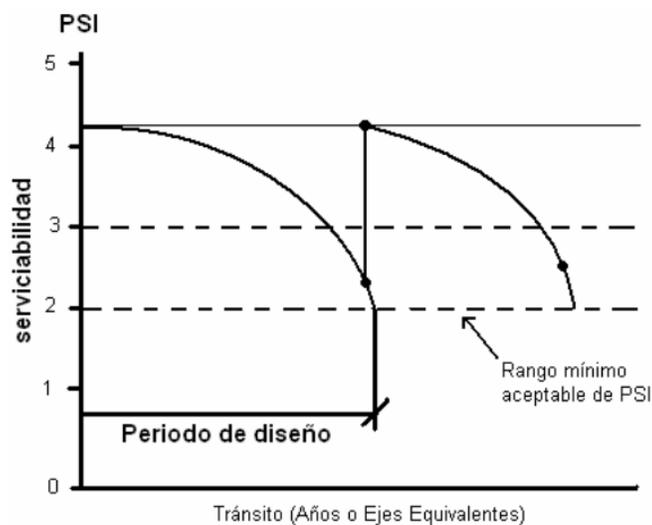


Figura 2.9. Nivel de Servicio vs. Tiempo. (Barrantes & Sibaja, 2008)

2.4.2 Evaluación estructural de pavimentos

La evaluación estructural de un pavimento consiste en la determinación de la capacidad que tiene la estructura pavimento - subrasante para responder ante los esfuerzos que le produce la carga de tráfico impuestas durante cualquier etapa de funcionamiento y a la vez constituye un insumo para establecer la necesidad de realizar una rehabilitación para mejorar sus características y prolongar su vida útil.

Existen dos maneras de obtener información acerca del estado estructural de una vía, la primera es mediante la realización de pruebas destructivas, las cuales consisten en realizar la

toma de muestras de campo ya sea realizando calicatas o extracción de núcleos, las cuales implican realizar ensayos en laboratorio para determinar sus características mecánicas que tiene los materiales dentro el periodo de vida del proyecto, este procedimiento si bien es aun usado actualmente constituye una práctica lenta para obtención de información. Por otro lado, el avance tecnológico en evaluación estructural de pavimentos ha permitido en la actualidad realizar pruebas no destructivas NDT (non destructive test), mismas que se basan en realizar pruebas en la superficie del pavimento a través de deflexiones producidas por el impacto de una carga sobre esta, de la cual se obtiene información valiosa respecto a la estructura del pavimento y por medio de un proceso matemático se obtienen las características mecánicas del paquete estructural, razón por la cual esta metodología resulta ser sencilla, rápida y a la vez económica.

Métodos Directos de Auscultación

Los métodos de auscultación directos para evaluación de pavimentos son de carácter destructivo debido a que para obtener información es necesario realizar una alteración de la estructura del pavimento, esta metodología presenta algunas desventajas como lo es que se requiere mayor cantidad de tiempo para obtener información, los costos son representativos y además producen interrupciones de tráfico (Escobar, García, & Guzmán, 2007). A continuación, se realiza una breve descripción de los métodos directos de auscultación que se emplean normalmente.

- **Calicatas**

Consiste en realizar una excavación de sección cuadrada en la vía cuya dimensión estándar es de 1.5 x 1.5 m y una profundidad máxima de 2 m, esta se realiza de manera mecánica (Figura 2.11) o de manera manual (Figura 2.10). A través de esta práctica se obtiene información referente a espesores de las capas del paquete estructural además de obtener la cantidad suficiente de material de las capas del pavimento para realizar ensayos en estos y así caracterizarlas mediante ensayos de laboratorio tales como CBR, Proctor, humedad, granulometría y densidades (Corros, Urbáez, & Corredor, 2009).



Figura 2.11. Calicata realizada a máquina.
(Corros, Urbáez, & Corredor, 2009)



Figura 2.10. Calicata realizada a mano.
(Escobar, García, & Guzmán, 2007)

▪ Extracción de Núcleos o Testigos

El proceso de extracción de núcleos (Figura 2.12) permite identificar el espesor de la capa de rodadura del pavimento sea este hormigón asfáltico u hormigón hidráulico, los cilindros extraídos tienen un diámetro que oscila entre 10 a 15 cm (Figura 2.13) y el fin de la obtención de estos cilindros es de ensayarlos en laboratorio para obtener propiedades concernientes a la resistencia del pavimento, el buen rendimiento en este ensayo depende del estado del equipo, pericia del operador y la distancia de la ejecución de los ensayos (Corros, Urbáez, & Corredor, 2009).



Figura 2.12. Extracción de núcleos. (Corros, Urbáez, & Corredor, 2009)



Figura 2.13. Núcleos de pavimento. (Corros, Urbáez, & Corredor, 2009)

Métodos Indirectos de Auscultación

Se le puede llamar métodos indirectos de evaluación estructural, a aquellos métodos con los cuales se logra determinar la capacidad estructural del pavimento, sin tener que dañar la estructura, dichos métodos se basan en hipótesis y modelos matemáticos (Escobar, García, & Guzmán, 2007). Este tipo de ensayo no destructivo radica en la obtención de un cuenco de deflexión determinado a partir de aplicar una carga normada sobre la superficie y mediante un proceso de retrocálculo se obtiene las características estructurales del sistema pavimento - subrasante.

▪ Prueba de Deflexión

La medición no destructiva de las deflexiones del pavimento proporciona información que puede utilizarse para el análisis estructural del sistema de pavimento. La serie de deflexiones medidas o cuencas de deflexión pueden servir como entradas para modelos que estiman la rigidez general del sistema de pavimentos, el módulo de elasticidad efectivo de las capas de pavimento individuales o un espesor equivalente de un material de referencia mediante procedimientos conocidos como retrocálculo (ASTM Standars).

Estos ensayos constituyen un mecanismo rápido y sencillo para la evaluación de pavimentos flexibles, rígidos y compuestos (recapeados), y a través de los resultados obtenidos se realiza la planificación de proyectos de rehabilitación y/o reconstrucción de pavimentos. La prueba deflectométrica se basa en la aplicación de una carga determinada al pavimento y las deflexiones producidas sobre la superficie las cuales son leídas por dispositivos ubicados a distancias normadas del punto de aplicación de la carga las cuales forman un cuenco de deflexión (Figura 2.14) el mismo que permitirá identificar el estado de la estructura del pavimento.

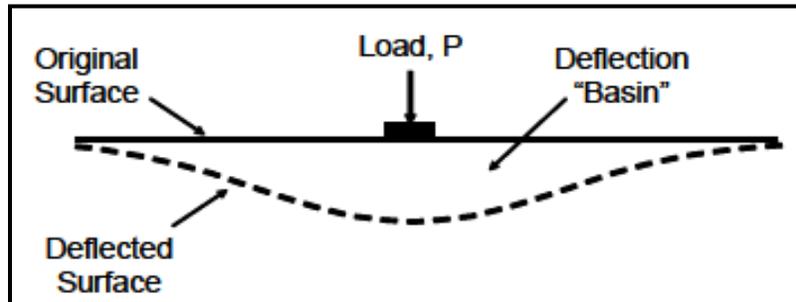


Figura 2.14. Diagrama de cuenco de deflexión. (U.S. Department of Transportation, 2017)

▪ Tipos de Dispositivos de Prueba de Deflexión

Existen tres métodos de realizar pruebas deflectométricas, siendo estas la prueba de carga estática, carga en estado estacionario y carga por impulso (U.S. Department of Transportation, 2017), cuyas características se describen a continuación:

Carga estática: El equipo empleado para realizar esta prueba es la Viga Benkelman, este método se basa en un brazo cuya punta es colocada entre los neumáticos de un camión de neumáticos duales cuya carga en el eje es de 80 kN (18000 lb) tal como se indica en la Figura 2.15, los neumáticos tienen una presión de inflado de 480 kPa (70 lb) según lo indicado en la ASTM International Designation D 4695-96. El vehículo al moverse hacia adelante provoca que el pavimento experimente una deflexión misma que es leída por el dial. La desventaja del uso de este método de carga estática es que no refleja la realidad, es decir, no simula el efecto de la carga que producen los vehículos sobre la superficie de un pavimento ya que este efecto tiene un comportamiento dinámico, además de no obtenerse un cuenco de deflexión producido por la carga ya que únicamente se obtiene un valor absoluto de deflexión máxima (U.S. Department of Transportation, 2017)



Figura 2.15. Viga Benkelman. (U.S. Department of Transportation, 2017)

Carga dinámica en estado estacionario: La ejecución de esta prueba se lleva a cabo mediante el uso de un generador de produce una carga oscilatoria en la superficie del pavimento tal como se muestra en la Figura 2.16, la carga producida por el dispositivo es de 4.5 kN (1000 lb) cuyas lecturas de deflexión producidas por estas son leídas por cuatro o más sensores con una resolución de 0.0001 mm o mejor conforme a lo especificado en la ASTM International Designation D 4695-96. Lo que resalta en este método es que al estar constituido por sensores que toman lecturas de deflexión en varios puntos a una distancia definida desde el punto de aplicación de carga permiten la formación del cuenco de deflexión el mismo que permite analizar el comportamiento del sistema subrasante - pavimento, la limitación en su uso es principalmente debido a que durante la ejecución de las pruebas se debe realizar un control de tráfico existente ya que la vibración que ocasionan afecta las lecturas, además la carga aplicada durante el ensayo es notablemente inferior a la del vehículo comercial empleado en diseño de pavimentos lo que provoca que las características de la subrasante obtenida con este método no sean reales llegando a subestimar sus características (Avila & Albarracín, 2014).



Figura 2.16. Carga dinámica en estado estacionario. (U.S. Department of Transportation, 2017)

Carga de impulso: La carga de impulso es producida debido a la caída vertical desde una altura determinada de un peso sobre un sistema de amortiguación de goma o resorte (según la carga requerida depende la altura de caída), las lecturas de la deflexión en la superficie es tomada por un sistema de sensores espaciados a distancias definidas desde el punto de aplicación de la carga (ver Figura 2.17), el sistema es capaz de producir una carga de 40 kN (9000 lb) o más lo que permite obtener un cuenco de deflexiones acorde a la realidad ya que permite simular el paso de un camión (vehículo comercial) por la superficie del pavimento, además no solo se obtienen resultados de interacción de pavimento con la subrasante sino también las condiciones de cada una de las capas que conforman el paquete estructural del pavimento, toda la recopilación de información es obtenida en tiempos cortos lo que es beneficioso en comparación a los métodos anteriormente expuestos.

Es por esto que el uso de esta metodología se ha convertido en la manera más eficaz y más completa de obtener resultados confiables en lo que se refiere a evaluación estructural de pavimentos.



Figura 2.17. Carga de impulso. (U.S. Department of Transportation, 2017)

2.5 Ensayo de deflectometría de impacto

Este ensayo es un tipo de prueba de carga de placa (ASTM Standars). La carga que se genera para la ejecución del ensayo es producto de un impulso proporcionado por un peso que cae sobre un sistema de amortiguadores y se transmite a una placa que esta sobre la superficie del pavimento, el equipo para pruebas deflectométricas es trasladado mediante un remolque que ha sido adecuado para su movilización o puede estar dentro de un vehículo para su traslado.

Cuando el vehículo se encuentra en posición para realizar el ensayo la placa y los sensores descienden hacia la superficie, el peso asciende hacia la altura determinada con el fin de proporcionar el impulso, cuando este cae proporciona la carga sobre la placa, este golpe produce una deflexión en la superficie cuya lectura es tomada por los sensores, posterior a la



toma de lecturas de deflexión tanto la placa como los sensores toman la posición de transporte para desplazarse al nuevo punto de ensayo. Las lecturas realizadas por los sensores durante el impacto son registradas en micrómetros, milésimas de pulgada según la configuración del equipo, de igual manera la fuerza producida por el peso está configurada en kN o Lbf o mediante el esfuerzo producido sobre la placa (carga dividida para el área de la placa) en kN/m^2 o psi.

2.5.1 Propósito de las Pruebas Deflectométricas

La finalidad de los ensayos deflectométricos es la de determinar las condiciones en las que se encuentra un pavimento existente y determinar su capacidad de respuesta bajo futuras cargas de tráfico, bajo estos principios se determinará en el caso de pavimentos flexibles el módulo elástico (E) del paquete estructural, así como el módulo elástico (M_r) de la subrasante. En el caso de pavimentos rígidos las pruebas deflectométricas permiten determinar el módulo elástico (E_c) de la losa de hormigón, el módulo de reacción de subrasante (k) y evaluar la eficiencia de la transferencia de carga a través de las juntas.

Los parámetros obtenidos de las pruebas deflectométricas tienen diferentes aplicaciones: (CIM GROUP, 2014)

- Diseño de pavimentos.
- Eficiencia en la transferencia de carga.
- Detección de vacíos.
- Determinar la condición actual y futura del pavimento bajo cargas de tráfico.
- Calcular tensiones y deformaciones en la estructura del pavimento.
- Dimensionar espesores de recapeo para futuras cargas de tráfico.
- Evaluación de pavimentos en diferentes épocas estacionales.
- Caracterización estructural del pavimento mediante determinación de deflexiones empleando métodos avanzados de retro-análisis.
- Permite desarrollar soluciones económicas de rehabilitación o mantenimiento preventivo de menor costo.
- Permite realizar pruebas de análisis de rutina durante los proyectos de construcción y rehabilitación de pavimentos, utilizadas para el control de calidad, recepción de obras y optimización de presupuestos en los programas de mantenimiento y rehabilitación.

2.5.2 Deflectómetro de Impacto

El deflectómetro de impacto es un equipo empleado para realizar ensayos no destructivos NDT sobre pavimentos con la finalidad de evaluarlos estructuralmente, tiene un alto rendimiento en comparación con otros dispositivos para evaluaciones estructurales debido a su rapidez en la ejecución del ensayo, y la vasta información que se obtiene. Al ser un ensayo de carga dinámica reproduce de mejor manera el paso de los vehículos sobre el pavimento,

la duración del impacto varía entre 20 a 30 milisegundos lo que representa a un vehículo que circula a una velocidad entre 60 a 70 km/h (Avila & Albarracín, 2014). Los sensores con los que cuenta permiten la construcción de un cuenco de deflexión que a través de un procedimiento conocido como retrocálculo o cálculo inverso permite la determinación de la capacidad de la subrasante que sostiene el paquete estructural.

El deflectómetro de impacto se fundamenta en la generación de una onda de carga en el pavimento o sobre la capa por estudiar. La onda es ocasionada por el impacto de la caída de una masa y es transmitida al pavimento por medio de un sistema de amortiguadores elásticos apoyados sobre una placa de carga (Higuera, 2009).

El sistema (Figura 2.18) cuenta con una serie de sensores ubicados a distancias “ r ” normadas para coleccionar los datos de deflexión sobre la superficie en cada punto donde estos están ubicados en el momento de realizar el ensayo, estas distancias generalmente están ubicadas a 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 cm desde el eje del punto de aplicación de la carga, el movimiento vertical producido por la carga normada (40 kN) produce la deflexión “ d_r ”, cuya lectura es tomada por el sensor ubicado en el eje del plato de carga. El uso del FWD es tanto en pavimentos rígidos como pavimentos flexibles y dependiendo del tipo de superficie la determinación de los parámetros. En pavimentos flexibles, el parámetro a determinarse es el módulo resiliente de la subrasante, mientras que en pavimentos rígidos se determina la transferencia de carga en juntas, módulo de reacción efectivo de la subrasante y el módulo de elasticidad del concreto.

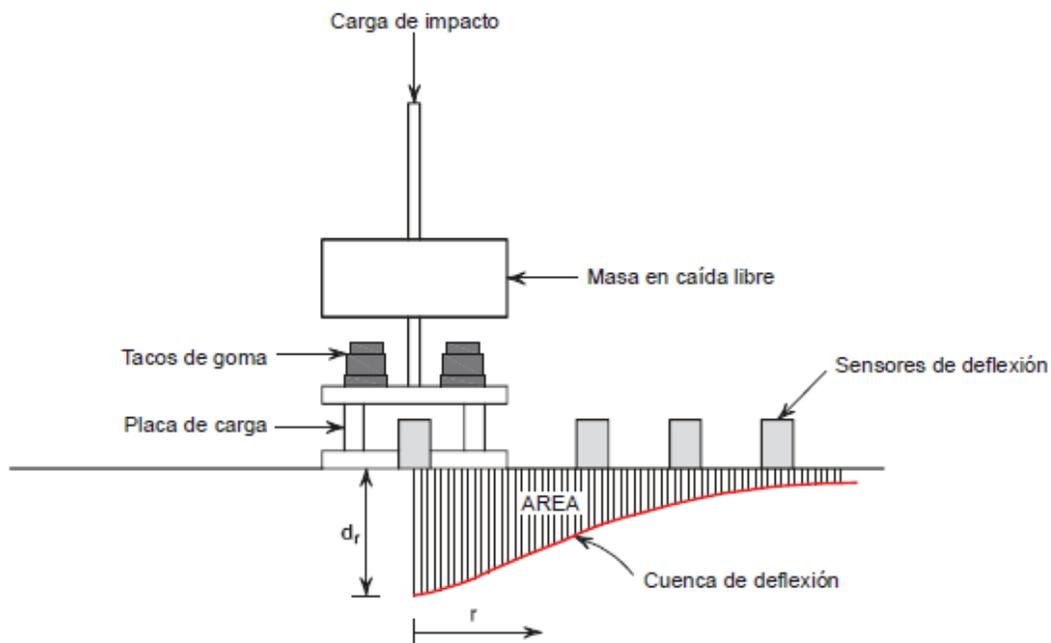


Figura 2.18. Esquema de funcionamiento del deflectómetro de impacto. (Higuera, 2009)



Conforme a la ASTM International Designation D 4695-96 (ASTM Standards), se establecen tres tipos de niveles de ejecución de ensayos, esto es conforme al nivel de detalle que se requiere para la evaluación del pavimento.

- **Nivel 1:** Estos ensayos se ejecutan en intervalos de 200 a 500 m, dependiendo de las condiciones específicas del pavimento, es recomendable realizar un mínimo de 5 a 10 ensayos por tramo uniforme esto para obtener una muestra estadísticamente significativa. Para pavimentos flexibles, la carga es aplicada en la huella externa de la vía, mientras que para pavimentos rígidos la carga se aplica en el centro de losa, en el caso de juntas para la evaluación de transferencia de carga se debe realizar el ensayo en un mínimo del 5% de todas las losas.
- **Nivel 2:** Recomendado para cuando se requiere mayor detalle en el estudio del estado del pavimento como es el caso en estudio de rehabilitaciones, los ensayos se ejecutan en intervalos de 25 a 200 m dependiendo de la condición en la que se encuentre el pavimento, en cada sección uniforme es aconsejable realizar de 10 a 20 ensayos, para la determinación de la eficiencia en la transferencia de carga en juntas se recomienda realizar los ensayos en un porcentaje del 25% de las losas.
- **Nivel 3:** Cuando se requiere un alto nivel de detalle, por ejemplo, en analizar zonas de alta deflexión o presencia de huecos bajo el pavimento rígido. Los intervalos de análisis varían de 3 a 25 m y se ejecutan en ambas huellas de la vía externa e interna, en lo que se refiere a juntas es aconsejable realizar el análisis en todas las juntas.

2.5.3 Parámetros obtenidos de pruebas deflectométricas

- **AREA del cuenco de deflexiones**

Hoffman y Thompson (1981) propusieron un enfoque simple de dos parámetros para el cálculo de los módulos de superficie y cimientos para un sistema de pavimento de dos capas para pavimentos flexibles (AASHTO, 1993). El área del cuenco de deflexión (Figura 2.19) está dada por la Ecuación 2.5 o la Ecuación 2.6 según el sistema de unidades empleado, este valor de AREA posteriormente fue aplicado para el caso de losas de pavimento rígido para el cálculo del módulo elástico del pavimento así como para el valor del módulo de reacción de la subrasante k.

$$\text{AREA}(\text{pulg}) = 6 * \left[1 + 2 \left(\frac{d_{12}}{d_0} \right) + 2 \left(\frac{d_{24}}{d_0} \right) + \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right) \right] \quad \text{Ecuación 2.5}$$

$$\text{AREA}(\text{mm}) = 150 * \left[1 + 2 \left(\frac{d_{12}}{d_0} \right) + 2 \left(\frac{d_{24}}{d_0} \right) + \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right) \right] \quad \text{Ecuación 2.6}$$

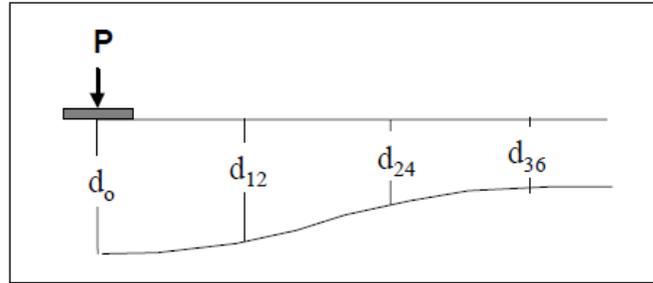


Figura 2.19. Cuenco de deflexiones. (Gaete, Fuentes, & Valverde, 2003)

Donde:

d_0 : Deflexión máxima bajo el plato de carga.

d_{12} : Deflexión a 12 pulgadas (30 cm) desde el plato de carga.

d_{24} : Deflexión a 24 pulgadas (60 cm) desde el plato de carga.

d_{36} : Deflexión a 36 pulgadas (90 cm) desde el plato de carga.

El AREA que se obtiene a partir de la medición de las deflexiones producto de la carga aplicada sobre la superficie, es un indicador de la capacidad estructural que tiene un pavimento, se han considerado valores típicos de áreas y deflexiones “ d_0 ” en el plato de carga dependiendo del tipo de superficie donde se ejecute el ensayo, mismas que se indican en la Tabla 2.5. (U.S. Department of Transportation, 2017).

Tabla 2.5. Escala de Índice de Servicio. (U.S. Department of Transportation, 2017)

Tipo de pavimento	AREA (mm)	D_0 (μm)
Pavimento Rígido	740 - 810	250 - 500
Pavimento Flexible (≥ 200 mm)	530 - 760	500 - 1000
Pavimento Flexible (≤ 200 mm)	410 - 530	760 - 1200

Por otra parte, la forma del cuenco de deformaciones permite interpretar si el daño se encuentra localizado a nivel de estructura del pavimento o en la subrasante, considerando que la deflexión en el centro da como resultado la capacidad estructural del pavimento y las lecturas de los otros geófonos interpreta el comportamiento de las demás capas (base, subbase y subrasante). La Tabla 2.6, muestra los cuatro tipos de interpretaciones que se obtienen a partir de los resultados de los valores de AREA y deflexión central. (U.S. Department of Transportation, 2017)

Tabla 2.6. Evaluación según el cuenco de deflexión. (U.S. Department of Transportation, 2017)

Tipo	Valor de AREA	Máxima deflexión d_0	Evaluación
Tipo I	Alto	Bajo	Pavimento Fuerte/Subrasante Fuerte
Tipo II	Alto	Alto	Pavimento Fuerte/Subrasante Débil
Tipo III	Bajo	Bajo	Pavimento Débil/Subrasante Fuerte
Tipo IV	Bajo	Alto	Pavimento Débil/Subrasante Débil

La Figura 2.20 muestra los tipos de cuencos de deflexión que se emplean para una caracterización de la estructura del pavimento.

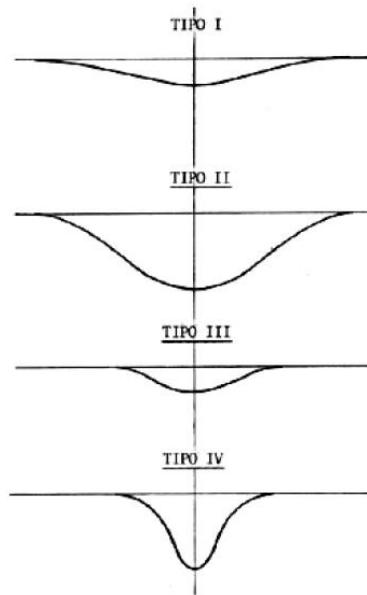


Figura 2.20. Tipos de cuenco de deflexiones. (Bejarano, 2015)

2.5.4 Factores de ajuste en deflexiones

- Carga

La AASHTO establece que la carga normalizada es de 40 kN (9000 lb) valor que permite simular el paso de un camión (vehículo comercial) por la superficie del pavimento y cuyo valor es empleado en el diseño de pavimentos nuevos (AASHTO, 1993), por lo que todas las lecturas de deflexiones tomadas con el FWD deben ser ajustadas a este valor estandarizado, para realizar el ajuste del valor de las deflexiones se aplica la Ecuación 2.7:

$$d_{\text{normalizada}} = \frac{d_i \cdot \text{carga normalizada}}{\text{carga aplicada}} \quad \text{Ecuación 2.7}$$



Donde:

d_j : Lectura de deflexión del geófono del FWD en campo

$d_{\text{normalizada}}$: Valor de deflexión ajustado a carga estandarizada

Carga normalizada: Equivalente a 40 kN (9000 lb)

Carga aplicada: Carga aplicada durante el ensayo en campo

▪ **Temperatura**

La variación de temperatura y la humedad del pavimento son factores que tienen influencia en la medida de deflexiones, razón por la cual la AASHTO (AASHTO, 1993) señala que las temperaturas a las cuales se deben realizar los ensayos están comprendidas en el rango de 30 y 120°F (0 y 50°C), la temperatura tiene un efecto directo en el comportamiento de la deformación del pavimento flexible siendo esto a bajas temperaturas su comportamiento es frágil, en cambio a altas temperaturas su comportamiento es dúctil, es por eso que es necesario realizar el ajuste de las deflexiones obtenidos conforme a una temperatura estandarizada, siendo esta temperatura 68°F (20°C).

En la vigésima Reunión del Asfalto, en Buenos Aires (mayo, de 1977), se presentó la siguiente ecuación (Ecuación 2.8) para convertir las deflexiones medidas a otras temperaturas a la temperatura referencia de 20°C (Garnica & Perez, 2013).

$$F_T = \frac{1}{1 + (8 \times 10^{-4} * h)(T - 20)} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde:

h: Espesor de las capas asfálticas en el sitio de la medida (cm)

T: Temperatura de las capas asfálticas en el momento de medir la deflexión (°C).

Sin embargo, hay que recalcar que el ajuste de las deflexiones por efectos de la temperatura en la superficie del pavimento durante la ejecución de ensayos deflectométricos es aplicable para pavimentos flexibles ya que el pavimento rígido no es afectado de igual manera como lo son los flexibles. El efecto de la temperatura en las deflexiones medidas fuera del plato de carga no es significativo por lo que se corrige únicamente la deflexión central (AASHTO, 1993).



2.5.5 Retrocálculo de datos de deflexión

La determinación del estado tensional (tensiones, deformaciones y deflexiones) que ocurre en un pavimento es obtenida a partir de parámetros estructurales (módulos, coeficiente de Poisson) y el conocimiento de las cargas que son aplicadas (tráfico) así como los espesores de las capas. El análisis inverso consiste en la determinación y análisis de parámetros estructurales característicos de cada una de las capas del pavimento (módulos) a partir de las deflexiones medidas sobre su superficie, la carga aplicada por el FWD y los espesores de las correspondientes capas de estructura del pavimento (Avila & Albarracín, 2014).

Es importante tomar en cuenta que los resultados obtenidos a través de un proceso de retrocálculo deben ser analizados con detenimiento y que sus valores estén dentro de rangos razonables para cada tipo de material que compone la estructura del pavimento. La variabilidad en los resultados depende de factores tales como la condición del pavimento, la condición de la subrasante, las propiedades de los materiales y la condición misma de la estructura del pavimento.

2.6 Metodología AASHTO 93

La capacidad estructural de un pavimento rígido está dada fundamentalmente por el espesor de losa (D), el Módulo Elástico del Hormigón (E_c) y el Módulo de Reacción de la Subrasante (k) (Gaete, Fuentes, & Valverde, 2003). El espesor de la losa (D) es un valor que se puede determinar en campo mediante la extracción de núcleos o en base a los estudios realizados los cuales contienen el diseño del pavimento, por otra parte los parámetros de E_c y k son determinados por el proceso de retrocálculo en base a las deflexiones obtenidas con el deflectómetro de impacto.

2.6.1 Módulo de reacción efectivo dinámico

De acuerdo a la teoría de elástica desarrollada por Westergaard (1939), los valores de E_c y k están relacionados a través del parámetro denominado radio de rigidez relativa (l_k) mediante la Ecuación 2.9:

$$l_k = \sqrt[4]{\frac{E_c D^3}{12(1-\nu^2)k}} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde:

l_k : Radio de rigidez relativa

E_c : Módulo elástico de la losa, psi

D: Espesor de la losa, pulgadas



μ : Coeficiente de Poisson

k: Módulo de reacción efectivo, psi/pulg.

Hall (1991) determinó la relación existente entre el radio de rigidez relativa (l_k) y el parámetro AREA, la cual se expresa mediante la Ecuación 2.10:

$$l_k(\text{pulg}) = \left[\frac{\ln\left(\frac{36-\text{AREA}}{1812.279133}\right)}{-2.559340} \right]^{4.387009} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Con el parámetro l_k determinado con la ecuación anterior, se determina el módulo de reacción efectiva k a través de la Ecuación 2.11, de deflexión de Westergaard (1939).

$$k = \left(\frac{P}{8d_0 l_k^2} \right) \left(1 + \left(\frac{1}{2\pi} \right) * \left[\ln \left(\frac{a}{2l_k} \right) + \gamma - 1.25 \right] \left(\frac{a}{l_k} \right)^2 \right) \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Donde:

P: Carga en libras

a: Radio del plato de carga, pulgadas

γ : Constante de Euler = 0,57721566490

Conocido el valor de k y empleando el valor de l_k obtenido, el módulo de elasticidad de la losa de hormigón se calcula a partir de la Ecuación 2.9.

2.6.2 Módulo de reacción efectivo estático

El resultado del módulo de reacción efectivo obtenido por retrocálculo a partir de los ensayos de deflectometría es un Módulo Dinámico, el valor de módulo efectivo que se emplea para la determinación del espesor de losa de hormigón hidráulico es un valor de módulo estático, por lo que conforme a los estudios realizados por la AASHO se encontró que los valores dinámicos de carga repetida “k” excedían los valores estáticos en un factor de 1.77 en promedio, por otra parte el análisis de Foxworthy (1985) de los datos recopilados en siete pavimentos de la base de la fuerza aérea indicó que los valores dinámicos de k excedieron los valores estáticos en un factor de 2.3 en promedio (AASHTO, 1993). En base a lo indicado, se recomienda en los procedimientos de diseño de recapeo que los valores de “k” dinámico se dividan por 2.0 para obtener valores “k” estáticos para su uso en la determinación del espesor de pavimento.



2.7 Rehabilitación de pavimentos con sobrecarpetas

Las sobrecarpetas de asfalto u hormigón sobre pavimentos existentes se utilizan para corregir fallas funcionales o estructurales, por lo tanto, dependiendo del daño presente se realiza la evaluación del tipo de sobrecarpeta a diseñarse (AASHTO, 1993).

Las fallas funcionales inciden sobre los usuarios de manera perceptual, esto es la deficiencia en la fricción superficial, textura rugosa, efectos de hidroplaneo, ahuellamientos, hundimientos, asentamientos etc., por otra parte los daños de tipo estructural afectan directamente la estructura en su capacidad de soportar las cargas de tráfico que actúan sobre esta. Estas fallas se ven evidenciadas por la presencia de grietas, desintegración de la superficie, espesor de pavimento inadecuado y sobre exigencia del pavimento por carga de tráfico.

El diseño de sobrecarpetas se basa en el concepto de “deficiencia estructural” (AASHTO, 1993). Es decir que la sobrecarpeta a ser implementada en la estructura del pavimento podrá absorber de manera apropiada la exigencia que se produzca por el tráfico proyectado para el periodo de diseño especificado y garantizar un correcto funcionamiento de la estructura del pavimento.

2.7.1 Tipos de sobrecarpetas

Con la finalidad de proveer un mejor nivel de servicio así como prolongar la vida útil de la estructura del pavimento es necesario emprender acciones de mantenimiento y en algunas ocasiones reconstrucción de estructuras, dependiendo de la condición en la que se encuentre un pavimento así como las solicitudes a la que esta exigido se plantean opciones de tratamiento, dentro de estas opciones la más frecuente es la colocación de sobrecarpetas sobre una superficie existente. Este trabajo de recapeo se puede clasificar según el tipo de sobrecarpeta y la superficie de pavimento donde será instalada tal como se muestra en la Tabla 2.7:

Tabla 2.7. Tipos de diseños de sobrecarpetas. (AASHTO, 1993)

Sobrecarpeta	Pavimento existente
Concreto asfáltico	Concreto asfáltico (CA)
Concreto asfáltico	Hormigón previamente fracturado o triturado
Concreto asfáltico	H. Simple, H. reforzado con juntas o H. Continuamente Reforzado
Concreto asfáltico	CA s/H. Simple, H. reforzado con juntas o H. Continuamente Reforzado
Hormigón adherido	Hormigón
Hormigón no adherido	Hormigón
Hormigón	Concreto Asfáltico

2.7.2 Capacidad estructural y deficiencia estructural

Con el paso del tiempo y las cargas repetidas de tráfico que soporta la estructura del pavimento su facultad de respuesta hacia estas cargas va decreciendo y por ende su capacidad estructural. En la Figura 2.21 se muestra la condición inicial de un pavimento nuevo definida como SC_0 y por el paso del tiempo y cargas aplicadas, esta capacidad estructural desciende hasta alcanzar un valor de SC_{ef} en un tiempo determinado, las nuevas exigencias del tráfico futuro deben ser cubiertas por una sobrecarpeta que permitirá elevar su capacidad a valores de SC_f , razón por la cual en el nuevo periodo de diseño proyectado la deficiencia estructural a cubrirse está determinada por la diferencia entre la capacidad estructural adquirida y la capacidad que tiene el pavimento, este último valor se conoce como Deficiencia Estructural y se define por la Ecuación 2.12.

$$SC_{ol} = SC_f - SC_{ef}$$

Ecuación 2.12

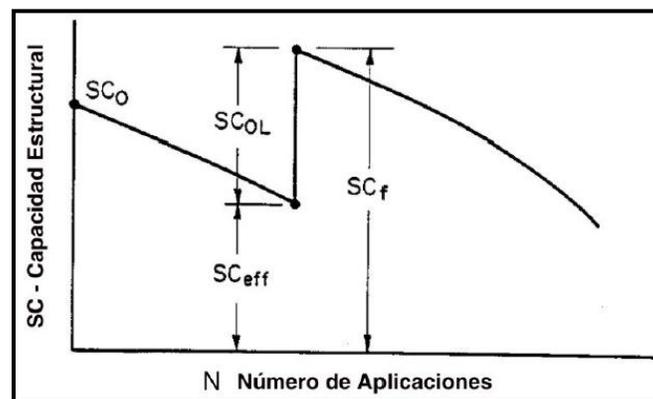


Figura 2.21. Pérdida de la capacidad estructural en función del tiempo y del tráfico. (AASHTO, 1993)

El cálculo del valor de la deficiencia estructural implica que tanto el valor de SC_f y SC_{ef} sean determinados con precisión. La capacidad estructural requerida (SC_f) es determinada mediante la aplicación de las ecuaciones de diseño AASHTO para pavimentos nuevos, sean estos flexibles o rígidos, donde el parámetro representativo para el diseño para el caso de pavimentos flexibles es el número estructural (SN) y de el espesor de la losa (D) para pavimentos rígidos. Por otra parte, el factor que representa la condición estructural actual (SC_{ef}) se obtiene a partir de la aplicación de metodologías de evaluación estructural.

2.7.3 Métodos para diseño de sobrecarpetas

Para el diseño de sobrecarpetas es importante que se considere la condición actual de los componentes del pavimento existente y el comportamiento de estos materiales en el futuro (AASHTO, 1993). Existen tres métodos los cuales permiten realizar la evaluación estructural de un pavimento, a continuación se realiza una descripción de estos (IBCH, 2015).



▪ **Inspección visual y ensayo de materiales – Análisis de la condición del pavimento**

Es importante contar con toda la información posible referente a la vía a la cual se va intervenir, dicha información comprende el diseño de la vía, como fue construida y el mantenimiento que se ha venido realizando con el paso de los años, posteriormente, se debe tener claramente identificado los deterioros que existen así como su severidad, su cantidad y ubicación.

Las cargas de tráfico no son la única causa de deterioros en la estructura del pavimento, sin embargo, estas producen un incremento en la severidad del daño y la posterior reducción de la capacidad de respuesta del pavimento a cargas de tráfico.

En pavimentos flexibles los deterioros que indican deficiencia estructural son (IBCH, 2015):

- Presencia de piel de cocodrilo
- Ahuellamiento
- En zonas de baches se desarrollan fisuras longitudinales y/o transversales
- Zonas donde se observa la disgregación de las capas inferiores lo que conlleva la falla en el pavimento

Mientras que en pavimentos rígidos, son indicadores de deficiencia estructural los siguientes tipos de deterioros (IBCH, 2015):

- Escalonamiento o despostillamiento con presencia de fisuras longitudinales y transversales.
- Fisuras de esquina.
- Zonas donde el pavimento se encuentra disgregado lo que conlleva a la presencia de baches.
- Áreas de punzonamiento, sobretodo en pavimentos continuamente reforzado.

▪ **Ensayos no destructivos de deflexión – Deflectómetro de Impacto**

A partir de los resultados de obtenidos mediante el uso del deflectómetro de impacto FWD se realiza la evaluación directa de la resistencia de la subrasante y el pavimento existente (AASHTO, 1993). Dependiendo del tipo de pavimento los resultados de deflectometría son empleados para determinar parámetros para el diseño de pavimentos, para el caso de pavimentos rígidos se calcula el módulo de reacción efectivo “k” y el módulo de elasticidad del hormigón “Ec”; por otra parte si la capa de rodadura es asfalto los resultados permiten

calcular el módulo resiliente de la subrasante y el número estructural del paquete estructural del pavimento.

La información obtenida mediante la ejecución de ensayos NDT de deflectometría aporta con información valiosa para el diseño de pavimentos. Los datos de deflexiones pueden ser usados para cuantificar la variabilidad a lo largo de un proyecto y para subdividir este en segmentos de similar resistencia (IBCH, 2015). Adicionalmente, la información obtenida permite calcular el módulo resiliente de las diferentes capas que conforman el paquete estructural, por lo que si se obtienen valores bajos es un indicador de que se debe realizar un estudio más detallado de la capa.

▪ Diseño por fatiga por tráfico – Vida Remanente

Durante la vida útil de un pavimento la repetición de cargas que se aplican tienden a lo posterior a reducir su capacidad de soporte de cargas adicionales y por ende se produce la falla del pavimento. Este método se basa en determinar el tráfico en el presente (N_p) y el tráfico que llevará al pavimento al nivel de falla ($N_{1.5}$). De acuerdo a la AASHTO Road Test un pavimento se considera fallado cuando su nivel de serviciabilidad tiene un valor de 1.5 tal como se muestra en la Figura 2.22.

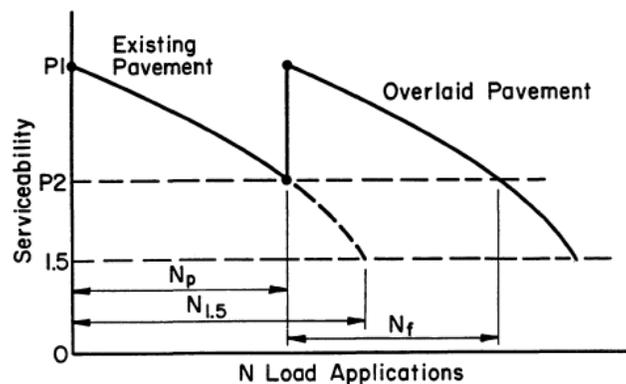


Figura 2.22. Pérdida de la serviciabilidad en función del tráfico. (AASHTO, 1993)

La vida remanente del pavimento se define como la diferencia en porcentaje de estos dos valores de tráfico expresado en 80 kN (18 kip) ESALs (Ecuación 2.13).

$$RL = 100 * \left(1 - \left(\frac{N_p}{N_{1.5}} \right) \right) \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Donde:

RL: Vida remanente (porcentaje)



N_p : Tráfico total hasta la fecha, en ESALs

$N_{1.5}$: Tráfico total hasta la falla, en ESALs.

En función de la vida remanente RL se determina el factor de condición (CF) mediante la Figura 2.23, el concepto de CF está definido a través de la Ecuación 2.14.

$$CF = SC_n / SC_o \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Donde:

SC_n : Capacidad estructural del pavimento luego de N_p ESALs.

SC_o : Capacidad estructural original del pavimento.

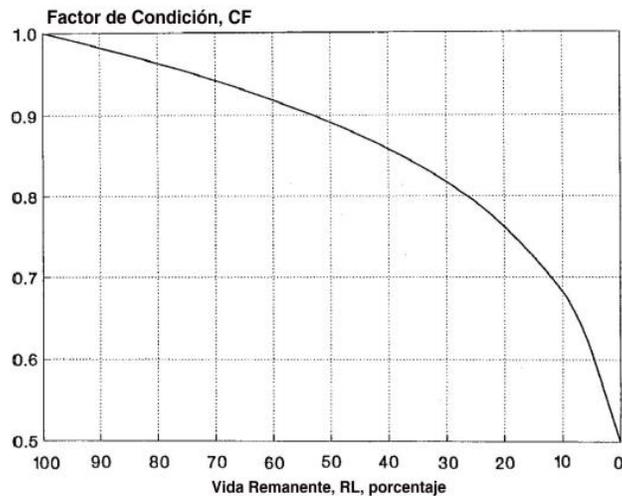


Figura 2.23. Relación entre el factor de condición y la vida remanente. (AASHTO, 1993)

La capacidad estructural existente puede ser estimada multiplicando la capacidad estructural original por CF; para la determinación de $N_{1.5}$ se usan las ecuaciones de diseño de la AASHTO para llegar a un nivel de serviciabilidad de 1.5, considerando una confiabilidad del 50% (AASHTO, 1993).

En la determinación de SN_{ef} y D_{ef} , las fuentes principales de errores se deben a (IBCH, 2015):

- La capacidad predictiva de las ecuaciones del AASHO Road Test.
- La gran variación en el desempeño típicamente observado, incluso dentro de pavimentos con idénticos diseños.
- Estimación en los ESALs.



- Imposibilidad de tomar en cuenta la contribución de las reparaciones de sobrecarpetas en el pavimento.

En base a lo antes descrito, el método puede presentar resultados erróneos, en algunas ocasiones el valor de vida remanente puede ser bajo incluso si existe un poco deterioro como resultado de las cargas y en otras puede obtenerse valores sumamente altos cuando exista un deterioro debido a las cargas.

2.8 Sobrecarpetas de concreto asfáltico sobre pavimento de hormigón

La implementación de una sobrecarpeta de concreto asfáltico sobre un pavimento de hormigón, sea este simple con junta, reforzado con junta o continuamente reforzado, implica la realización de las siguientes fases (AASHTO, 1993):

- Reparación de zonas deterioradas y mejora en las condiciones de drenaje, en caso de ser necesario.
- Construcción de carriles adicionales o ensanchamiento de carriles, si es necesario.
- Aplicación de un riego de liga.
- Colocación de la sobrecarpeta de concreto asfáltico, donde además se incluye un tratamiento de control de reflexión de fisuras en caso de ser necesario.

El éxito en la funcionalidad de la colocación de una sobrecarpeta sobre un pavimento rígido depende en gran medida de las condiciones en las que este se encuentre ya que en circunstancias adversas es necesario la remoción de las losas y su posterior reposición.

2.8.1 Tareas de reparación previas

Tal como se indicó anteriormente, previo a las fases es la reparación de áreas deterioradas, este proceso implica mejorar las condiciones del pavimento rígido previo a la colocación de la carpeta asfáltica, dependiendo del tipo de daño. La Guía de Diseño AASHTO 93 sugiere las siguientes reparaciones presentadas en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Trabajos de reparación en losas de hormigón. (AASHTO, 1993)

Tipo de Falla	Tipo de Reparación
Fisuras de trabajo	Reparación en todo el espesor o reemplazo de losa
Punzonamiento	Reparación en todo el espesor de la losa
Juntas despostilladas	Reparación total o parcial en el espesor
Reparaciones deterioradas	Reparación en todo el espesor
Bombeo / Escalonamiento	Construcción de drenajes de borde
Asentamientos / Levantamientos	Capa de asfalto de nivelación, reconstrucción localizada



2.8.2 Control de reflexión de fisuras

La reflexión de fisuras en la sobrecarpeta de hormigón asfáltico se debe a dos importantes factores tal como la temperatura y el tráfico que producen el movimiento en zonas donde están localizadas juntas, fisuras en el pavimento rígido existente; los movimientos producto del tráfico tienen relación directa con el espesor de la sobrecarpeta así como también del espesor y rigidez del pavimento original, por otra parte, los movimientos producto de la temperatura se debe a que la variación de esta produce la expansión o contracción en las zonas donde existen grietas o juntas.

Las medidas para controlar la reflexión de fisuras son (AASHTO, 1993):

- Corte y sellado de juntas en la sobrecarpeta en concordancia con las juntas del pavimento de hormigón subyacente. El éxito de esta técnica depende de que el corte coincida con la junta o fisuras en un margen de 20 mm (IBCH, 2015).
- Incremento del espesor de la sobrecarpeta lo que la reflexión tardara más tiempo.
- Colocación de una capa granular bituminosa estabilizada como trabajo previo a la colocación de la sobrecarpeta.
- Colocación de una membrana sintética antes de la colocación de la sobrecarpeta.
- Trituración y compactación del pavimento de hormigón existente.
- Corte del pavimento de hormigón simple, o rotura y asentamiento del pavimento de hormigón armado con juntas. Este procedimiento reduce el tamaño de las piezas de hormigón y las asienta en la base subyacente, y a la vez reduce los desplazamientos en las grietas.

Es de vital importancia realizar el mantenimiento frecuente (sellado, fresado, parchado) a la nueva carpeta ya que las fisuras reflejadas son una vía de ingreso de agua que afecta a la estructura del pavimento, produce desprendimientos de la sobrecarpeta, además de producir la pérdida de adherencia entre pavimentos.

2.8.3 Subdrenaje

Un sistema de drenaje adecuado permite que la sobrecarpeta tenga un mejor desempeño, el agua es un agente que produce erosión y disminución en la resistencia en la capa de base y subrasante, además, una mejora en el sistema de drenaje de la vía reduce significativamente problemas como el descascaramiento y disgregación del asfalto (IBCH, 2015).



2.8.4 Diseño de espesor de sobrecarpeta

Si la finalidad de la colocación de la sobrecarpeta es de contrarrestar los efectos de carácter funcional se considera únicamente un espesor mínimo, por otra parte, cuando es necesario mejorar la estructura del pavimento y por ende su desempeño el espesor de la sobrecarpeta depende de la exigencia a la que será sometida la estructura. El espesor de la sobrecarpeta está dado por la Ecuación 2.15.

$$D_{ol} = A * (D_f - D_{ef}) \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Donde:

D_{ol} : Espesor de la sobrecarpeta, pulg

A: Factor de conversión de deficiencia del espesor del pavimento de hormigón en un espesor sobrecarpeta de concreto asfáltico

D_f : Espesor de losa necesario para soportar el tránsito futuro, pulg

D_{ef} : Espesor efectivo de la losa existente, pulg

$D_f - D_{ef}$: Deficiencia en espesor del pavimento de hormigón

El factor de conversión A se calcula mediante la Ecuación 2.16.

$$A = 2.2233 + 0.0099(D_f - D_{ef})^2 - 0.1534(D_f - D_{ef}) \quad \text{Ecuación 2.16}$$

El espesor de la sobrecarpeta de hormigón asfáltico sobre hormigón hidráulico oscila entre 2.0 y 10.0 pulgadas.

Para determinar el espesor de la sobrecarpeta a colocarse se realiza el siguiente procedimiento (AASHTO, 1993):

- **Diseño del pavimento existente (Paso 1)**

Este proceso implica la obtención de toda la información necesaria en lo concerniente al pavimento existente donde se va a colocar la sobrecarpeta:

- Espesor de la losa de hormigón
- Tipo de transferencia de carga (dispositivos de transferencia, trabazón entre agregados, hormigón con refuerzo continuo)
- Tipo de berma (vinculada de hormigón u otro tipo)



▪ **Análisis de tráfico (Paso 2)**

En lo que se refiere a tráfico se requiere conocer la siguiente información:

- ESALs acumulados en el carril de diseño (N_p), en caso de que se desee determinar D_{ef} por el método de la vida remanente.
- ESALs futuros en el carril de diseño durante el periodo de diseño N_f

▪ **Observación del estado pavimento existente (Paso 3)**

Este proceso implica realizar la inspección visual del estado del pavimento determinando la cantidad y severidad del tipo de deterioro presente. Dependiendo del tipo de pavimento rígido, sea este simple o reforzado, existen diferentes tipos de fallas a considerarse en la inspección de la condición mismos que se describen a continuación (IBCH, 2015):

En pavimentos de hormigón simple o reforzado con juntas se consideran los siguientes deterioros.

- Número de juntas transversales deterioradas por milla (1.6 km)
- Número de fisuras transversales deterioradas por milla (1.6 km)
- Cantidad de parches realizados con asfalto en todo el espesor, juntas con aberturas mayores a 1 pulg o 25 mm y juntas de expansión por milla (excepto las correspondientes a puentes)
- Presencia y severidad de problemas de durabilidad del hormigón
 - Fisuras de durabilidad: baja severidad (fisuras solamente), severidad media (algo de descascamiento), alta severidad (descascamiento severo)
 - Fisuras por áridos reactivos: baja, media y alta severidad
- Presencia de movimientos verticales entre losas, bombeo, fisuras, y bordes de pavimento.

Para el caso de pavimentos de hormigón con refuerzo continuo se consideran los siguientes deterioros.

- Cantidad de punzonamientos por milla (1.6 km)
- Número de fisuras transversales deterioradas por milla (1.6 km)



- Cantidad de parches realizados con asfalto en todo el espesor del pavimento, juntas con aberturas mayores a 1 pulg o 25mm y juntas de expansión por milla (excepto las correspondientes a puentes)
- Número de reparaciones existentes y nuevas previas a la sobrecarpeta por milla (1.6 km)
- Presencia y severidad de problemas de durabilidad
- Bombeo
- **Ensayos de deflexión (Paso 4)**

El ensayo de deflectometría permite realizar el análisis de las condiciones estructurales del pavimento, los ensayos se realizan en rangos de distancia entre 30 a 300 m. Las deflexiones se miden mediante geófonos ubicados a 0, 12, 24 y 36 pulg del centro del plato de carga. La carga estandarizada es de 40 kN (9000 lb). Para cada losa ensayada se debe determinar el módulo k efectivo y el módulo de la losa a través de la formulación indicada en la Metodología AASHTO 93.

El AREA de cada deflexión se calcula con la Ecuación 2.17:

$$\text{AREA}(\text{pulg}) = 6 * \left[1 + 2 \left(\frac{d_{12}}{d_0} \right) + 2 \left(\frac{d_{24}}{d_0} \right) + \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right) \right] \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Donde:

d_0 : Deflexión máxima bajo el plato de carga

d_{12} : Deflexión a 12 pulgadas desde el plato de carga

d_{24} : Deflexión a 24 pulgadas desde el plato de carga

d_{36} : Deflexión a 36 pulgadas desde el plato de carga.

- **Módulo k estático efectivo**

Una vez obtenido el valor de k dinámico siguiendo la formulación de la Guía AASHTO 93, se procede a transformar este valor de k dinámico a estático mediante la Ecuación 2.18 tal como se indica a continuación:

$$k \text{ estático efectivo} = \frac{k \text{ efectivo dinámico}}{2} \quad \text{Ecuación 2.18}$$



- **Módulo elástico del hormigón**

Conocido el espesor D de la losa y el valor de k dinámico, se puede calcular el valor del módulo elástico E_c tal como se indicó en la sección 2.3.4 de la Metodología AASHTO 93. Valores típicos de E_c oscilan entre 3 a 8×10^6 psi ($20,000$ a $60,000$ MPa).

- **Transferencia de carga**

Medición realizada a pavimentos de hormigón simple o de hormigón armado con juntas. Se mide la deflexión en el centro de la carga y a 12 pulg del centro atravesando la junta. El porcentaje de transferencia de cargas por deflexión esta expresado por la Ecuación 2.19:

$$\Delta LT = 100 \left(\frac{\Delta_{ul}}{\Delta_l} \right) B \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Donde:

Δ_{ul} : Deflexión del lado no cargado (pulg o mm)

Δ_l : Deflexión del lado cargado (pulg o mm)

B : Factor correctivo por flexión de losa.

Se aplica el factor correctivo B porque las deflexiones d_0 y d_{12} no serían las mismas que se medirían en el centro de la losa. B puede determinarse a través de la Ecuación 2.20:

$$B = \frac{d_{0 \text{ centro}}}{d_{12 \text{ centro}}} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

El valor de B varía entre 1.05 a 1.15.

Con el valor obtenido de porcentaje de transferencia de carga se puede determinar el valor del coeficiente de transferencia de carga mediante la Tabla 2.9:

Tabla 2.9. Coeficiente de transferencia de carga. (AASHTO, 1993)

Porcentaje de transferencia de cargas	Coeficiente de transferencia de carga
> 70	3.2
50 – 70	3.5
< 50	4.0

- **Determinación del espesor requerido de losa para el tránsito futuro D_f (Paso 5)**

Los datos para determinar D_f deben representar al pavimento existente y a las propiedades de la fundación. Es importante tener en cuenta que las propiedades del pavimento rígido



existente (módulo elástico, módulo de rotura y transferencia de carga) controlan el comportamiento de la sobrecarpeta de concreto asfáltico.

- **Modulo k estático efectivo**

El módulo k estático efectivo se lo puede determinar mediante las siguientes metodologías (IBCH, 2015):

- A través del cálculo del k efectivo dinámico mediante ensayos de deflectometría, a este valor se lo divide por 2 obteniéndose el k efectivo estático.
- Realizando el ensayo de placa de carga luego de que la losa ha sido removida, esta alternativa resulta costosa y por ende es poco empleada.
- Considerando datos de suelos, tipos de base y espesores, con la ayuda de los ábacos para diseño de pavimentos rígidos de la AASHTO, aunque no son valores reales pueden ser empleados como una estimación preliminar.

- **Pérdida de serviciabilidad de diseño**

Esta pérdida se define como la diferencia entre la serviciabilidad al momento de colocarse la sobrecarpeta y la serviciabilidad al final del periodo de diseño (cuando se requiere una nueva rehabilitación).

- **Factor de transferencia de cargas J**

Medición realizada a pavimentos de hormigón simple o de hormigón armado con juntas. Se mide la deflexión en el centro de la carga y a 12 pulg del centro atravesando la junta, este procedimiento se indicó anteriormente en el Paso 4.

- **Módulo de rotura del pavimento existente de hormigón**

El módulo de rotura del hormigón se puede determinar por cualquiera de los siguientes procedimientos:

Mediante el ensayo de tracción indirecta, el módulo de rotura S'_c del hormigón se lo puede determinar a través de la extracción de núcleos de 150 mm (6 pulg) de diámetro del centro de la losa para posteriormente realizar un ensayo de tracción indirecta. El módulo de rotura se puede estimar usando la Ecuación 2.21 (Foxworthy 1985).

$$S'_c = 210 + 1.02 IT \quad \text{Ecuación 2.21}$$

Donde:



S'c: Módulo de rotura, psi

IT: Tracción indirecta medida en las probetas, psi

A través del módulo elástico del pavimento existente obtenido mediante retrocálculo a través de la Ecuación 2.22.

$$S'c = 43.5 (Ec/10^6) + 488.5 \quad \text{Ecuación 2.22}$$

Donde:

Ec: Módulo elástico del hormigón (psi)

- **Módulo elástico del pavimento de hormigón existente**

Se determina mediante dos procedimientos

- A partir de retrocálculo con información de deflectometría
- Mediante ensayos de tracción indirecta

- **Pérdida de soporte de la losa existente**

Las juntas de esquina que pueden tener una pérdida importante de soporte pueden ser identificadas mediante ensayos FWD. Las pérdidas de soporte en pavimentos con refuerzo continuo pueden ser determinadas graficando la deflexión del borde de la losa o de la zona usada por las ruedas de los vehículos e identificando puntos con deflexiones excesivas. Toda falta de soporte debe ser corregida con estabilización de la losa. Para el diseño del espesor de la sobrecarpeta se debe considerar una losa completamente soportada (LS=0).

- **Confiabilidad de diseño de la sobrecarpeta R**

La confiabilidad es de importancia en el cálculo del espesor de la sobrecarpeta, este valor de confiabilidad debe ser determinado de acuerdo al diseño de pavimentos nuevos.

- **Desviación standard**

Se debe tomar en cuenta valores de desviación estándar conforme a las consideraciones que se realizan para pavimentos nuevos.

- **Capacidad de subdrenaje de la losa existente**

El bombeo o escalonamiento en juntas o fisuras son indicios de que existe deficiencia en el sistema de drenaje por lo que el AASHO Road Test considera un valor de $C_d = 1.0$ como base en donde valores menores a este representa condiciones pobres de drenaje y valores superiores indican mejores condiciones de drenaje.



- **Determinación del espesor efectivo de losa del pavimento existente D_{ef} (Paso 6)**

El espesor efectivo existente se puede determinar mediante las siguientes metodologías.

- **Observación del estado del pavimento existente**

El espesor efectivo de la losa existente está representada mediante la Ecuación 2.23:

$$D_{ef} = F_{jc} * F_{dur} * F_{fat} * D \quad \text{Ecuación 2.23}$$

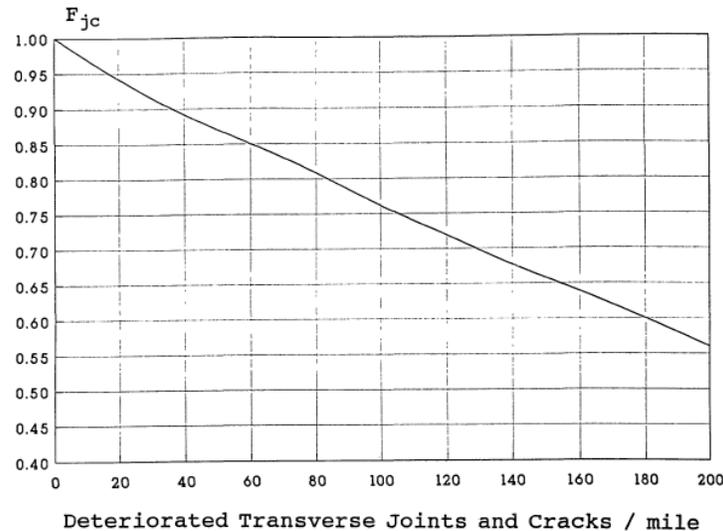
Siendo D el espesor de la losa de hormigón y los valores de “F” son factores de ajuste.

Factor de ajuste por juntas y fisuras F_{jc} : Este factor considera la pérdida de serviciabilidad producto de fisuras reflejadas y deterioradas en la sobrecarpeta causadas por juntas o fisuras no reparadas y discontinuidades en el pavimento existente lo que conlleva a la pérdida de serviciabilidad. Por lo que es importante previo al recapeo realizar la reparación en todo el espesor. Si se realiza la reparación de todos estos deterioros derivan en un F_{jc} igual a 1.0.

En caso de que no sea posible realizar la reparación de las zonas deterioradas, es conveniente incrementar el espesor de la sobrecarpeta para que de esta manera sea esta la que asuma la pérdida de serviciabilidad. Si un pavimento no presenta problemas de durabilidad y reacción álcali - agregado, el valor de F_{jc} se determina considerando la siguiente información (IBCH, 2015):

- Número de juntas deterioradas no reparadas por milla o 1.6 km.
- Número de fisuras deterioradas no reparadas por milla o 1.6 km.
- Número de zonas con punzonamiento no reparadas por milla o 1.6 km.
- Número de juntas de expansión, en especial juntas anchas mayores a 2.5 mm y parches realizados con asfalto en todo el espesor, por milla o 1.6 km.

En función del número de fisuras, juntas deterioradas no reparadas, baches, etc, se determina el F_{jc} a través de la Figura 2.24.

Figura 2.24. Factor de ajuste F_{jc} . (AASHTO, 1993)

Factor de ajuste por durabilidad F_{dur} : Este factor considera la pérdida de serviciabilidad en el pavimento existente cuando existen fisuras de durabilidad o fallas debidas a reacción álcali – agregado. Los valores tomar en cuenta para F_{dur} son:

F_{dur} : 1.00 No existe problemas de durabilidad.

F_{dur} : 0.96 – 0.99 Presenta fisuras de durabilidad, pero sin desportilladuras.

F_{dur} : 0.88 – 0.95 Existe fisuras importantes y algo de desportilladuras.

F_{dur} : 0.80 – 0.88 Gran cantidad de fisuras además de despostillamiento severo.

Factor de ajuste por fatiga F_{fat} : Este factor considera daños de fatiga previos al recapeo. Se determina la extensión de fisuras transversales (en pavimentos de hormigón simple o con armadura discontinua) o por punzonamiento (hormigón con refuerzo continuo) que pueden haber sido provocadas por repetición de cargas.

El factor de ajuste F_{fat} se obtiene a partir de las siguientes consideraciones.

0.97 – 1.00 Pocas fisuras transversales/existen sectores con punzonamiento (ninguna causada por problemas de durabilidad)

H simple con juntas: < 5% de losas fisuradas

H reforzado con juntas: < 25 de fisuras de trabajo por milla

H con refuerzo continuo: < 4 sectores punzonados por milla



0.94 – 0.96 Existe un número importante de fisuras transversales/existen sectores con Punzonamiento (ninguna causada por problemas de durabilidad)

- H simple con juntas: 5 – 15 % de losas fisuradas
- H reforzado con juntas: 25 – 75 de fisuras de trabajo por milla
- H con refuerzo continuo: 4 - 12 sectores punzonados por milla

0.90 – 0.93 Muchas fisuras transversales/existen sectores con punzonamiento (ninguna causada por problemas de durabilidad)

- H simple con juntas: > 15 % de losas fisuradas
- H reforzado con juntas: > 75 de fisuras de trabajo por milla
- H con refuerzo continuo: > 12 sectores punzonados por milla

▪ **Determinación del espesor de la sobrecarpeta (Paso 8)**

Se emplea la Ecuación 2.24.

$$D_{ol} = A * (D_f - D_{ef}) \quad \text{Ecuación 2.24}$$

Donde:

D_{ol} : Espesor de la sobrecarpeta, pulg

A: Factor de conversión de deficiencia del espesor del pavimento de hormigón en un espesor de concreto asfáltico

D_f : Espesor de losa requerido para soportar el tránsito futuro, pulg

D_{ef} : Espesor efectivo de la losa existente, pulg

El factor A es función de la deficiencia en el espesor del pavimento de hormigón, se determina mediante la Ecuación 2.25.

$$A = 2.2233 + 0.0099(D_f - D_{ef})^2 - 0.1534(D_f - D_{ef}) \quad \text{Ecuación 2.25}$$



CAPÍTULO 3

Este capítulo contiene la metodología de trabajo empleada para la recolección y manejo de la información de campo obtenida a través del Deflectómetro de Impacto FWD en los tramos seleccionados de la vía Cuenca - Molleturo - El Empalme, donde el levantamiento de información comprende la aplicación de cargas de 35 kN, 40 kN, 45 kN, 50 kN y 55 kN en el centro de la losa de concreto cada 200 metros carril. En base a los resultados de deflexión obtenidos se realiza el procesamiento de esta información que incluyen varias fases de desarrollo que se describen a continuación:

Fase 1: A través de un análisis de regresión de los valores de deflexión obtenidos en campo se buscará el mejor ajuste que describa el comportamiento real de la deflexión en un mismo punto de ensayo, permitiendo calcular el valor de deflexión correspondiente a las cargas nominales consideradas en los ensayos entre ellas la deflexión correspondiente a la carga normalizada por la AASHTO. Finalmente, esta etapa concluye con el gráfico de los cuencos de deflexión que, en lo posterior, serán un mecanismo de análisis de la condición de la estructura del pavimento.

Fase 2: Mediante la aplicación de la metodología de retrocálculo contenida en la guía de diseño de estructuras de pavimentos AASHTO 93 se calcularán los parámetros estructurales del pavimento rígido para cada una de las cargas nominales de ensayo mismas que fueron resultado del análisis de regresión de la Fase 1 con la finalidad de interpretar cómo varían estos parámetros según la carga aplicada.

Fase 3: Dentro de esta fase se realiza la normalización de las deflexiones obtenidas para cada carga real aplicada durante el ensayo a través de la ecuación de normalización de la AASHTO. Mediante un análisis de correlación se calculará el coeficiente de correlación existente entre las deflexiones normalizadas por la ecuación de la AASHTO y la obtenida en el análisis de regresión de la Fase 1.

Fase 4: Aplicando la metodología de retrocálculo dada por la AASHTO 93 se obtendrán los parámetros estructurales para pavimentos rígidos para cada una de las cargas aplicadas en los ensayos una vez que los valores de deflexión correspondientes hayan sido previamente normalizadas.

Fase 5: Esta fase comprende el diseño de la sobrecarpeta de hormigón asfáltico como medio de reforzamiento estructural. Se obtendrán los valores de esta sobrecarpeta considerando las cargas aplicadas durante el ensayo y cuyos valores de deflexión obtenidos hayan sido normalizados por el factor de “corrección por carga” con el fin de evaluar su variabilidad y su incidencia en los resultados.

3 DESARROLLO

3.1 Ubicación del proyecto

Para el caso de estudio del presente Proyecto de Titulación se ha tomado dos segmentos del proyecto vial Cuenca - Molleturo - El Empalme E584, ubicado en las provincias de Azuay y Guayas mismo que tiene una longitud de 118 km el cual se desarrolla por una topografía montañosa, atravesando los humedales del Parque Nacional Cajas.

Mediante la información del PCI (Pavement Condition Index) proporcionada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas MTOP se han seleccionado los dos segmentos de la vía para la ejecución de los ensayos deflectométricos aplicando diferentes estados de carga.

El primer segmento está comprendido en las abscisas 10+000 - 15+000, el cual tiene un valor de PCI de 75 catalogado como una condición de Muy Bueno (Vásquez, 2002). El otro segmento es el comprendido entre las abscisas 16+000 - 21+000 el cual tiene un valor de PCI de 89 catalogado como Excelente (Vásquez, 2002). En la Figura 3.1 se observa el trazado de la vía Cuenca - Molleturo - El Empalme donde se resalta los dos tramos en los cuales se realizan las pruebas deflectométricas.

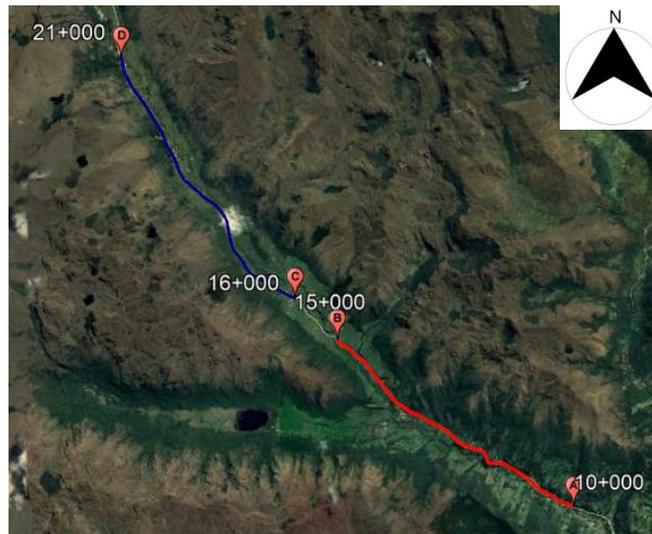


Figura 3.1. Localización de tramos de estudio vía Cuenca – Molleturo – El Empalme (Tomado de Google Earth Pro).

La estructura de pavimento está constituida por losas de hormigón, de acuerdo con la información disponible de la Consultora INEXTEC, contratada por el MTOP para la evaluación completa de la vía Cuenca - Molleturo - Pto. Inca en el año 2006. La vía contaba con una estructura de pavimento flexible y los resultados de este análisis indicaron la necesidad de una rehabilitación mediante un “Whitetopping”, el cual consiste en una capa de concreto hidráulico sobre la carpeta asfáltica deteriorada. Esta rehabilitación fue realizada

por la Constructora FOPECA.

3.2 Pruebas de deflectometría de impacto con el FWD

Para la ejecución de los ensayos de deflectometría se ha empleado el FWD Primax 1500 propiedad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) (Ver Figura 3.2), se han realizado los ensayos en intervalos de 200 metros por carril tanto en el carril derecho como en el izquierdo (Figura 3.3) para de esta manera conseguir una evaluación cada 100 metros de calzada. En cada punto se ha realizado ensayos de estado de carga en intervalos de 5 kN partiendo desde 35 kN hasta 55 kN con el fin de obtener un ajuste real que describa el comportamiento del valor de la deflexión en función de la carga aplicada y que permita a su vez encontrar el valor correspondiente de deflexión producto de la carga normalizada de 40 kN considerada por la AASHTO. Adicionalmente, se realiza el ensayo para el cálculo de la transferencia carga en juntas aplicando una carga de 40 kN.



Figura 3.2. Deflectómetro PRIMAX 1500, propiedad del MTO.

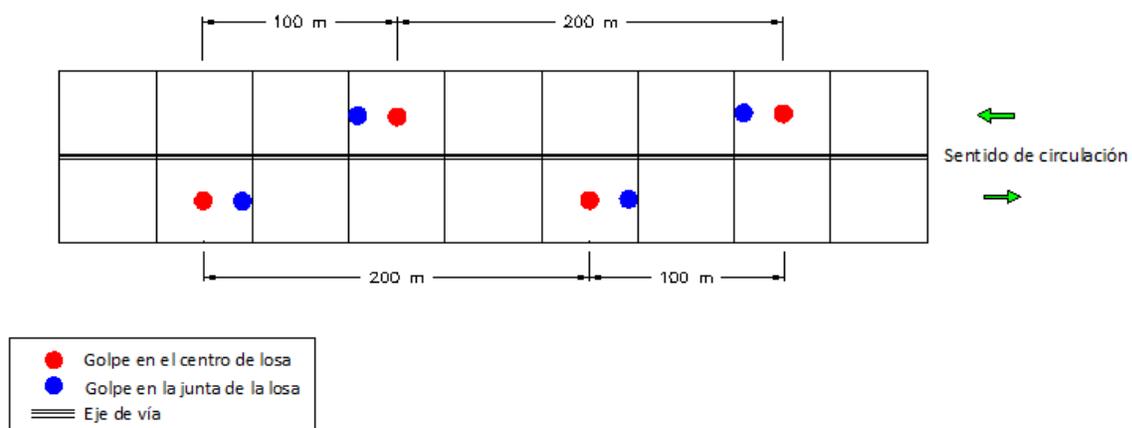


Figura 3.3. Esquema para ensayos en calzada.



3.2.1 Ubicación de los geófonos

La norma ASTM D 4694 - 96 (ASTM Standards) en lo que se refiere a los sensores para medición de deflexión establece que el espaciamiento entre sensores es de 300 mm (12 pulg) y su número depende del propósito del ensayo y las características del pavimento. De igual manera, el Instituto Mexicano del Transporte, indica que el arreglo puede ser el siguiente: 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200 y 1500 mm de distancia respecto a la placa de aplicación de carga (Instituto Mexicano del Transporte, 2007). Así también, la Strategic Highway Research Program (SHRP) utiliza una configuración de sensor único para todas las pruebas de cuencas de deflexión, independientemente del tipo de pavimento, para minimizar la probabilidad de errores de ubicación del sensor. Los sensores están ubicados en radios de $r = 200, 300, 450, 600, 900, 1200$ y 1500 mm desde el centro de la placa de carga.

Se utiliza una configuración de sensor similar para todas las pruebas de transferencia de carga, excepto que el sensor a $r = 200$ mm se mueve hacia la parte trasera de la placa de carga a 300 mm del centro de la placa de carga (Strategic Highway Research Program , 1992).

El espaciamiento de los sensores del FWD Primax 1500 propiedad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), tiene la configuración que muestra la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Ubicación de geófonos FWD propiedad del MTO.

Geófono	Ubicación (cm)
D1	0
D2	20
D3	30
D4	60
D5	90
D6	120
D7	150
D8	180
D9	-30

Para ejecutar los ensayos, el equipo cuenta con un computador, mismo que mediante el software llamado PRIMAX - VERSION 4.3 se ingresa el valor de la carga con la que se ejecutará el ensayo, la abscisa, la nomenclatura adoptada para el punto donde se ejecuta el ensayo, el número de golpes (drops) que realizará por carga asignada, este último depende mucho del criterio del ingeniero que ejecuta las pruebas, en este caso se ha seleccionado la opción de dos golpes por carga aplicada. Luego de realizado el ensayo, la información proveniente de los geófonos es almacenada dentro del Data Collection con el código asignado, la carga real aplicada, la temperatura ambiente, la ubicación geográfica del punto, además de las deflexiones medidas en cada geófono por golpe (drop). La Figura 3.4 muestra el computador el cual está adaptado dentro del vehículo remolque para la ejecución y

recolección de información de campo.

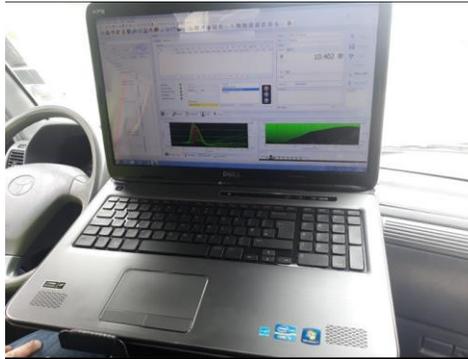


Figura 3.4. Computador adaptado en vehículo remolque.

3.2.2 Calibración del equipo

Para la ejecución de los ensayos, el equipo FWD debe ser calibrado previamente, este proceso es importante ya que el equipo almacenará la información conforme a los valores asignados en la calibración. El valor del abscisado se lo calibra mediante el parámetro DMI (Distance Meter Indicator), el cual establece el número de revoluciones que debe dar las ruedas del FWD para recorrer una distancia determinada, el valor característico de distancia para calibrarlo es de 1.0 kilómetro, la cual es establecida con la ayuda de un topógrafo que marca el inicio y final, el recorrido debe ser tangente de la vía. En la rueda se encuentra un sensor el cual realiza el conteo de las vueltas durante el recorrido en este segmento, esta calibración permite visualizar en la pantalla el abscisado de la vía durante la ejecución de los ensayos (Figura 3.5) siendo uno de los valores que son almacenados en la memoria del equipo.

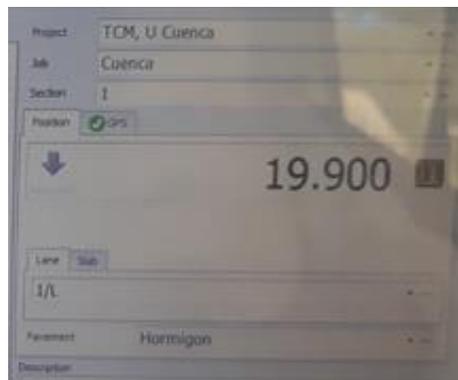


Figura 3.5. Abscisado para ejecución de ensayo.

La temperatura tiene un papel fundamental en el comportamiento de un pavimento asfáltico al momento de aplicar la carga y en el caso de pavimentos rígidos este valor no afecta en la toma de información de deflexiones.



3.2.3 Toma de datos

La norma ASTM D 4694-96 (ASTM Standars) en lo referente al procedimiento para toma de datos señala:

1. El equipo debe ser transportado hasta el lugar de prueba, se debe posicionar el plato de carga en el punto de prueba deseado. El lugar de prueba debe estar limpio asegurando de que el plato de carga este completamente en contacto con la superficie.
2. Se baja la placa de carga y los sensores, estos deben estar correctamente asentados en la superficie.
3. Se eleva el generador de la fuerza a la altura deseada y se lo deja caer, se graban las lecturas de deflexión medidas y la carga máxima.
4. Se realiza al menos dos golpes (drops) en el punto de ensayos, y se compara los resultados, si la diferencia es mayor a 3% para cualquier sensor, se registra esta variabilidad en el reporte. Se pueden ejecutar pruebas adicionales con la misma carga o con cargas diferentes.
5. Se levanta el plato de carga y los geófonos y se continúa al siguiente punto de ensayo.

A partir de las mediciones de deflexiones se obtienen variables fundamentales para el diagnóstico, análisis y rehabilitación o reforzamientos estructurales de una estructura de pavimento. Para el presente estudio, se realizan un total de 510 ensayos de deflexión en 102 centros de losa del pavimento que conforma los dos tramos de la vía en los dos sentidos de circulación aplicando cinco estados de carga durante el ensayo. En cada punto evaluado se realizan dos lecturas para asegurar la repetitividad de la medición dentro de un rango aceptable de variación, considerando para los cálculos el valor correspondiente al segundo golpe.

3.2.4 Almacenamiento de datos

Los datos registrados por el Falling Weight Deflectometer (FWD) se encuentran en un archivo de extensión “txt” en el que consta la información referente al abscisado, la descripción del punto donde se ejecuta el ensayo en el carril considerado (centro de losa, junta), tipo de superficie, posición geográfica, las deflexiones captadas por los geófonos en cada uno de los golpes, temperatura ambiente, y la carga real aplicada en el momento del ensayo (ver Figura 3.6). Esta información es importada a un archivo Excel para su manejo y depuración de datos erróneos que se pueden dar durante la toma de datos ya que los parámetros para captar la información son ingresados manualmente, como son la carga, código empleado para la muestra, número de ensayos, y en otros casos, cuando se ejecuta el



ensayo sobre una superficie no adecuada ya sea que presente irregularidades en el posicionamiento de los geófonos, es decir, que estos no queden correctamente asentados en la superficie o que se ejecute el ensayo a sabiendas de que existe una obra de alcantarillado.

\$2
 Chainage [m]..... 18397
 Lane..... 1/R
 Pavement description... Hormigon
 Remarks.....
 Position of Drop: Longitude: 79°9'12.2760"W Latitude: 2°48'35.8500"S Altitude: 3357.1 m

\$3
 Sequence: 1/5 No. of drops: 2 Fallheight: 10 Time: 13:13

Drop	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	D(9)	D(10)	kPa	kN	Air	Sur.	Man.	Pulse time
1	71.3	70.5	67.7	54.5	33.6	26.5	15.2	11.0	15.1	68.2	493	34.85	16.9	21.8	20.1	29.00
2	70.5	69.5	66.9	53.9	33.1	26.0	14.7	10.7	15.0	67.7	492	34.75	16.9	21.7	20.1	29.00

Figura 3.6. Información en Archivo “txt” del ensayo.

Como se indicó en la sección 3.2 (Pruebas de deflectometría de impacto con el FWD), parte del levantamiento de información constituye en realizar ensayos en el centro de la losa aplicando diferentes cargas a intervalos de 5 kN partiendo de un valor de 35 kN hasta llegar a un valor de 55 kN tal como se muestra en la Figura 3.7. Resultados de deflexión para carga de 35 kN, Figura 3.8. Resultados de deflexión para carga de 40 kN, , Figura 3.10. Resultados de deflexión para carga de 50 kN, Figura 3.10. Resultados de deflexión para carga de 50 kN, Figura 3.11. Resultados de deflexión para carga de 55 kN, donde el valor de carga real es próximo a la carga nominal establecida.

\$3
 Sequence: 1/5 No. of drops: 2 Fallheight: 10 Time: 13:22

Drop	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	D(9)	D(10)	kPa	kN	Air	Sur.	Man.	Pulse time
1	79.4	79.3	76.8	63.5	41.3	33.7	20.8	14.7	17.5	77.8	500	35.31	17.3	21.9	20.1	29.75
2	81.6	81.2	78.5	65.0	43.0	34.9	21.3	15.0	17.3	79.1	512	36.18	17.3	21.6	20.1	29.50

Figura 3.7. Resultados de deflexión para carga de 35 kN

\$3
 Sequence: 2/5 No. of drops: 2 Fallheight: 25 Time: 13:23

Drop	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	D(9)	D(10)	kPa	kN	Air	Sur.	Man.	Pulse time
1	95.3	93.5	90.1	74.6	51.7	41.1	26.4	17.9	17.8	90.3	586	41.45	17.3	21.3	20.1	29.50
2	91.9	90.0	86.9	71.9	49.6	39.1	25.1	17.2	17.6	87.2	566	39.98	17.3	21.3	20.1	29.25

Figura 3.8. Resultados de deflexión para carga de 40 kN

\$3
 Sequence: 3/5 No. of drops: 2 Fallheight: 42 Time: 13:23

Drop	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	D(9)	D(10)	kPa	kN	Air	Sur.	Man.	Pulse time
1	106.7	103.6	99.5	82.3	58.5	46.2	30.4	20.8	18.6	99.4	644	45.55	17.3	21.1	20.1	29.25
2	106.8	103.9	99.9	82.4	58.7	45.8	30.5	20.6	18.5	99.6	646	45.65	17.3	21.1	20.1	29.25

Figura 3.9. Resultados de deflexión para carga de 45 kN



§3

Sequence: 4/5 No. of drops: 2 Fallheight: 58 Time: 13:24

Drop	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	D(9)	D(10)	kPa	kN	Air	Sur.	Man.	Pulse time
1	116.4	113.0	108.4	89.7	64.5	50.3	33.6	22.8	19.4	107.8	697	49.29	17.3	21.0	20.1	28.75
2	115.7	112.0	107.6	88.7	64.0	49.8	33.0	22.6	19.3	107.0	694	49.07	17.3	21.0	20.1	29.25

Figura 3.10. Resultados de deflexión para carga de 50 kN

§3

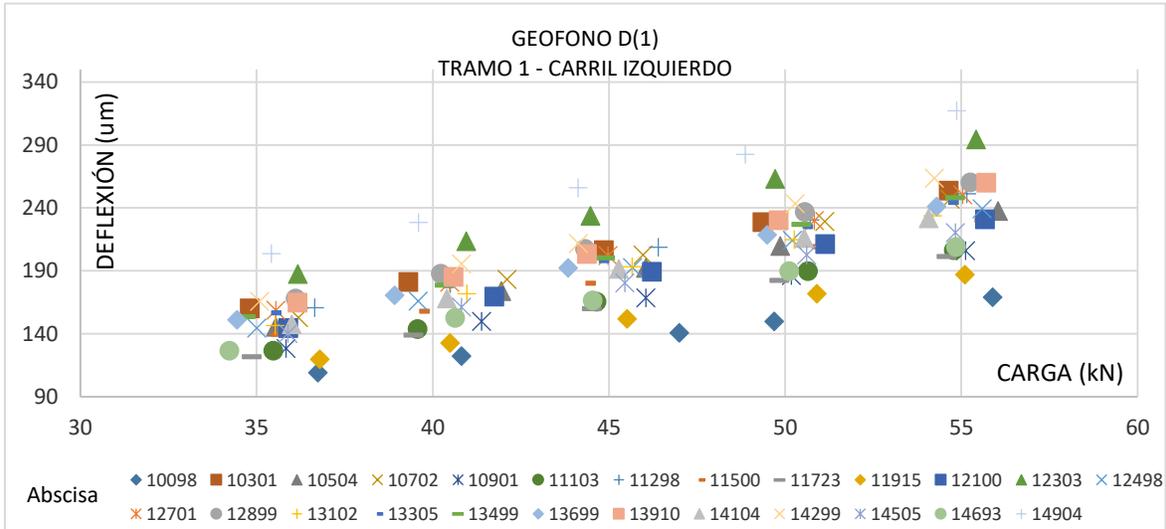
Sequence: 5/5 No. of drops: 2 Fallheight: 80 Time: 13:24

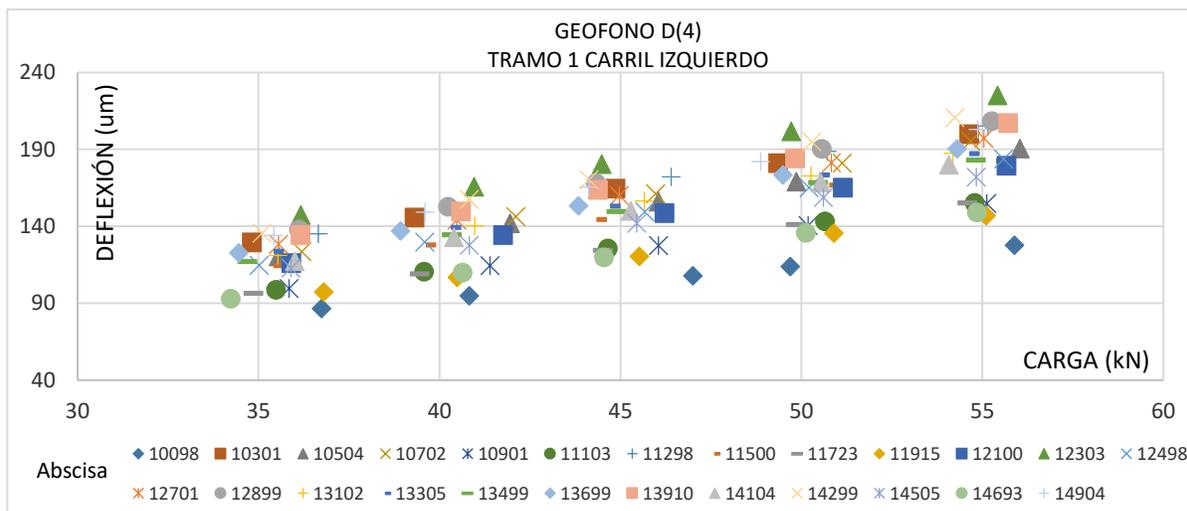
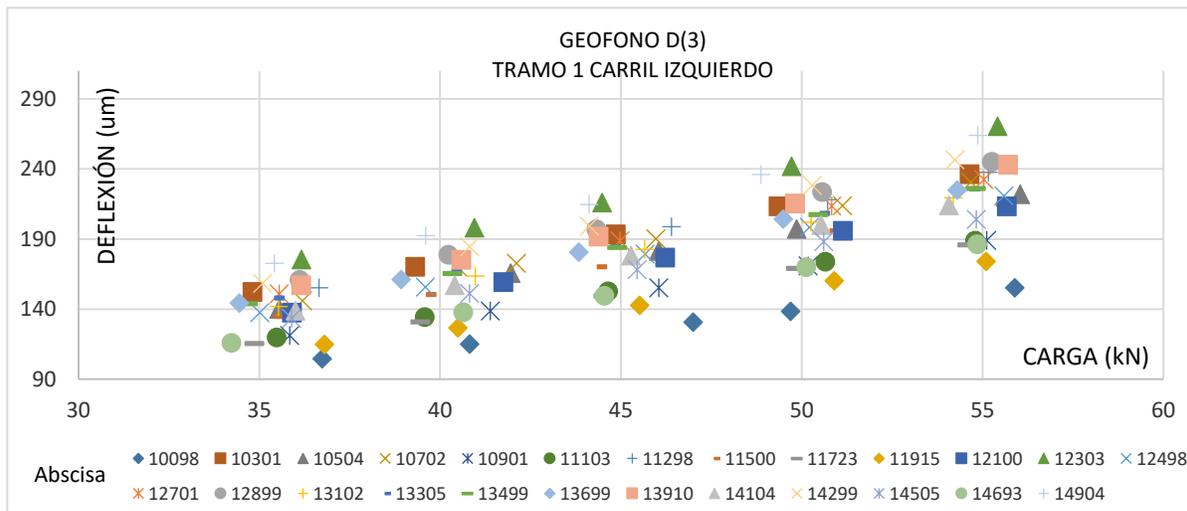
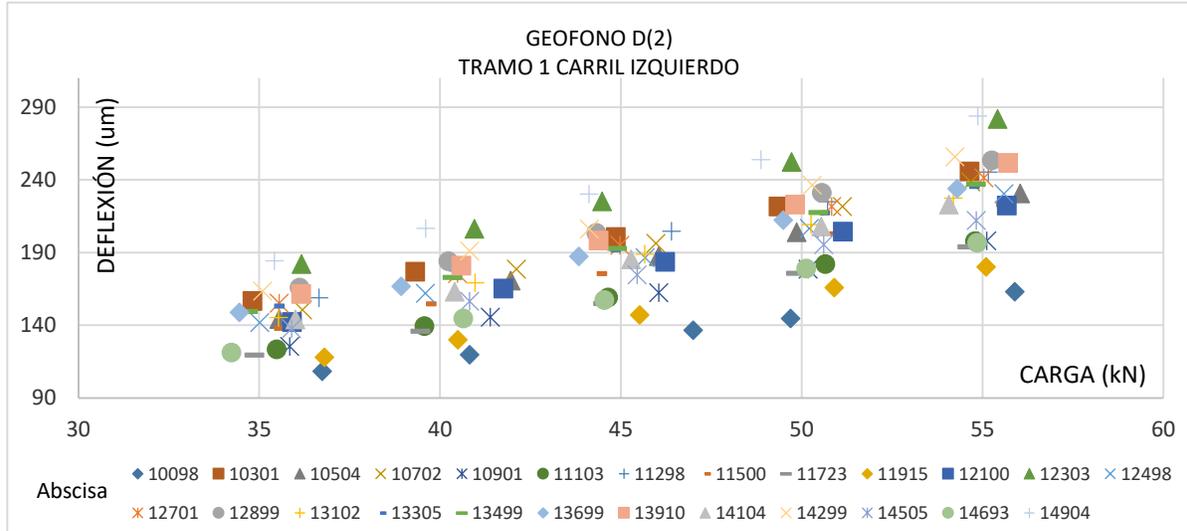
Drop	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	D(9)	D(10)	kPa	kN	Air	Sur.	Man.	Pulse time
1	130.4	125.7	120.4	99.6	73.1	56.3	37.7	25.7	20.7	119.3	769	54.39	17.4	20.9	20.1	28.75
2	129.0	124.2	119.2	98.6	72.1	55.8	37.5	25.5	20.5	118.2	762	53.89	17.4	20.9	20.1	28.75

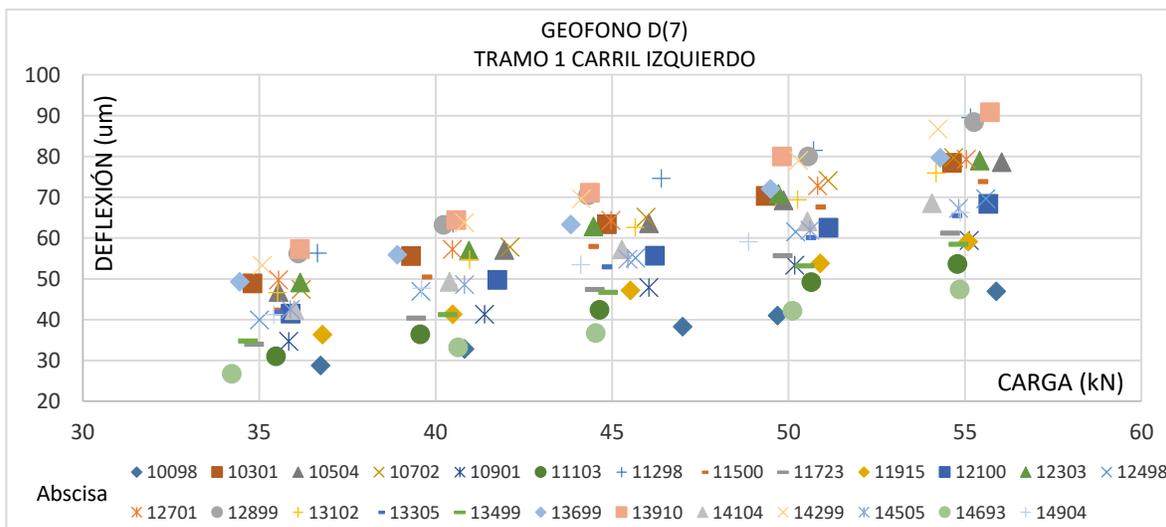
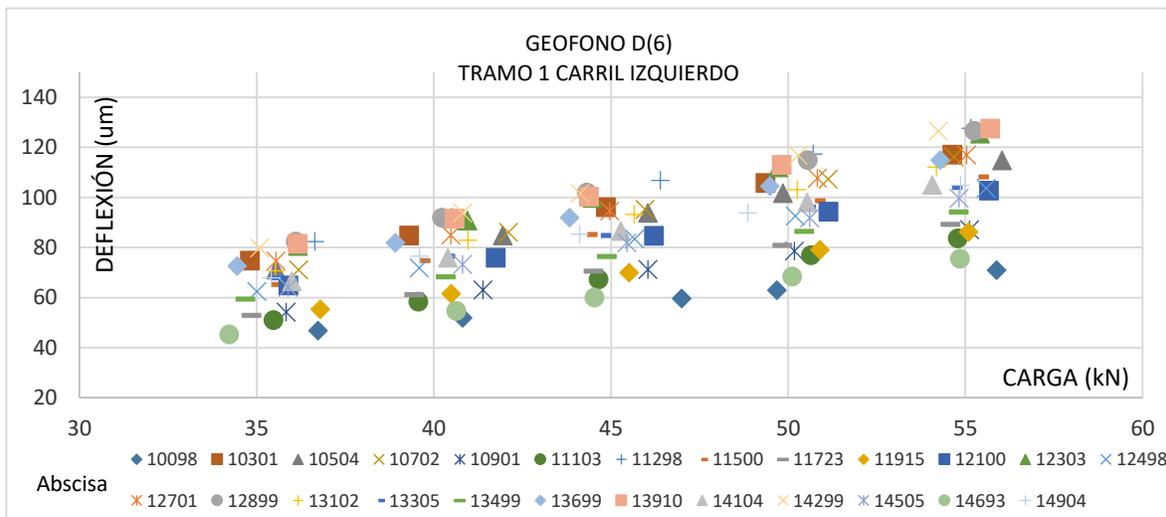
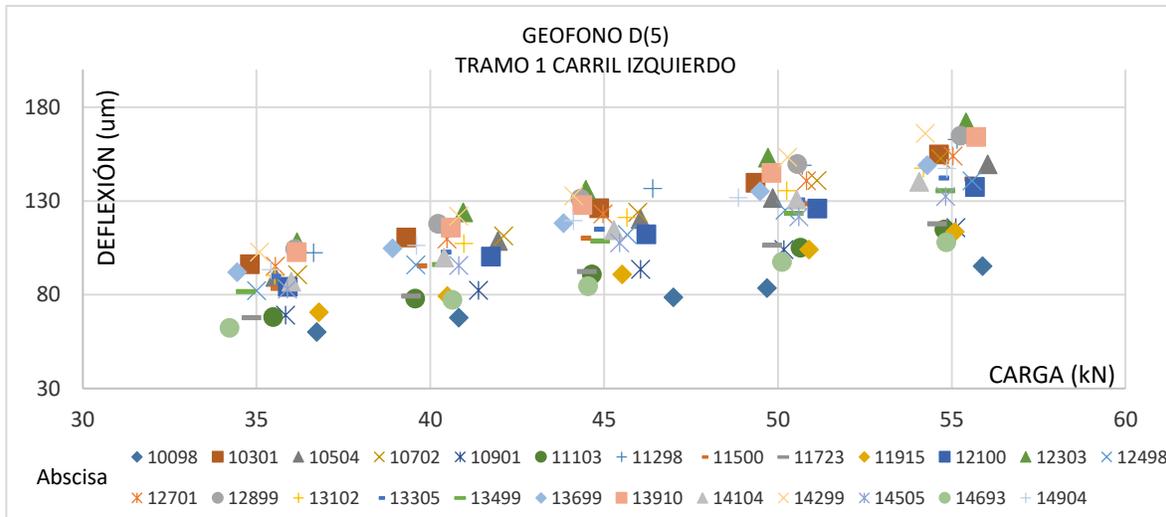
Figura 3.11. Resultados de deflexión para carga de 55 kN

3.3 Análisis de regresión

El proceso de análisis de datos comprende en primera instancia el idealizar la tendencia que tienen los valores de deflexión en cada uno de los geófonos, conforme se incrementa la carga aplicada en el mismo punto. Para esto, se analiza por separado los resultados de los 9 geófonos en cada tramo y por carril. En la Figura 3.12 (Carril Izquierdo - Tramo 1), (Carril Derecho - Tramo 1), (Carril Izquierdo – Tramo 2) y Figura 3.15 (Carril Derecho – Tramo 2) se muestran los valores de deflexión en cada geófono según la variación de carga para los dos tramos analizados en ambos sentidos de circulación.







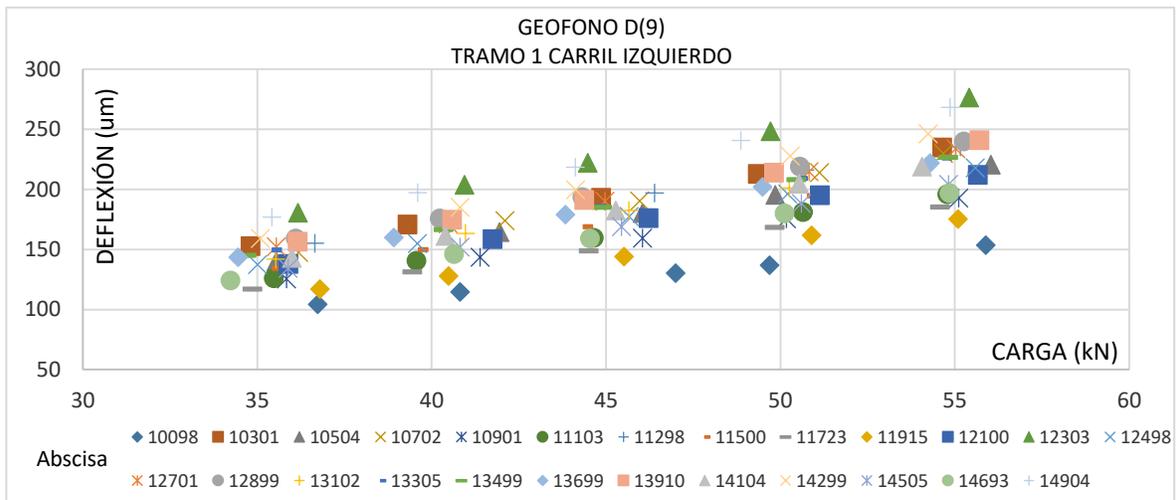
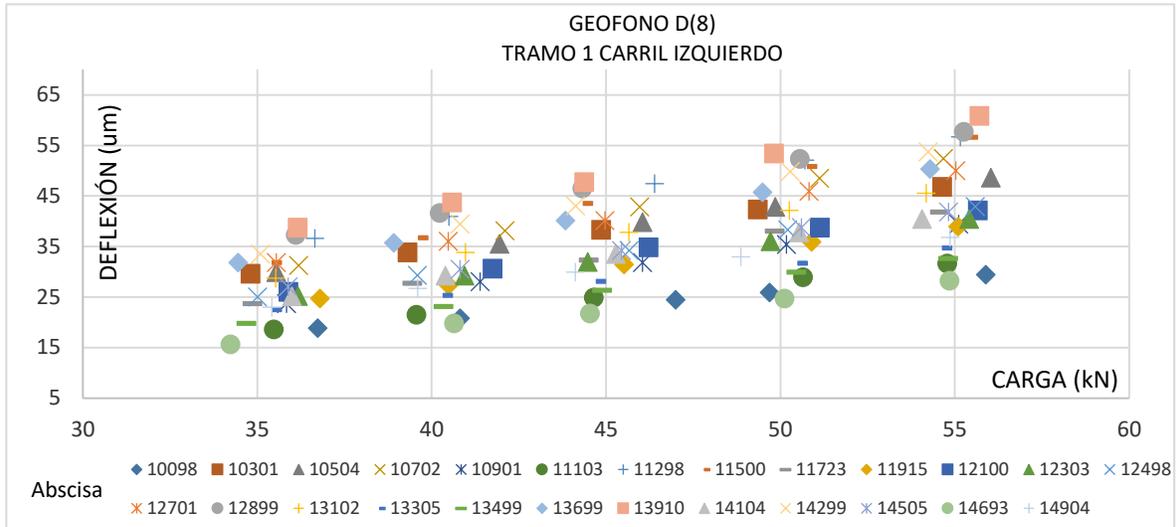
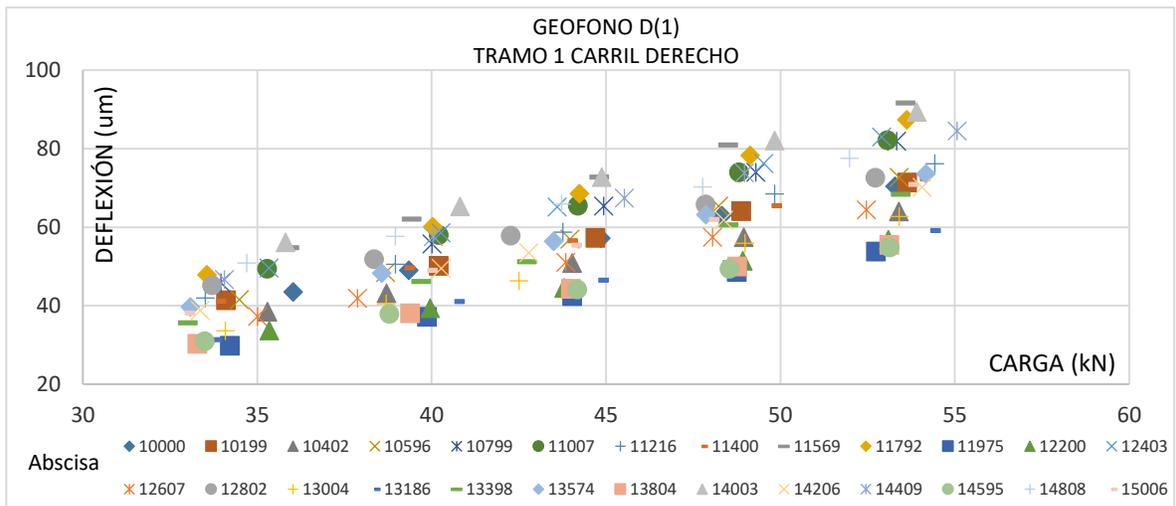
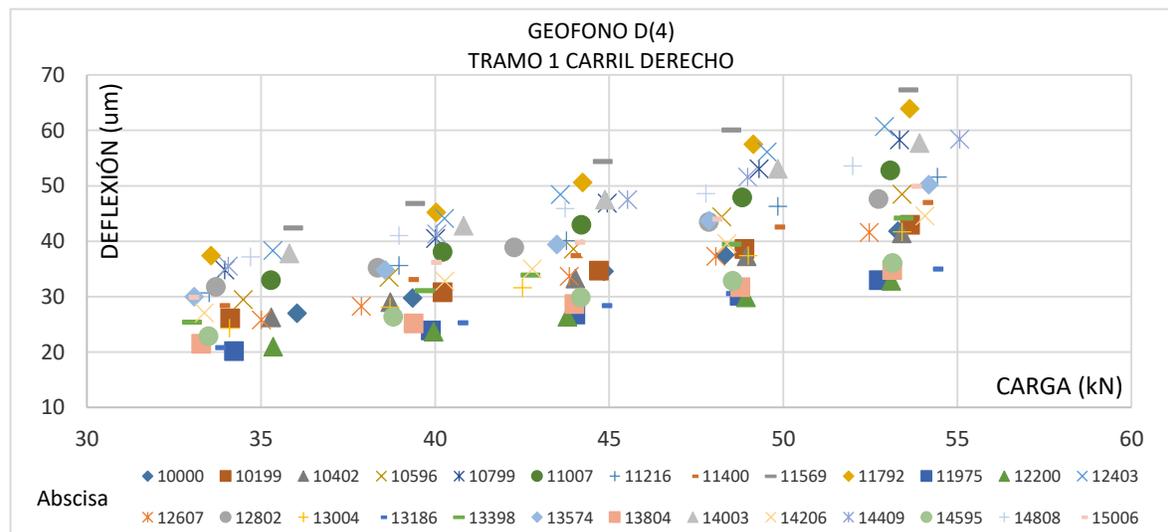
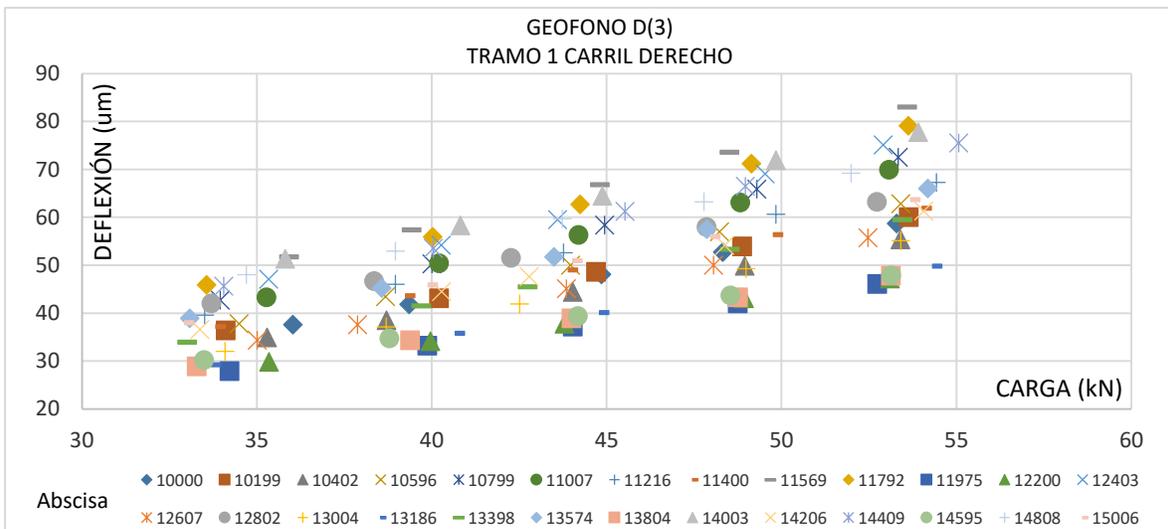
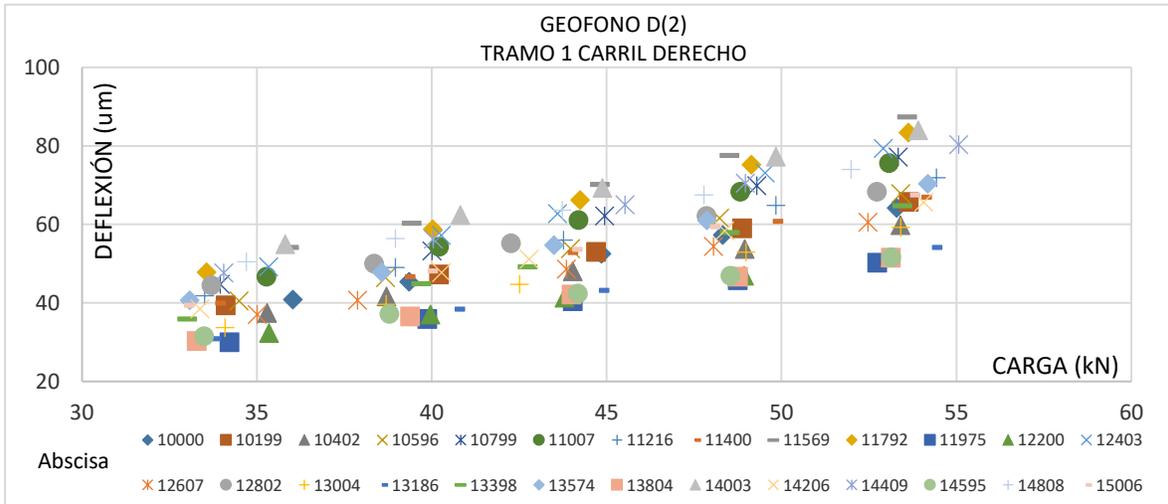
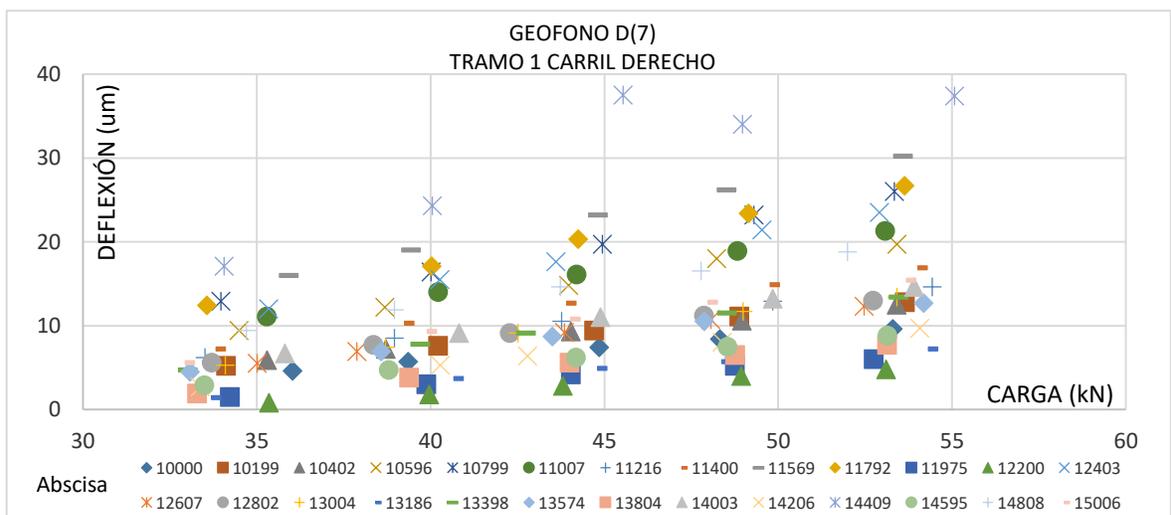
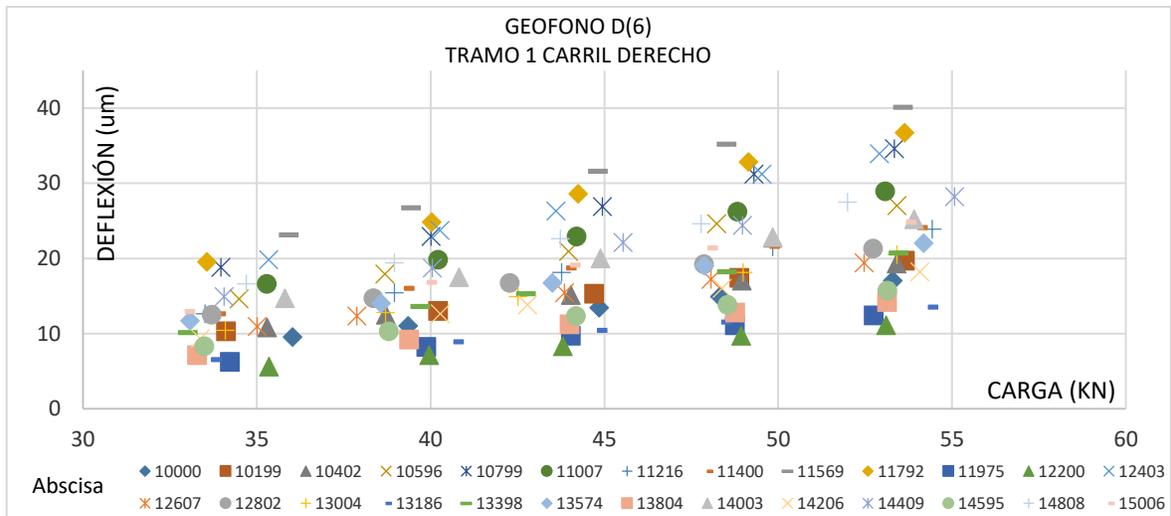
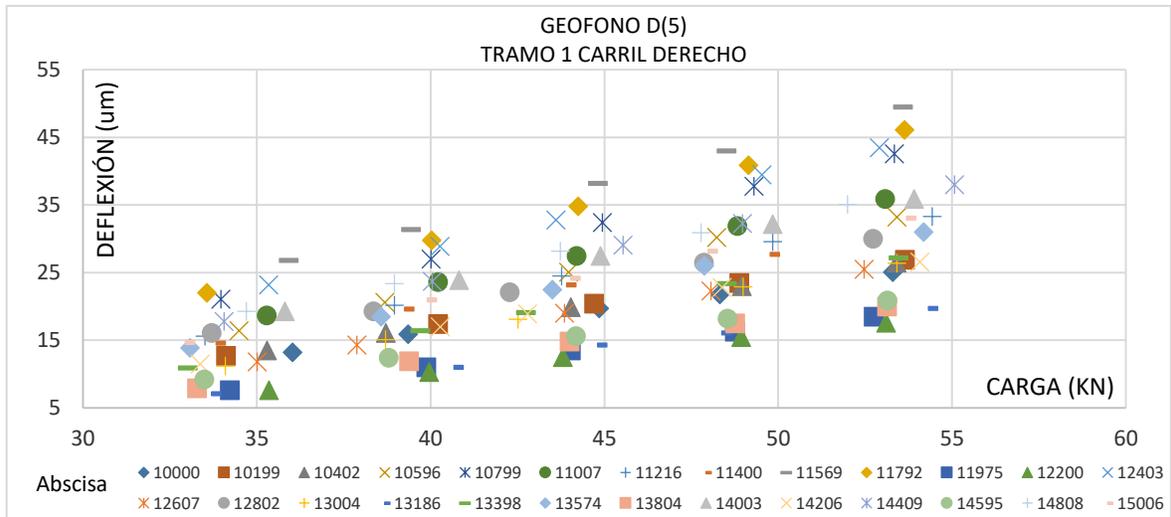


Figura 3.12. Resultados de deflexión en cada geófono carril izquierdo - Tramo 1.







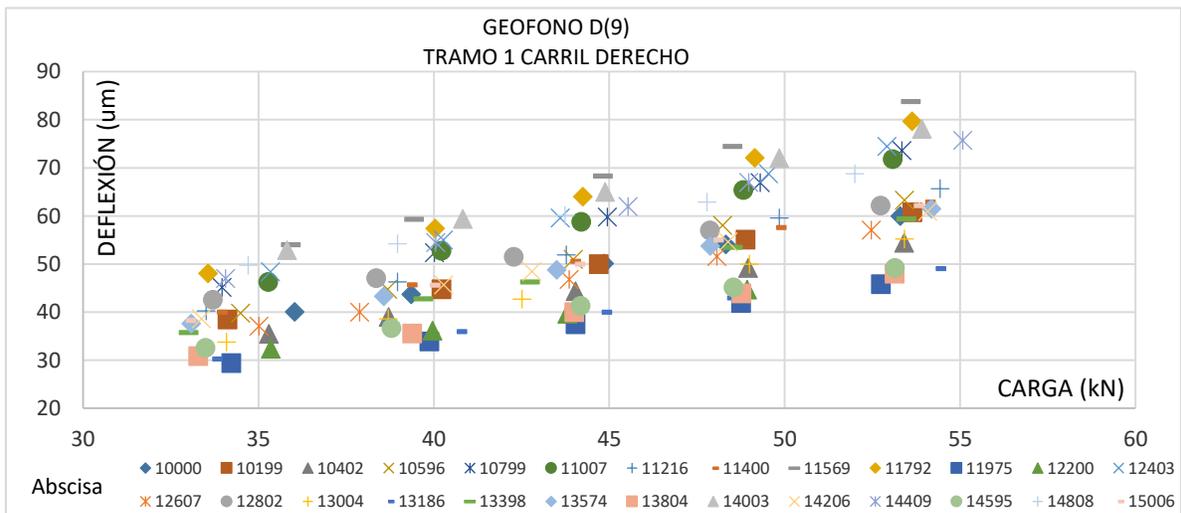
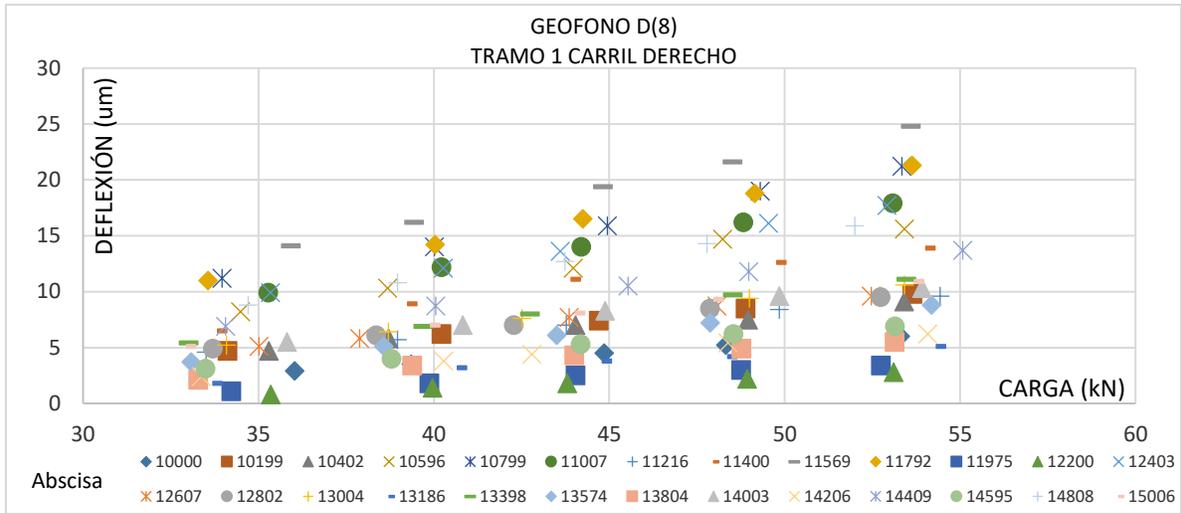
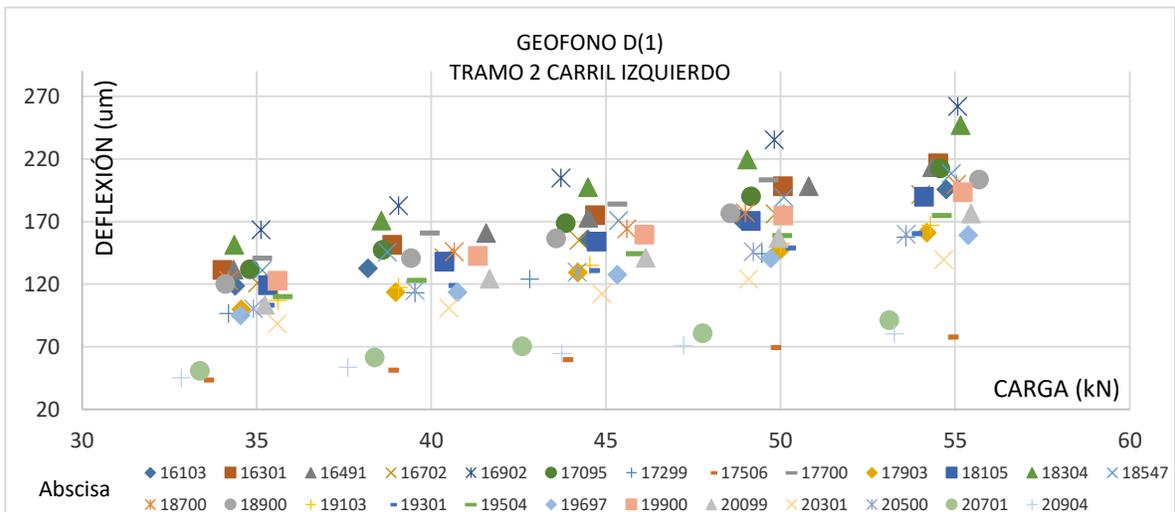
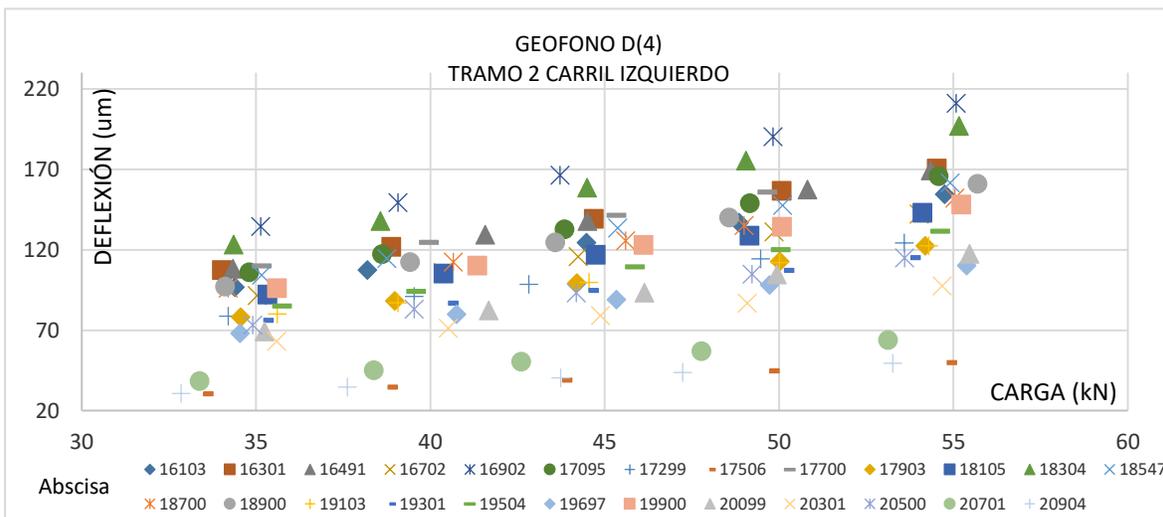
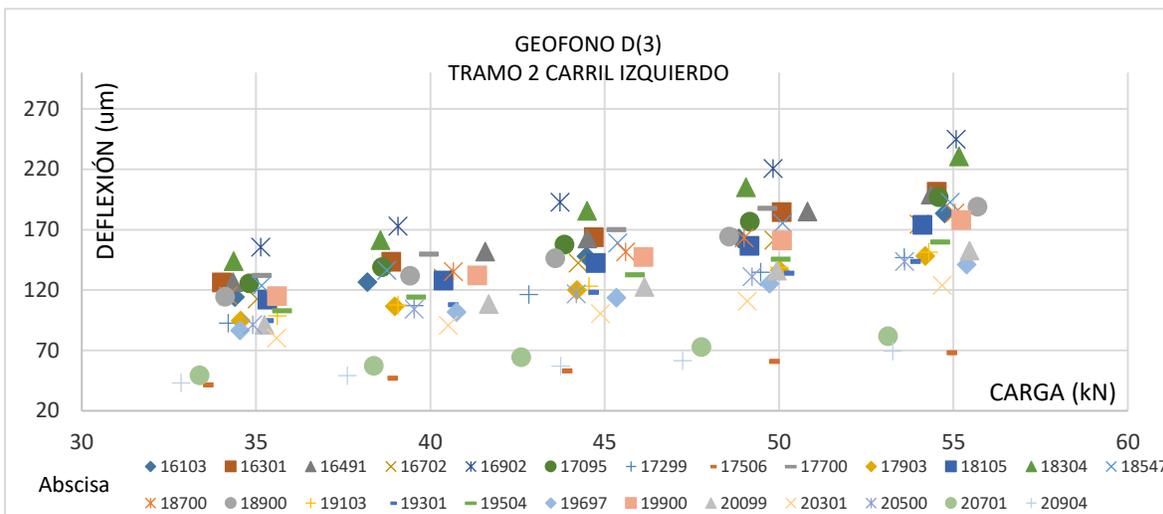
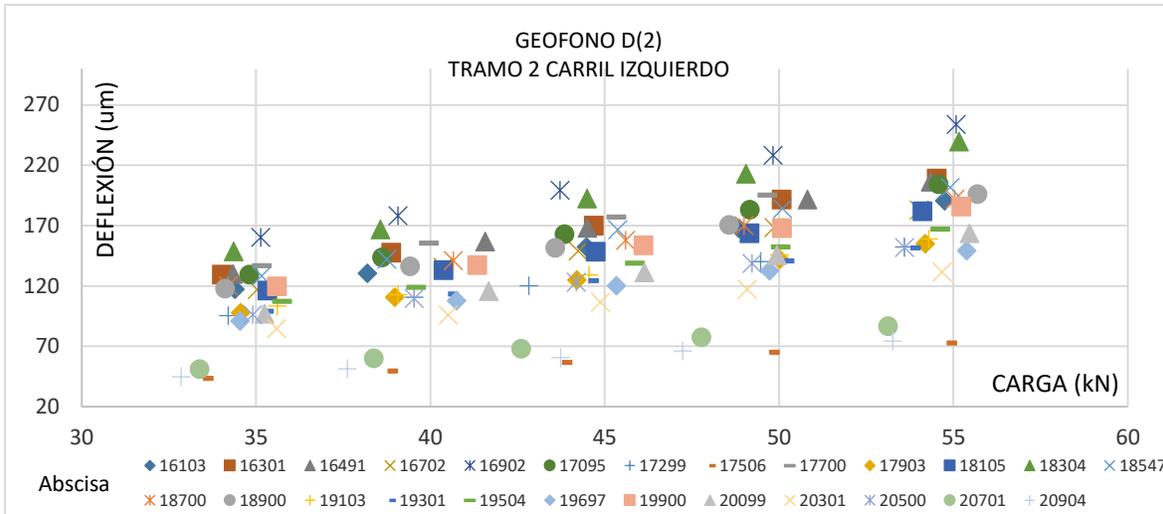
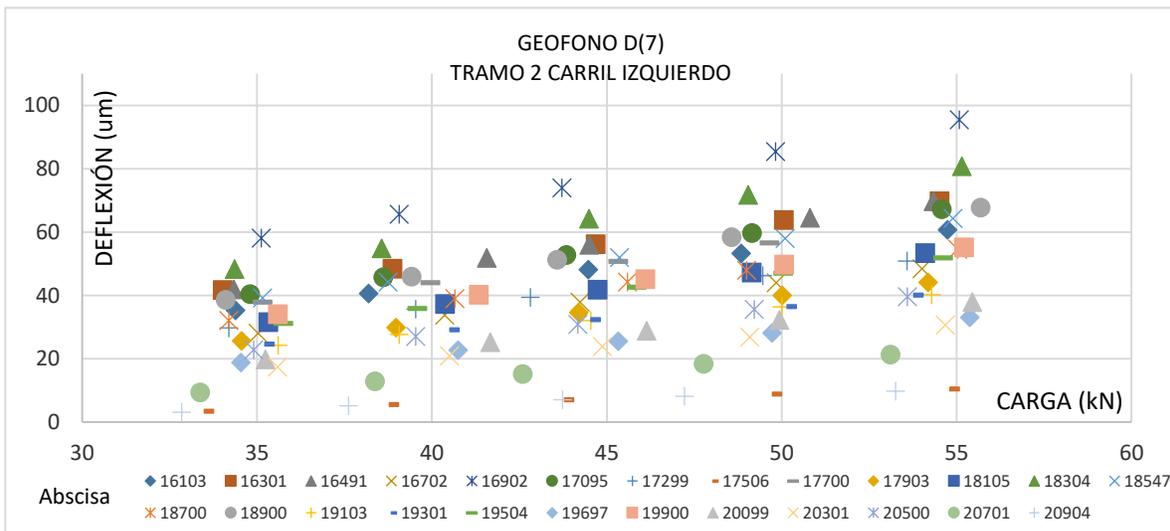
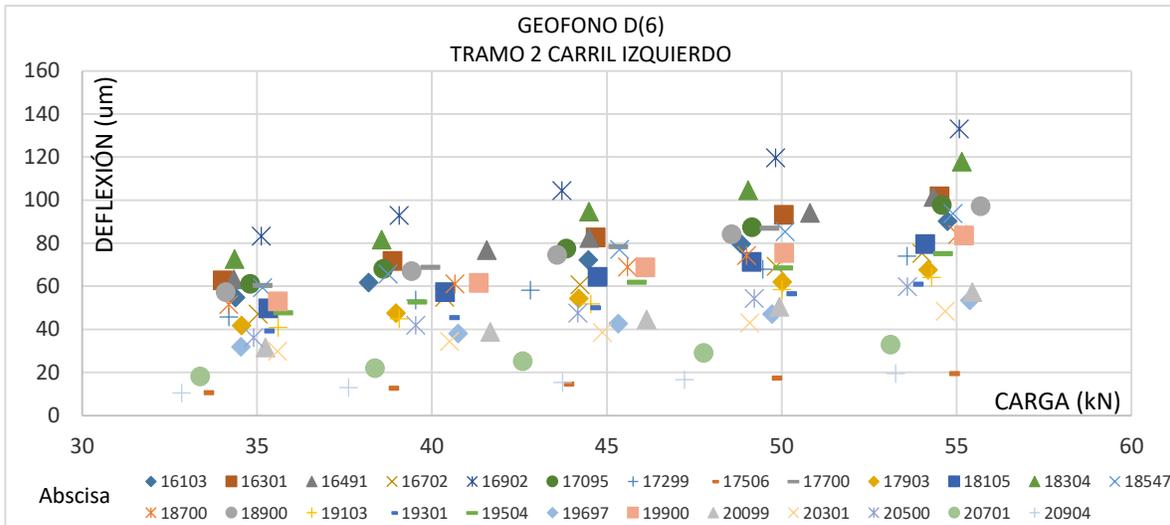
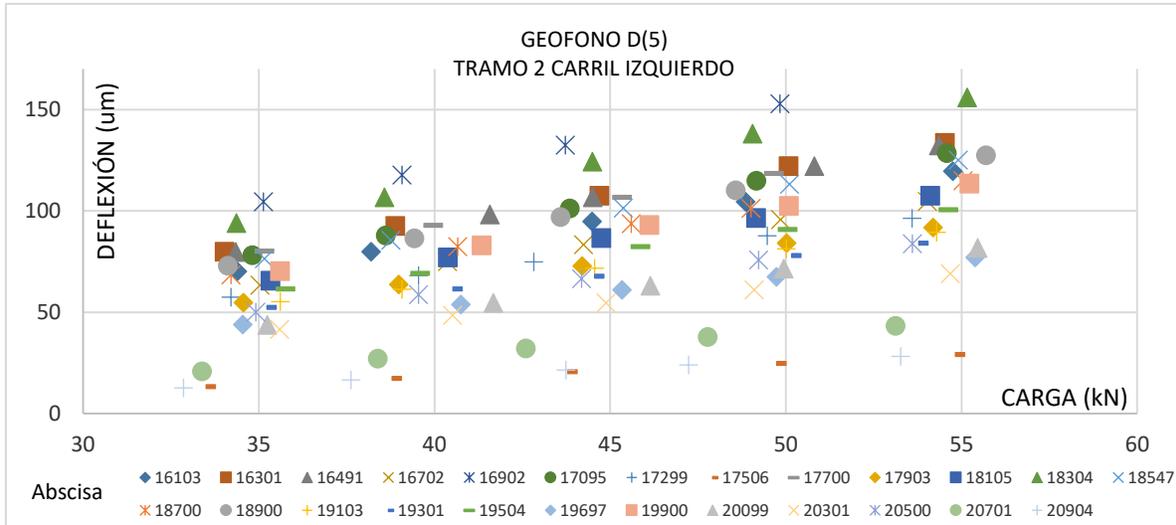


Figura 3.13. Resultados de deflexión en cada geófono carril derecho - Tramo 1.







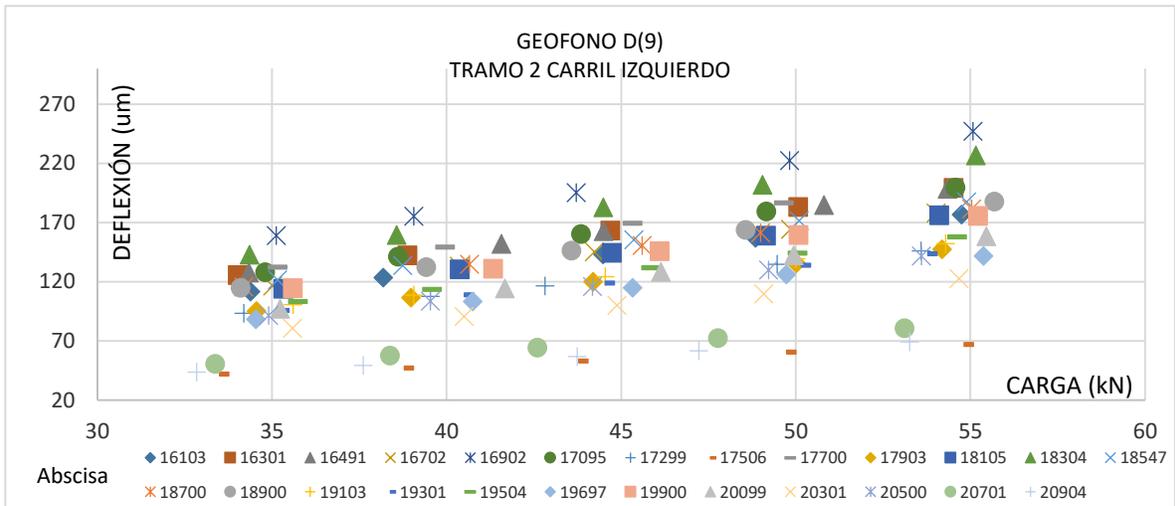
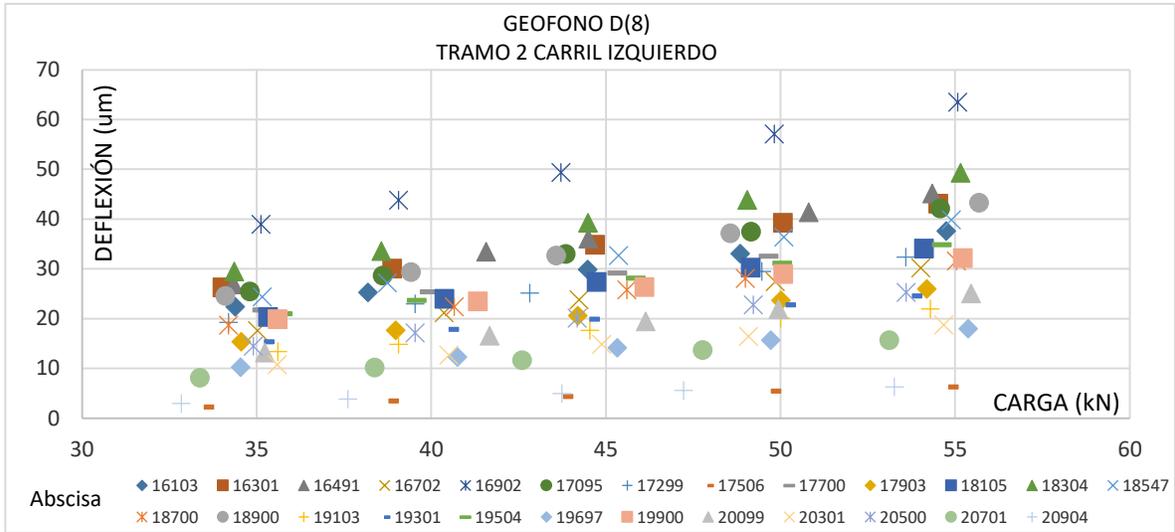
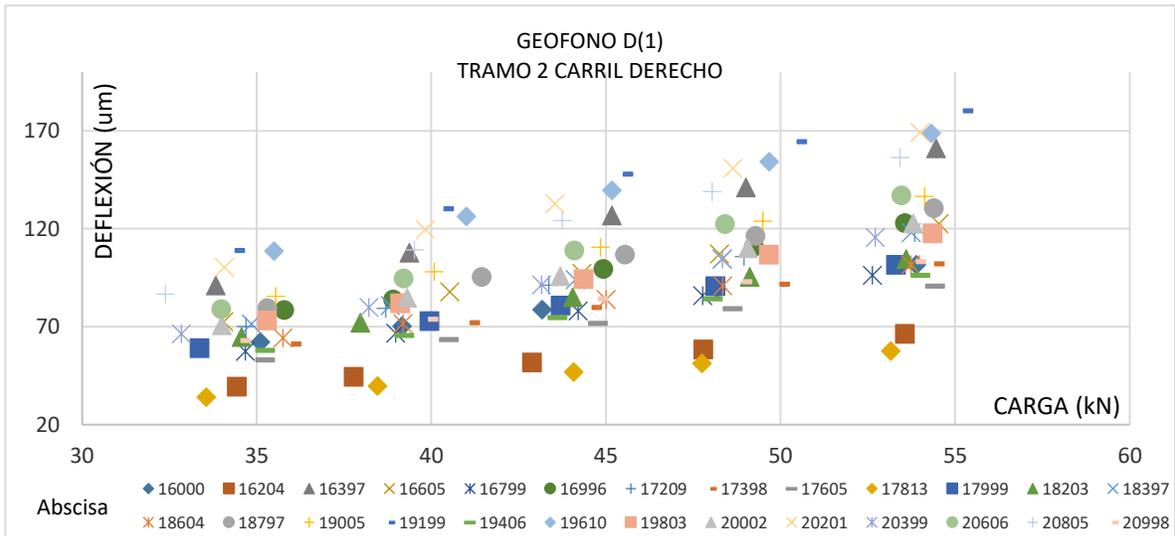
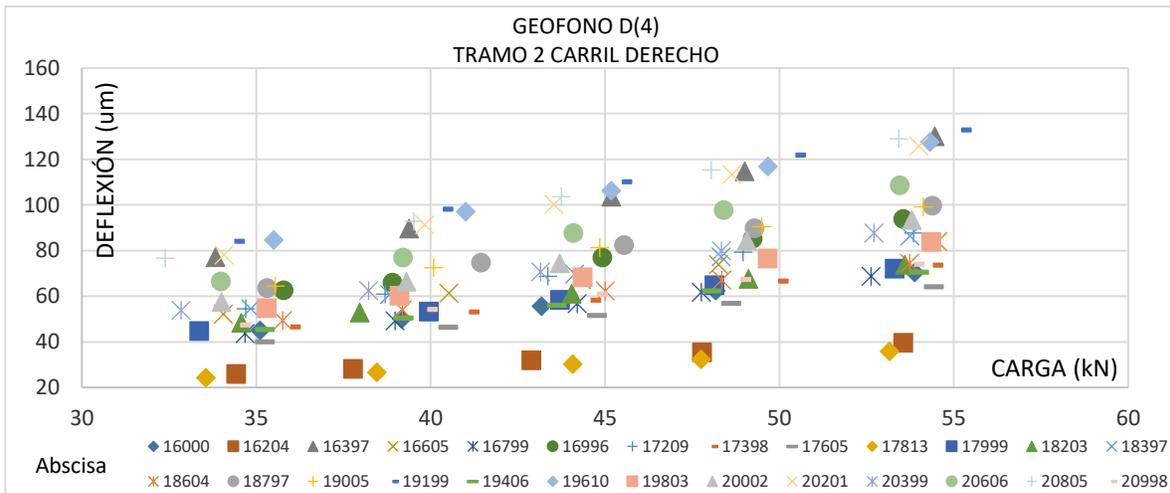
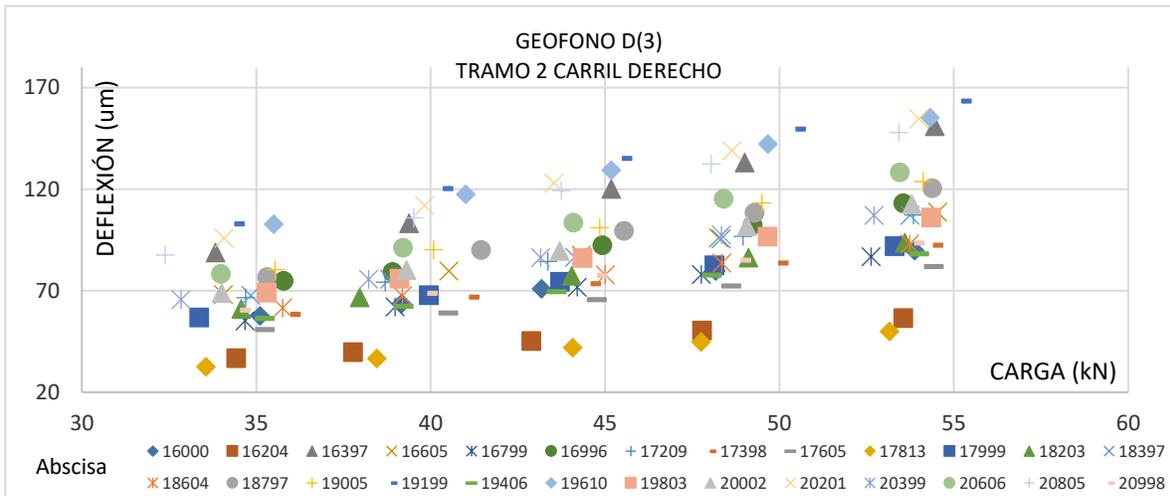
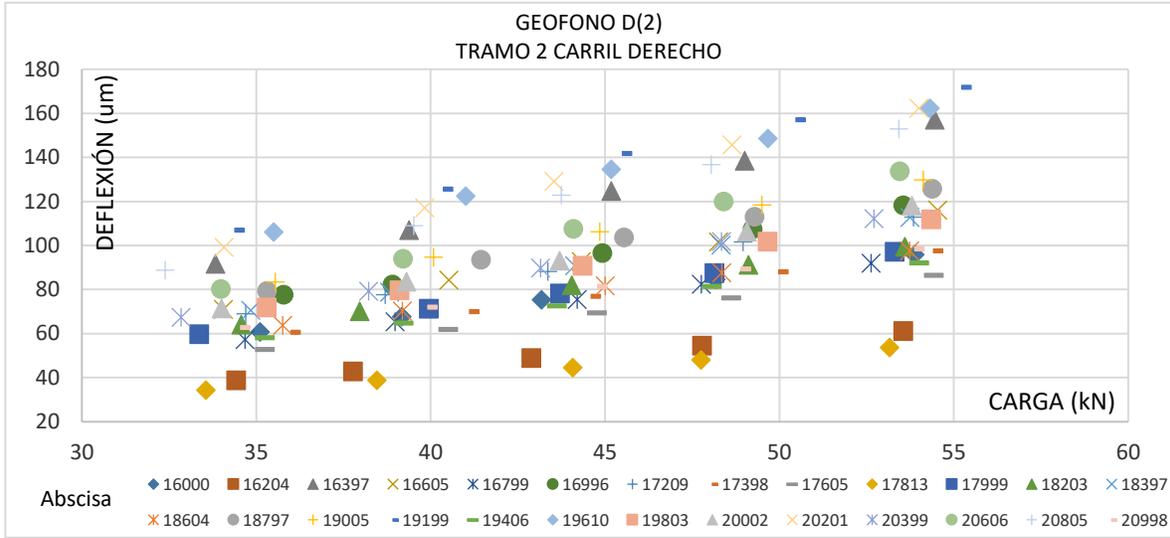
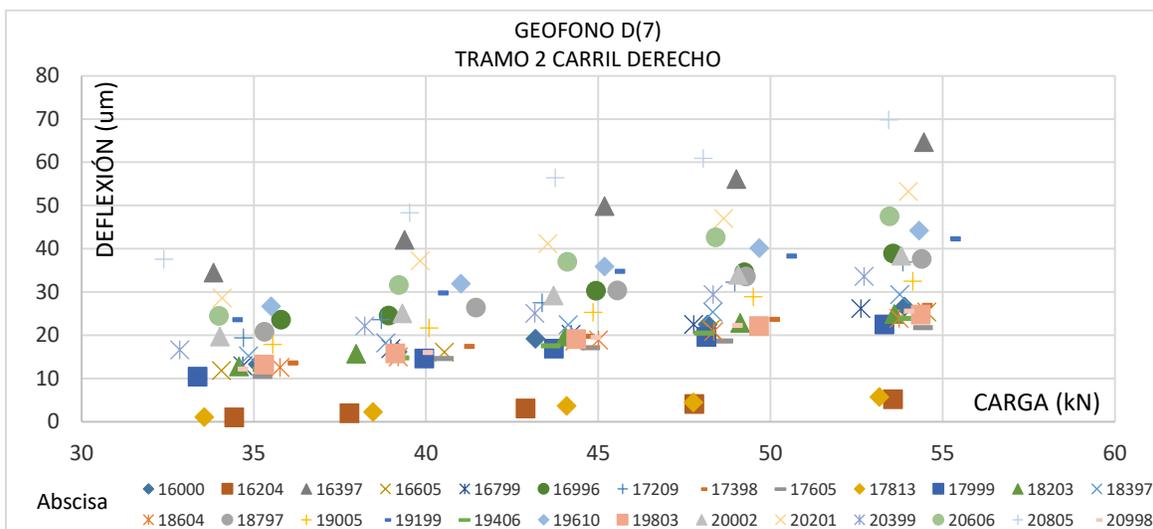
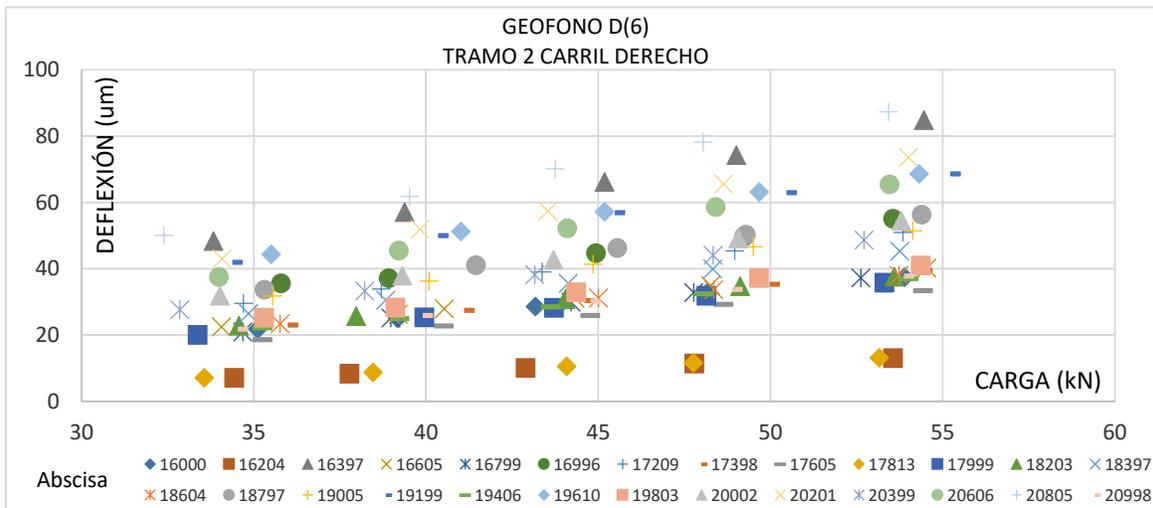
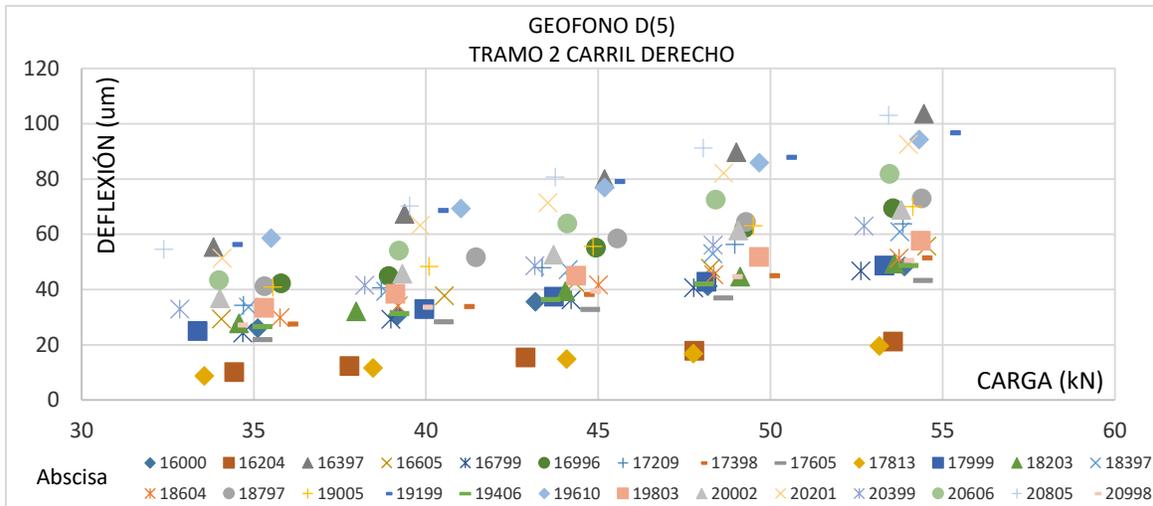


Figura 3.14. Resultados de deflexión en cada geófono carril izquierdo - Tramo 2.







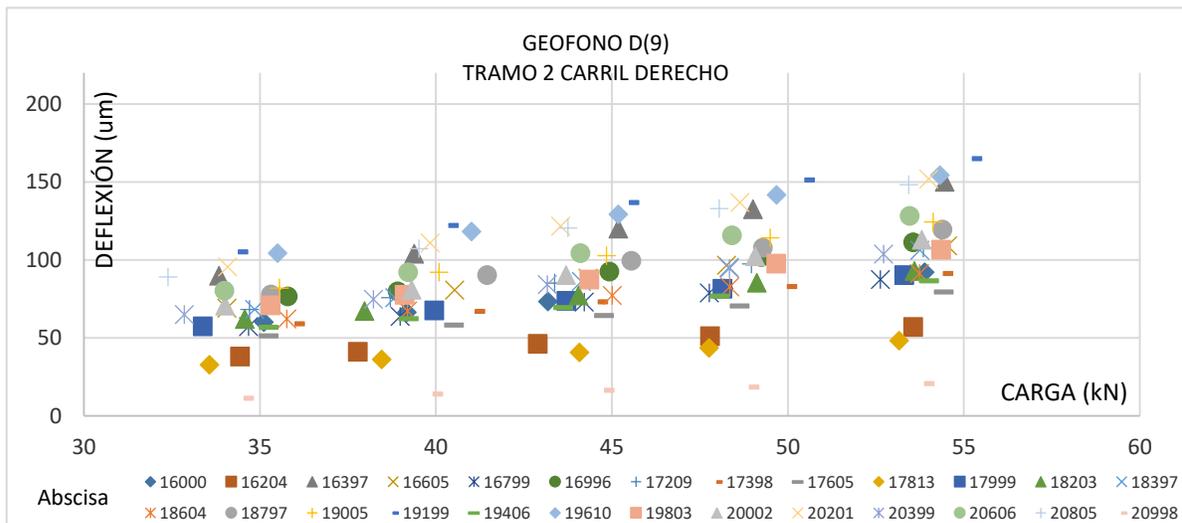
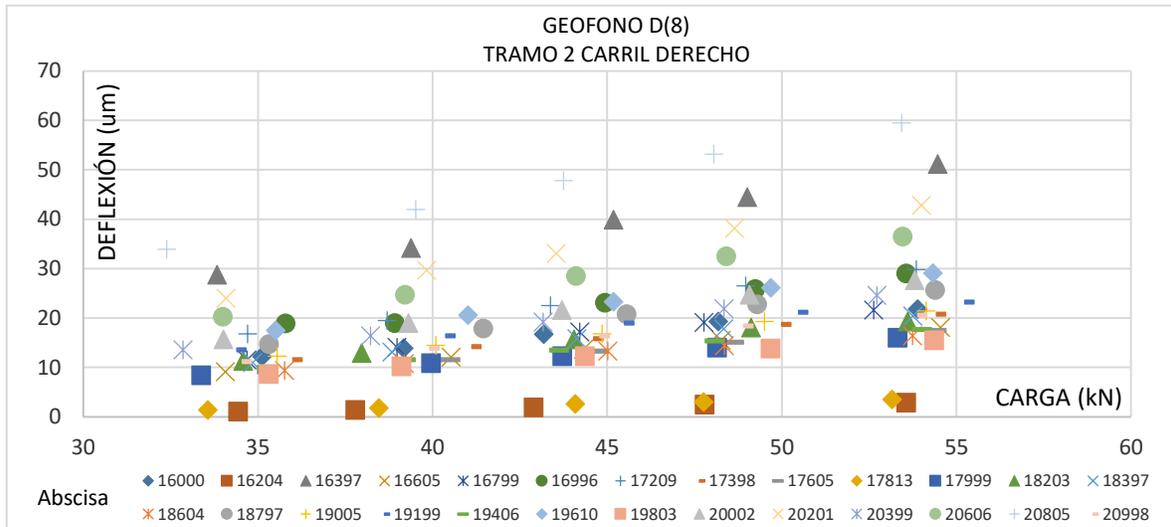


Figura 3.15. Resultados de deflexión en cada geófono carril derecho - Tramo 2.

El análisis de regresión da lugar a una ecuación matemática que permite describir la relación que existe entre dos variables. Es decir, obtener una línea “ideal” conocida como línea de regresión, que describa la relación o dependencia entre dos variables. Esta línea o función matemática, en el caso de una sola variable independiente o explicativa, puede ser expresada a través de una (Martínez Bencardino, 2012):

Recta o función lineal: $y = bx + c$

Parabólica de segundo grado: $y = ax^2 + bx + c$

Función exponencial: $y = ae^{bx}$

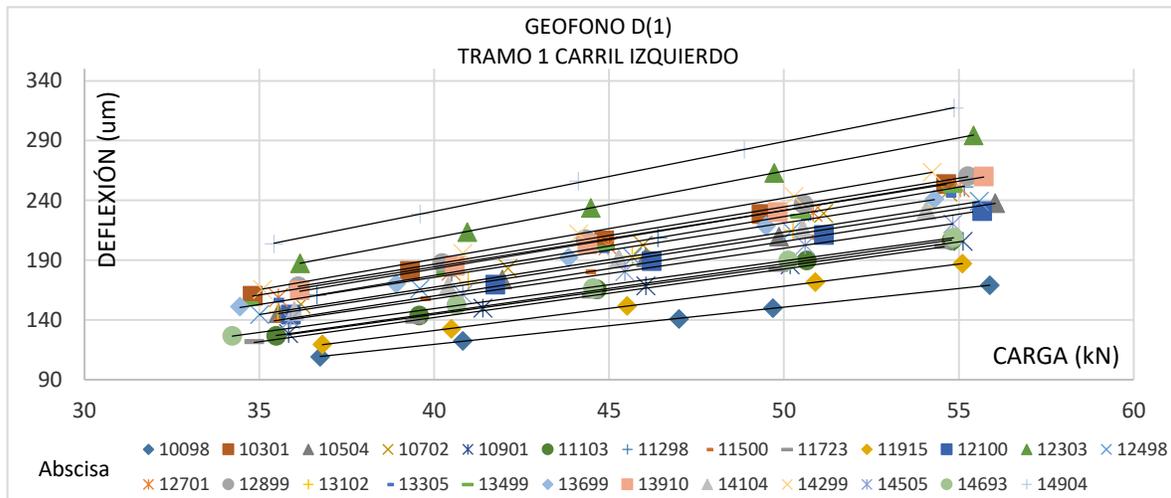
Función Potencial: $y = ax^b$

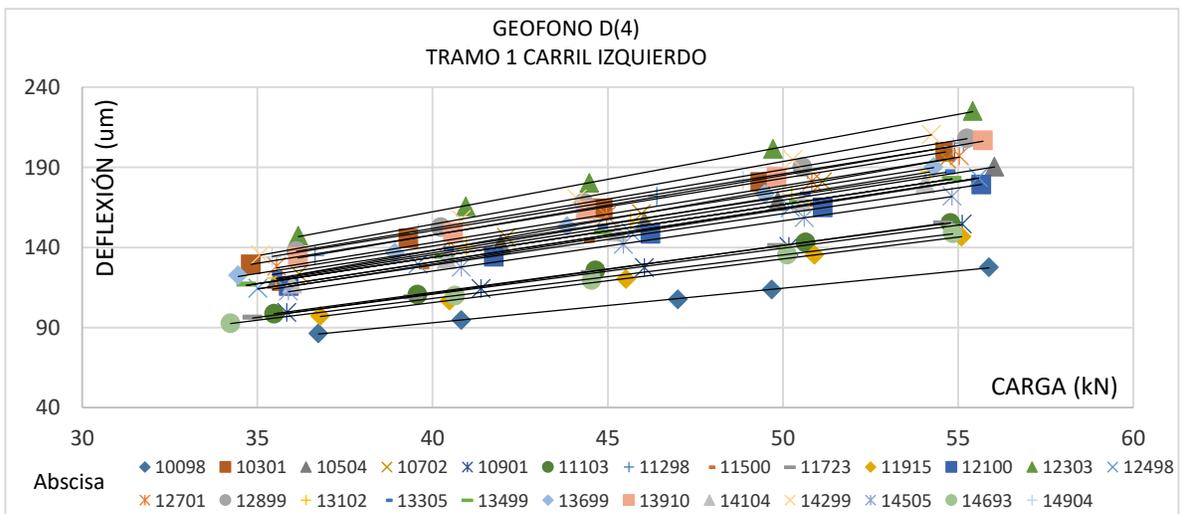
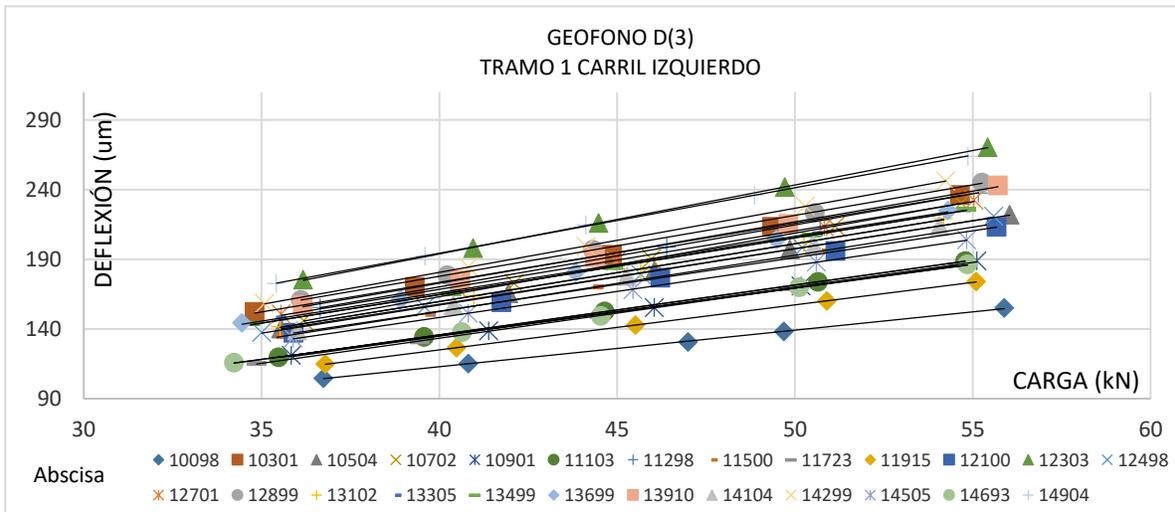
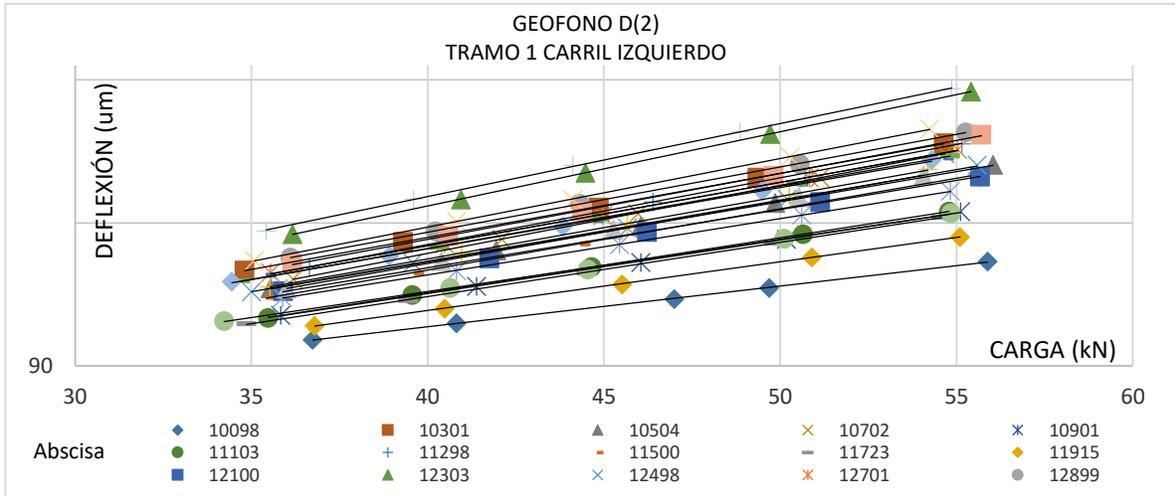


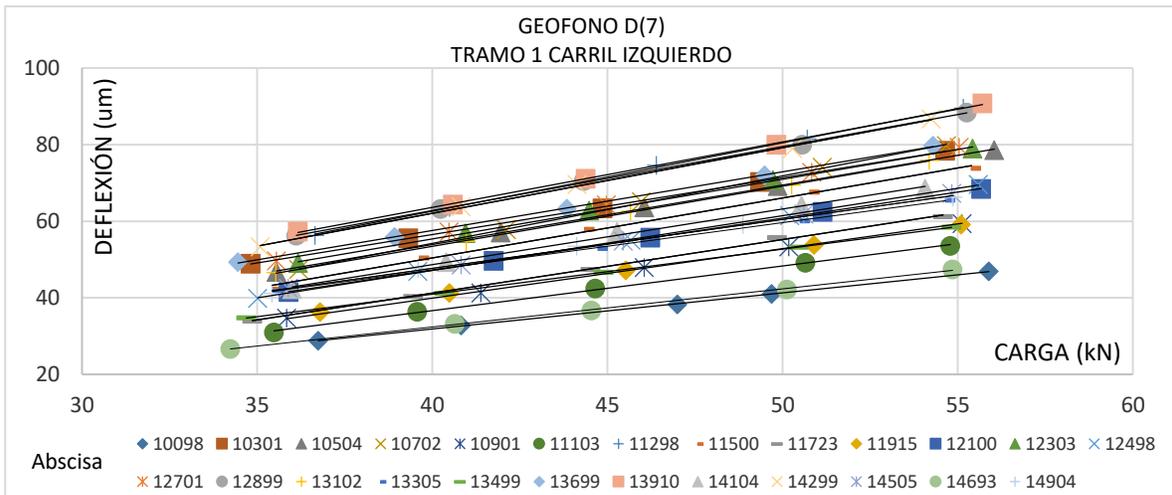
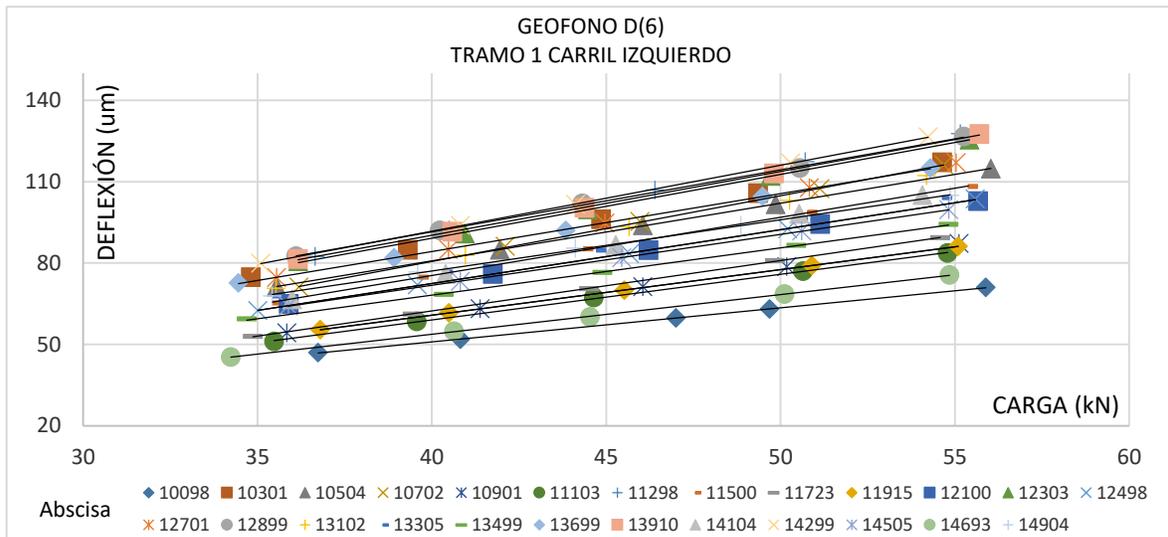
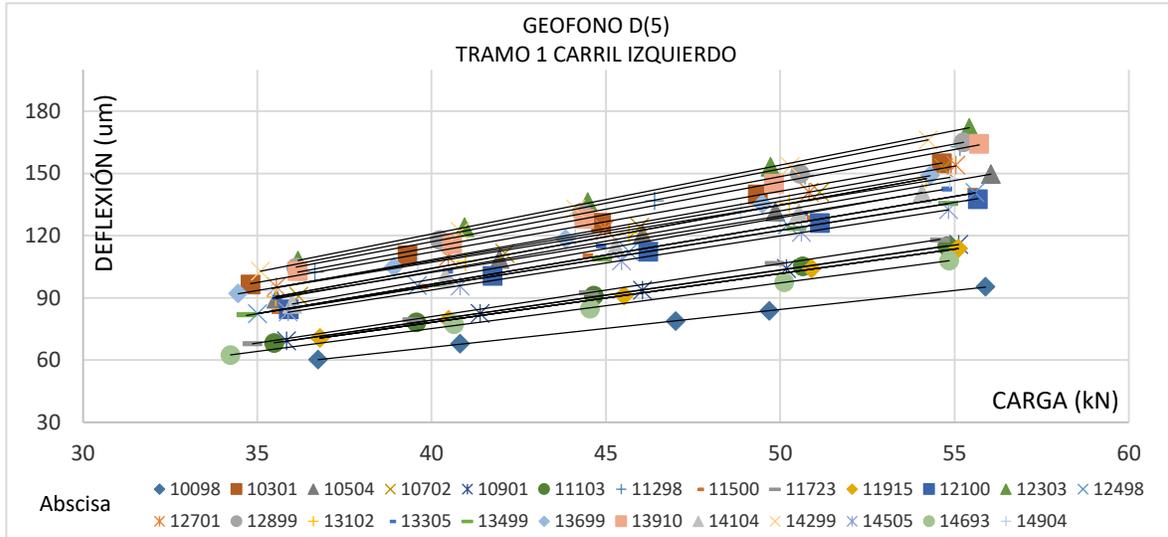
Para identificar la relación existente entre las variables Carga y Deflexión es necesario realizar un análisis de regresión y de esta manera estimar el valor de deflexión en función de la carga nominal dentro del proceso de recolección de información aplicando estados de carga. Para realizar el análisis de regresión de los valores de deflexiones captadas por lo geófonos, cuando se aplica diferentes cargas, se emplea la ecuación lineal por su simplicidad en el cálculo matemático posteriores y tendencia de la información. Los valores de los coeficientes de la ecuación son calculados mediante el método de mínimos cuadrados.

El coeficiente de determinación indica la calidad de una función o modelo para intentar replicar los resultados. El coeficiente de determinación es un valor tal que cumple con la condición $0 \leq R^2 \leq 1$. Cuando este valor es igual a 1, se dice que la correlación es perfecta, ya que los valores observados son exactamente iguales a los estimados, y a medida que el coeficiente de determinación disminuye, se dice que la recta representa menos al conjunto de observaciones (Martínez Bencardino, 2012).

Una vez realizado el proceso de graficar los resultados de los valores de deflexión en cada geófono y para cada estado de carga, a través de la herramienta Excel, se ha trazado la línea de tendencia para cada abscisa que comprende el tramo. El mejor ajuste obtenido es una ecuación lineal, obteniéndose un valor de R^2 de 1.00 en todos los 102 centros de losa ensayados. La Figura 3.16 muestra el trazado de la línea de tendencia para las variables carga y deflexión del carril izquierdo perteneciente al Tramo 1.







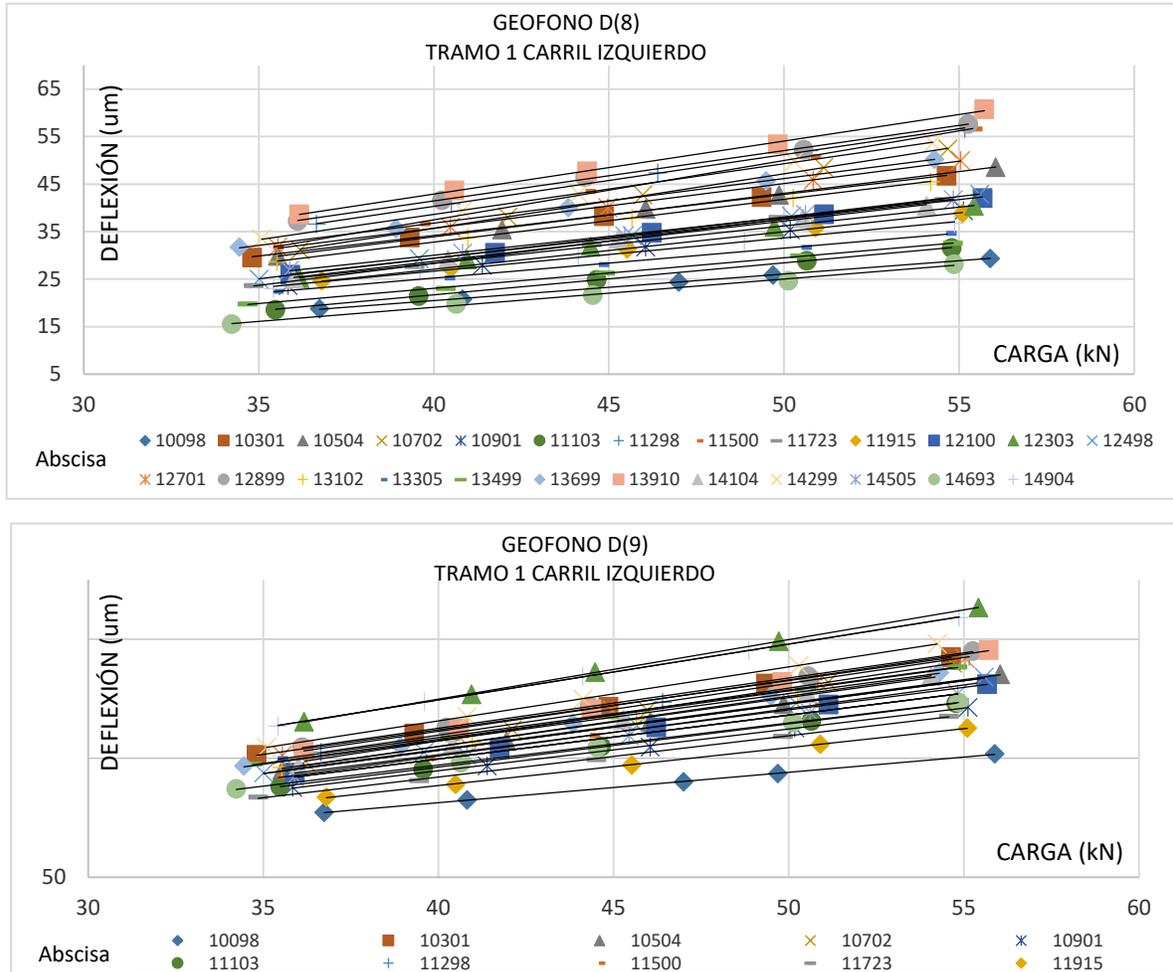


Figura 3.16. Líneas de tendencia para geófonos Tramo 1, carril izquierdo.

Considerando que el comportamiento de los valores de deflexión producido por diferentes estados carga en un mismo punto obedece a una ecuación lineal, se procede a encontrar los valores de deflexión en cada una de las abscisas de cada tramo para los valores de carga nominales de 35 kN, 40 kN, 45 kN, 50 kN y 55 kN a partir de las cargas reales ejecutadas en el ensayo de deflectometría aplicando la ecuación lineal que la representa.

Para explicar este procedimiento se tomará como ejemplo la abscisa 10+098 perteneciente al carril izquierdo del tramo 1, los coeficientes de la ecuación lineal se calcularon mediante el método de mínimos cuadrados los cuales se corroboran con los coeficientes de las nueve ecuaciones lineales presentadas en la Figura 3.17 obtenidas a través de la herramienta “Línea de tendencia” de Excel que representa la tendencia de las deflexiones medidas en cada geófono durante los ensayos ejecutados en esta abscisa.

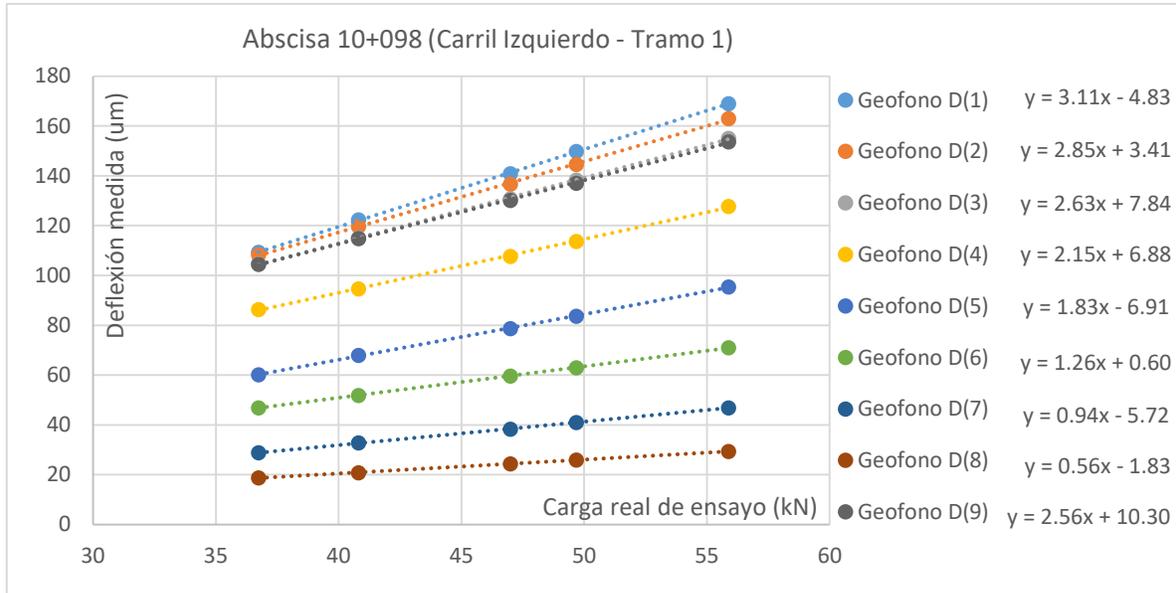


Figura 3.17. Ajuste lineal de deflexiones abscisa 10+098

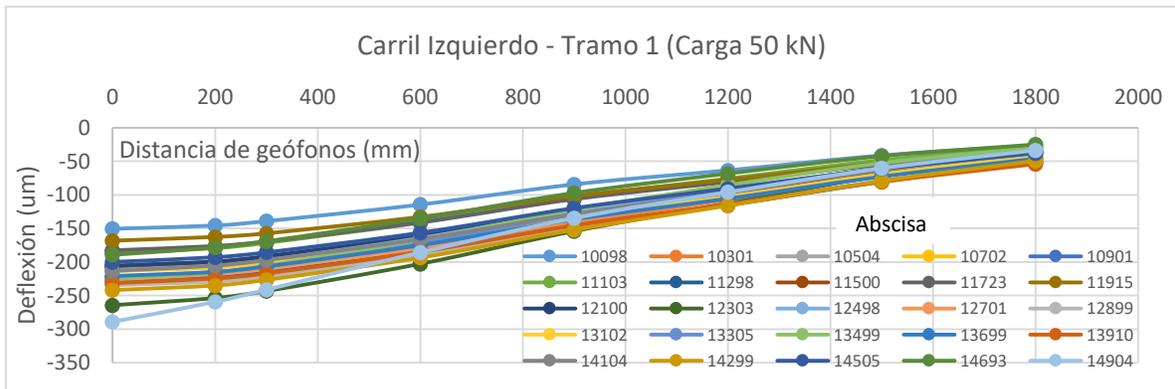
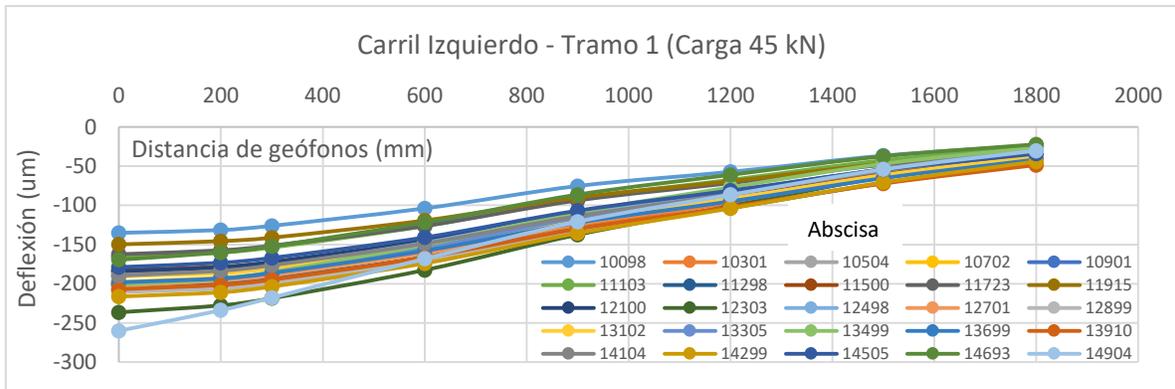
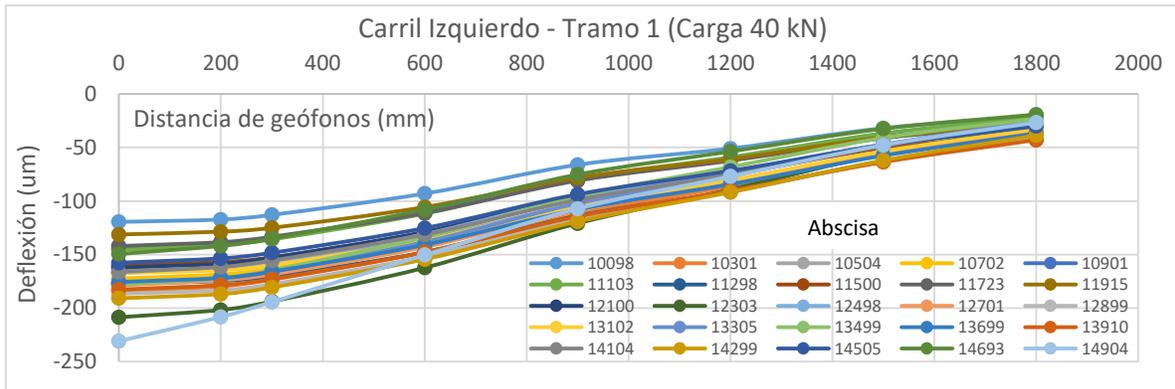
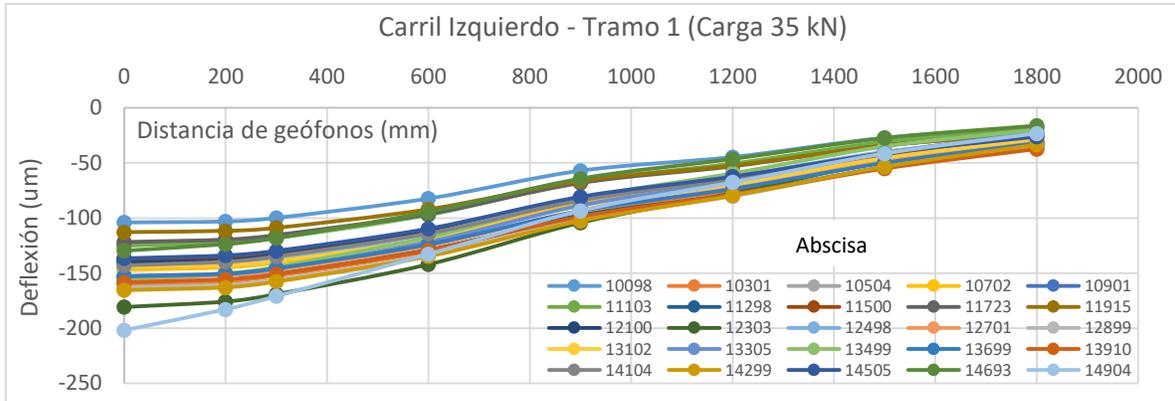
A partir de estas ecuaciones, se calcula los valores de deflexión en cada geófono correspondientes a las cargas nominales de ensayo 35 kN, 40 kN, 45 kN, 50 kN y 55 kN, la Tabla 3.2 muestra los valores de deflexión obtenidos para las cargas nominales en la abscisa 10+098.

Tabla 3.2. Deflexiones para cargas nominales, abscisa 10+098

	Deflexiones (µm)				
	35kN	40 kN	45 kN	50 kN	55 kN
Geofono D(1)	103.99	119.54	135.08	150.63	166.17
Geofono D(2)	103.06	117.30	131.53	145.77	160.00
Geofono D(3)	99.82	112.96	126.10	139.24	152.38
Geofono D(4)	82.28	93.05	103.83	114.60	125.37
Geofono D(5)	57.03	66.17	75.30	84.44	93.57
Geofono D(6)	44.63	50.92	57.21	63.50	69.79
Geofono D(7)	27.19	31.89	36.59	41.30	46.00
Geofono D(8)	17.71	20.50	23.29	26.08	28.87
Geofono D(9)	99.83	112.62	125.41	138.20	150.99

Nota: Los valores de deflexión de cada geófono en todas las abscisas obtenidos a través de este proceso se encuentran en el Anexo 7.1.

Este proceso se lo realiza para todas las abscisas donde se ejecutó el ensayo en los carriles de los dos tramos analizados, la Figura 3.18 muestra los cuencos de deflexión obtenidos para cada carga nominal en cada abscisa del carril izquierdo del Tramo 1.



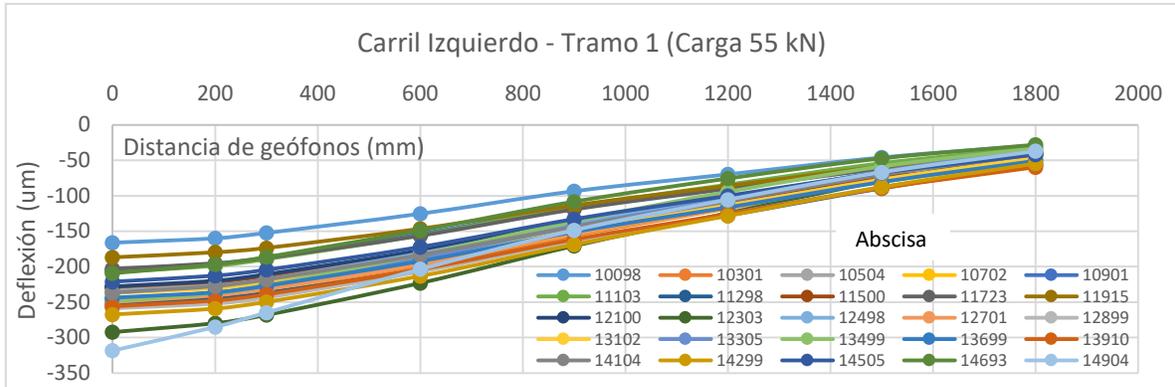


Figura 3.18. Cuencos de deflexión para carga nominal, Carril Izquierdo - Tramo 1

La forma del cuenco de deflexión permanece constante independientemente de la carga aplicada debido al comportamiento lineal que tiene la función que representa la deflexión producto de la carga aplicada. En la Figura 3.19 (cuencos carril derecho – Tramo 1), Figura 3.20 (cuencos carril izquierdo – Tramo 2), Figura 3.21 (Cuencos carril derecho – Tramo 2), se muestran los cuencos de deflexión obtenidos para la carga nominal de 40 kN.

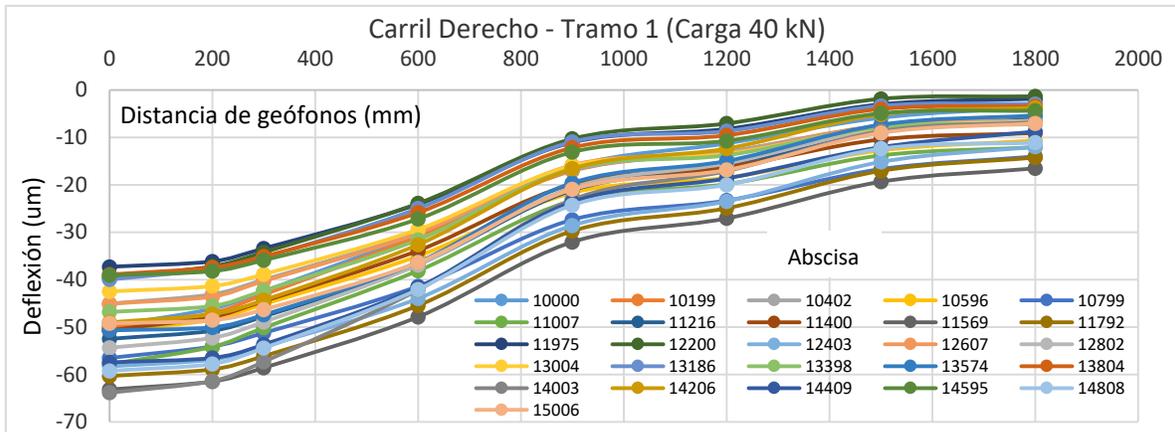


Figura 3.19. Cuencos de deflexión para carga de 40 kN, Carril Derecho - Tramo 1

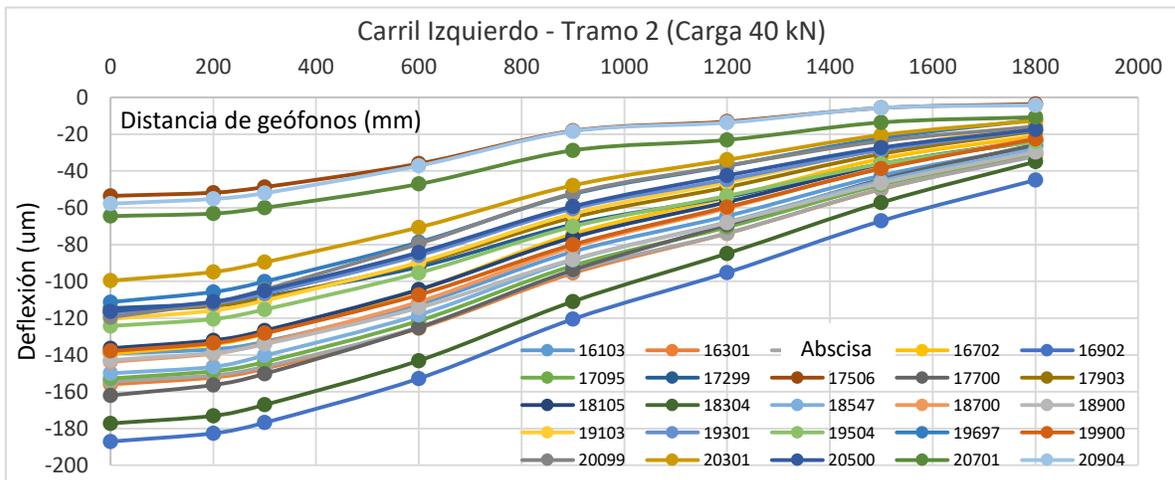


Figura 3.20. Cuencos de deflexión para carga de 40 kN, Carril Izquierdo - Tramo 2

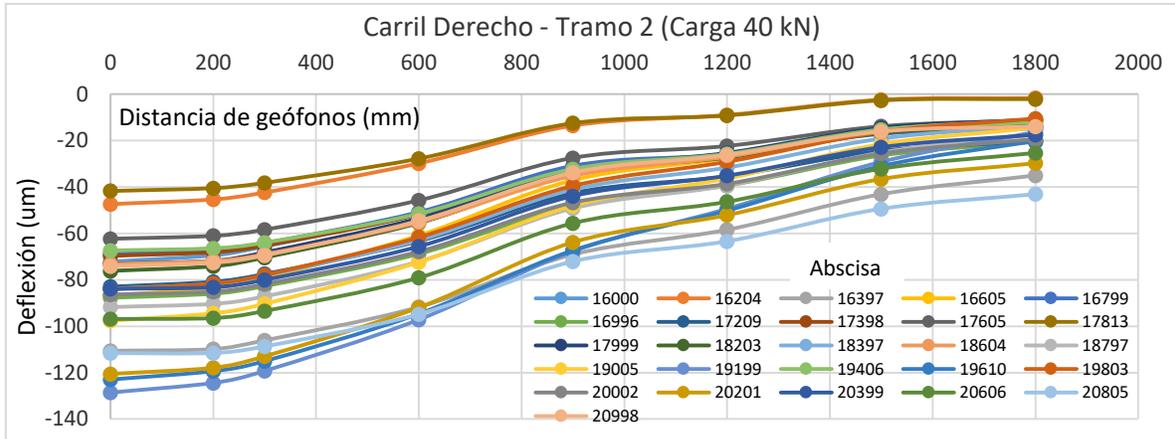


Figura 3.21. Cuencos de deflexión para carga de 40 kN, Carril Derecho - Tramo 2

En función de los resultados obtenidos de las deflexiones en cada carril de cada Tramo, será importante determinar las deflexiones en cada geófono que conformarán el cuenco de deflexión representativo de cada carril y de esta manera obtener los parámetros estructurales mediante el proceso de retrocálculo.

En primer lugar se verificará la uniformidad de los Tramos con la finalidad de que los resultados de los parámetros estructurales no se vean afectados por valores extremos, para ello se verificará la existencia de outliers en el grupo de medidas en los carriles de los dos Tramos tomándose como referente la medida captada por el geófono D(1) bajo una carga nominal de 40 kN, la Figura 3.22 presenta los diagramas de cajas y bigotes de las lecturas de deflexión en los dos carriles de cada Tramo.

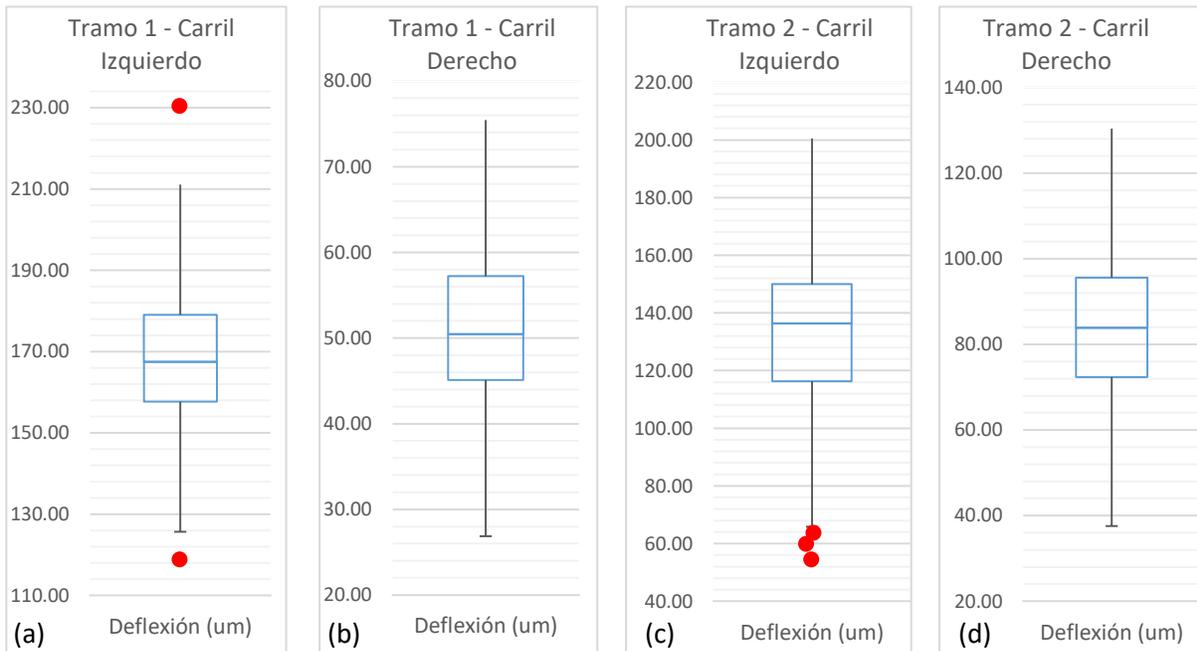


Figura 3.22. Diagrama de cajas de deflexiones para carga de 40 kN



Como se puede apreciar en la figura Figura 3.22 (a) y en la Figura 3.22 (c) existen valores de deflexión que se encuentran fuera del límite superior e inferior considerando como valor límite superior $Q3 + 1.5 RI$ y el límite inferior como $Q1 - 1.5 RI$, donde $Q1$ y $Q3$ es el percentil 25, 75 respectivamente y RI es el rango intercuartílico ($Q3 - Q1$), por lo que se considerarían outliers. En el carril izquierdo del Tramo 1 existe un valor por encima del límite superior y un valor por debajo del límite inferior, mientras que en el carril izquierdo del Tramo 2 existen 3 valores por debajo del límite inferior, en el caso del Tramo 2 y Tramo 1 las deflexiones menores nos indican una mejor condición de la subrasante, mientras que en el caso del Tramo 1, la deflexión alta nos indica que en esta zona se debería realizar un análisis más a detalle para identificar las razones que provocan este comportamiento.

Si no se consideran estos valores de deflexión en el grupo de medidas, la deflexión promedio tendrá una variación que implicaría que los parámetros de diseño módulo de reacción de la subrasante, módulo de elasticidad del concreto, módulo de rotura del concreto, al igual que el espesor de losa de hormigón requerido para el tráfico futuro y el espesor de sobrecarpeta de refuerzo sean diferentes a los que se obtendrían si se tomaran todos los valores de deflexión en el grupo de datos, sin embargo las variaciones en las deflexiones promedio son bajas, 0.32% en el Tramo 1 y 7.0% en el Tramo 2, aspecto que no tendrá repercusión en el resultado final del espesor de losa de hormigón requerido para el tráfico futuro, ya que la variación de este espesor esta en 0.01% para el Tramo 1 y 0.92% para el Tramo 2.

Antes de no considerar estas lecturas en los cálculos, también se verificará la uniformidad de los Tramos mediante el coeficiente de variación. En un tramo homogéneo que tenga un comportamiento uniforme, sus deflexiones se distribuirán aleatoriamente alrededor de la media siguiendo una distribución normal con una desviación típica muestral. La experiencia acumulada en España sobre tratamiento de las deflexiones medidas con cualquier tipo de equipo de auscultación indica que es frecuente encontrar en estos tipos de tramos coeficientes de variación CV comprendidos entre 0.20 y 0.30. En tramos muy uniformes se dan valores inferiores a estos, valores de 0.30 y 0.40 indican menor uniformidad, pero todavía se considera aceptable. Si el coeficiente de variación de las deflexiones supera ampliamente el valor de 0.40, no podrá considerarse que el tramo tienen un comportamiento uniforme (Norma 6.1-IC, 2003).

En base a lo anteriormente descrito se tomará la deflexión $D(1)$ ubicada en el centro del plato de carga para definir la homogeneidad del carril izquierdo y derecho de cada Tramo, la Tabla 3.3 muestra los resultados del coeficiente de variación CV obtenidos.



Tabla 3.3. Determinación del coeficiente de variación CV

		Deflexión promedio (um)	Deflexión máxima (um)	Deflexión mínima (um)	Desviación estándar STD (um)	Coeficiente de variación CV
Tramo 1	Carril Izquierdo	146.14	201.82	103.99	20.94	0.14
	Carril Derecho	42.37	54.66	30.84	6.86	0.15
Tramo 2	Carril Izquierdo	110.57	162.42	45.50	29.47	0.26
	Carril Derecho	72.35	111.48	35.66	18.69	0.25

Los coeficiente de variación obtenidos para el Tramo 1 se encuentran por debajo de 0.20, lo que quiere decir que son tramos Muy uniformes, por otro lado los coeficientes de variación del Tramo 2 se encuentran en el rango de 0.20 a 0.30 lo que indica que son tramos uniformes.

En base a los dos análisis anteriormente realizados, la deflexión representativa a considerarse en los dos carriles de cada Tramo será el promedio de las deflexiones correspondientes a cada carga nominal obteniéndose así cinco cuencos de deflexión por carril. El grupo de tablas presentadas a continuación, Tabla 3.4 (Deflexiones promedio, Carril izquierdo - Tramo 1), Tabla 3.5 (Deflexiones promedio, Carril derecho - Tramo 1), Tabla 3.6 (Deflexiones promedio, Carril izquierdo - Tramo 2) y Tabla 3.7 (Deflexiones promedio, Carril derecho - Tramo 2), muestran los valores promedio de deflexión para cada carga en los carriles de los tramos de análisis.

Tabla 3.4. Deflexiones promedio, Carril izquierdo – Tramo 1 (estados de carga).

TRAMO 1 - CARRIL IZQUIERDO						
Geófono	Ubicación (cm)	Deflexión (um)				
		35 kN	40 kN	45 kN	50 kN	55 kN
D1	0	146.14	168.94	191.75	214.56	237.36
D2	20	142.78	164.06	185.33	206.61	227.89
D3	30	138.04	158.15	178.27	198.38	218.49
D4	60	115.89	132.63	149.36	166.10	182.83
D5	90	84.77	98.83	112.89	126.95	141.01
D6	120	65.42	75.49	85.55	95.62	105.69
D7	150	42.40	49.54	56.67	63.81	70.95
D8	180	26.64	30.99	35.33	39.68	44.02
D9	-30	139.72	159.59	179.47	199.34	219.22



Tabla 3.5. Deflexiones promedio, Carril derecho – Tramo 1 (estados de carga).

Geófono	Ubicación (cm)	Deflexión (um)				
		35 kN	40 kN	45 kN	50 kN	55 kN
D1	0	42.37	50.33	58.30	66.26	74.23
D2	20	41.52	48.48	55.43	62.39	69.34
D3	30	39.09	45.43	51.78	58.12	64.47
D4	60	29.84	34.60	39.35	44.11	48.87
D5	90	15.40	19.57	23.74	27.91	32.08
D6	120	12.91	15.66	18.42	21.18	23.93
D7	150	7.37	9.68	12.00	14.31	16.62
D8	180	5.98	7.47	8.96	10.45	11.94
D9	-30	40.68	46.58	52.49	58.40	64.30

Tabla 3.6. Deflexiones promedio, Carril izquierdo – Tramo 2 (estados de carga).

Geófono	Ubicación (cm)	Deflexión (um)				
		35 kN	40 kN	45 kN	50 kN	55 kN
D1	0	110.57	127.81	145.04	162.28	179.52
D2	20	107.69	123.74	139.79	155.84	171.89
D3	30	103.51	118.66	133.80	148.94	164.09
D4	60	85.69	98.11	110.54	122.96	135.39
D5	90	61.07	71.37	81.68	91.99	102.30
D6	120	46.62	53.91	61.20	68.48	75.77
D7	150	29.84	35.05	40.26	45.47	50.68
D8	180	18.72	21.93	25.14	28.35	31.56
D9	-30	104.42	119.19	133.96	148.73	163.50



Tabla 3.7. Deflexiones promedio, Carril derecho – Tramo 2 (estados de carga).

Geófono	Ubicación (cm)	Deflexión (um)				
		35 kN	40 kN	45 kN	50 kN	55 kN
D1	0	72.35	84.69	97.03	109.37	121.71
D2	20	71.71	82.88	94.04	105.20	116.36
D3	30	69.03	79.43	89.83	100.23	110.63
D4	60	55.95	64.33	72.70	81.07	89.45
D5	90	35.35	42.64	49.93	57.22	64.50
D6	120	28.82	33.93	39.04	44.15	49.26
D7	150	17.75	21.75	25.76	29.77	33.78
D8	180	13.96	16.72	19.47	22.22	24.97
D9	-30	70.02	79.96	89.89	99.83	109.76

Finalmente la Figura 3.23 (Deflexiones promedio, carril izquierdo - Tramo 1), Figura 3.24 (Deflexiones promedio, carril derecho - Tramo 1), Figura 3.25 (Deflexiones promedio, carril izquierdo - Tramo 2) y Figura 3.26 (Deflexiones promedio, carril derecho - Tramo 2), muestran el comportamiento lineal de los valores promedio de las deflexiones calculadas para los dos carriles que componen los tramos de estudio.

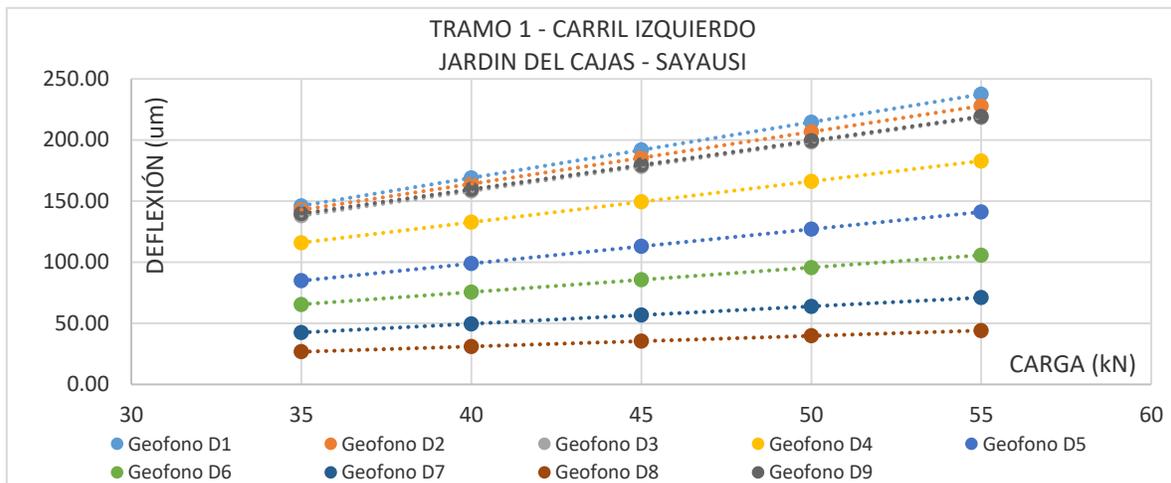


Figura 3.23. Deflexiones promedio, carril izquierdo - Tramo 1 (estados de carga).

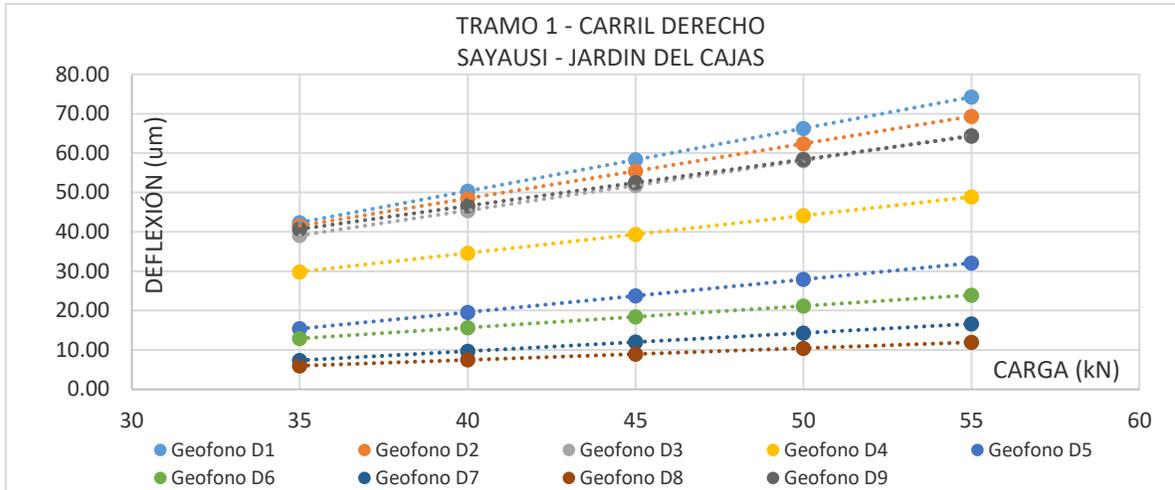


Figura 3.24. Deflexiones promedio, carril derecho - Tramo 1 (estados de carga).

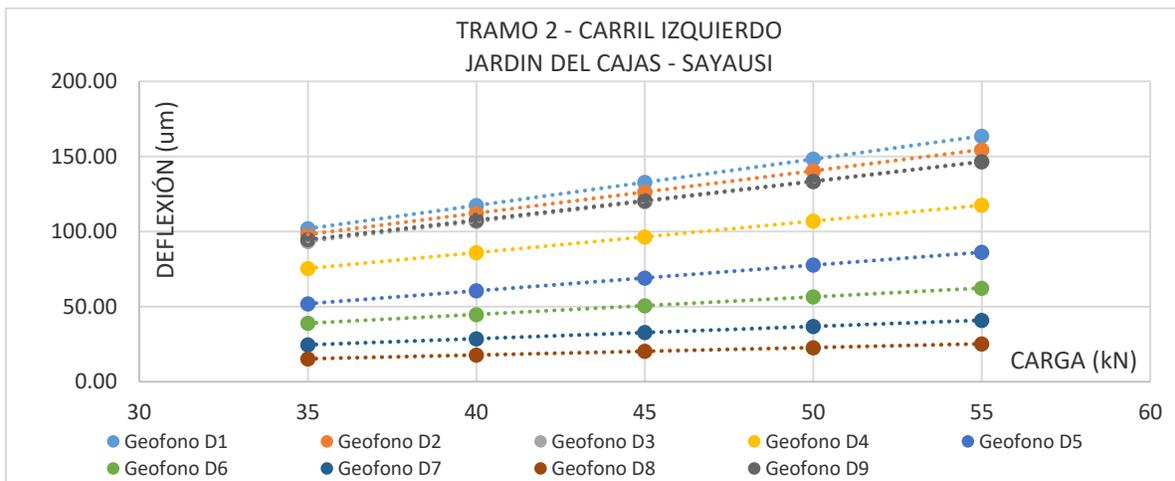


Figura 3.25. Deflexiones promedio, carril izquierdo - Tramo 2 (estados de carga).

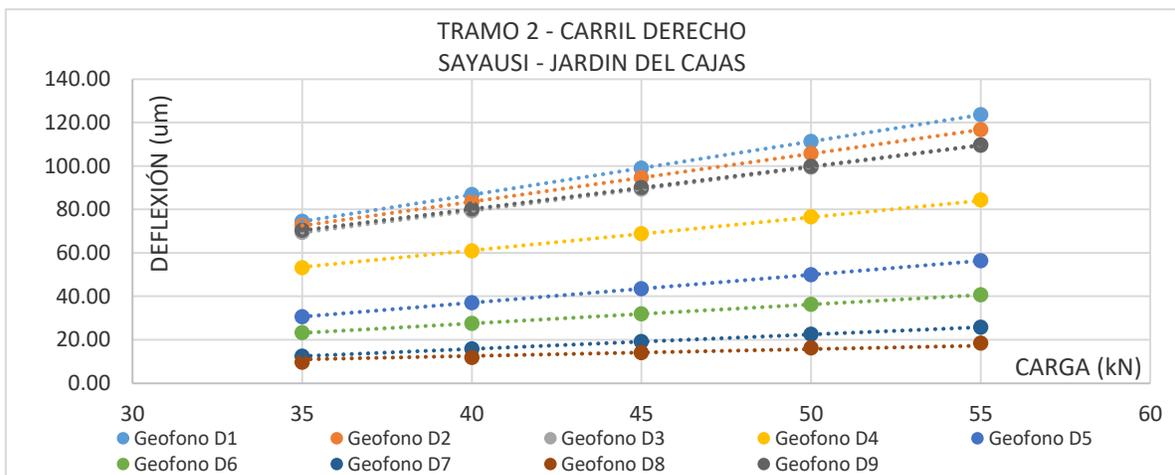


Figura 3.26. Deflexiones promedio, carril derecho - Tramo 2 (estados de carga).

3.4 Cuencos de deflexión

A partir de los datos de deflexiones promedio obtenidos en el literal 3.3 (Análisis de regresión), se grafican los cuencos de deflexión, los cuales son indicadores de la capacidad estructural que tiene el paquete del pavimento, en la Figura 3.27 (Cuenco de Deflexión, carril izquierdo - Tramo 1), Figura 3.28 (Cuenco de Deflexión, carril derecho - Tramo 1), Figura 3.29 (Cuenco de Deflexión, carril izquierdo - Tramo 2) y Figura 3.30 (Cuenco de Deflexión, carril derecho - Tramo 2) se muestran los cuencos de deflexión para cada estado de carga en cada carril de los dos tramos.

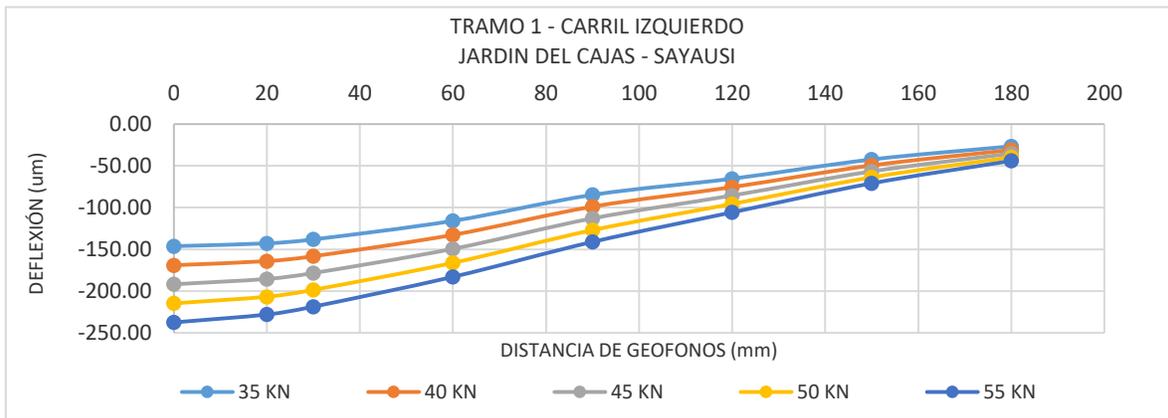


Figura 3.27. Cuenco de Deflexión, carril izquierdo - Tramo 1 (estados de carga).

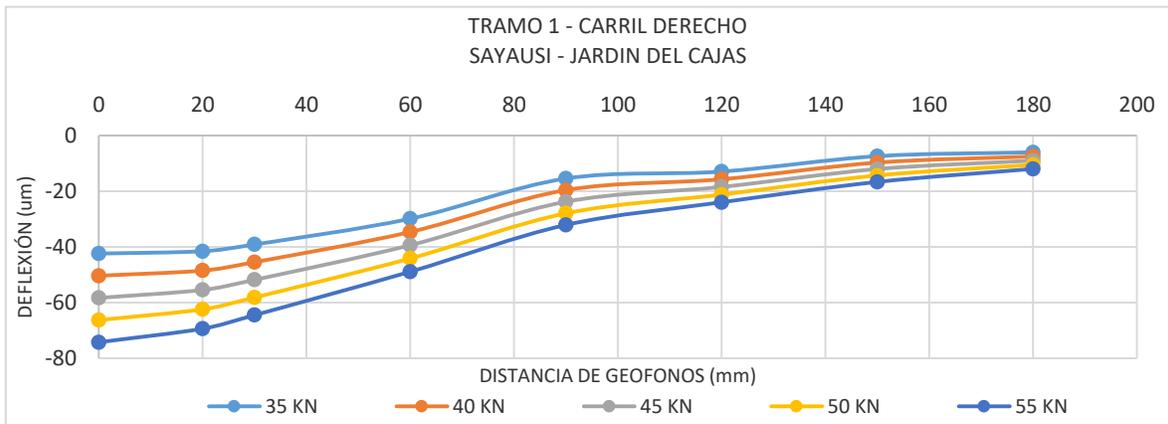


Figura 3.28. Cuenco de Deflexión, carril derecho - Tramo 1 (estados de carga).

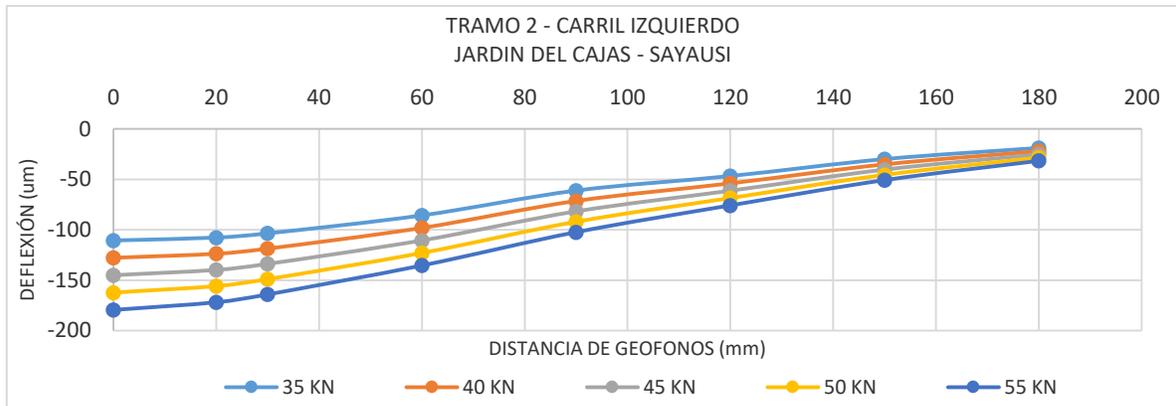


Figura 3.29. Cuenco de Deflexión, carril izquierdo - Tramo 2 (estados de carga).

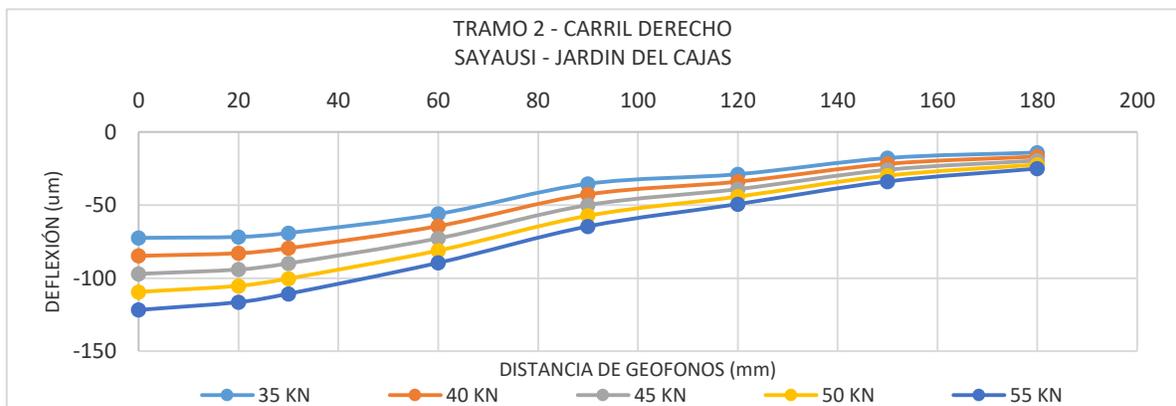


Figura 3.30. Cuenco de Deflexión, carril derecho - Tramo 2 (estados de carga).

3.5 Parámetros de diseño obtenidos mediante retrocálculo

3.5.1 Módulo de reacción estático k

A partir del valor del AREA del cuenco de deflexión obtenido de las deflexiones promedios en cada carril de los tramos de análisis, se ha calculado el módulo de reacción estático k de la subrasante mediante el proceso de retrocálculo para cada carga nominal aplicada en el ensayo esto con el fin de identificar su variabilidad y cuan significativa es esta según la carga aplicada.

Una vez realizado el proceso de retrocálculo de acuerdo a la metodología AASHTO 93 indicada en la sección 2.6 (Metodología AASHTO 93), la Tabla 3.8 muestra los valores del módulo de reacción efectivo estático “ k ”.



Tabla 3.8. Módulo de reacción estático “k” (estados de carga).

		Módulo de reacción estático K (pci)				
		35 kN	40 kN	45 kN	50 kN	55 kN
TRAMO 1	Carril Izquierdo	67.57	69.80	71.49	72.82	73.89
	Carril Derecho	420.63	427.56	431.82	434.60	436.51
TRAMO 2	Carril Izquierdo	101.10	103.55	105.39	106.84	108.00
	Carril Derecho	161.71	168.35	173.17	176.81	179.66

En primera instancia se observa que según se incrementa la carga aplicada en el ensayo el valor del módulo es mayor, sin embargo este incremento no se produce a una tasa constante y en la misma proporción que la carga.

El módulo de reacción estático nos permite caracterizar la subrasante y su capacidad de soporte por lo que comparando los valores resalta el carril derecho del primer tramo en comparación con los demás valores en especial con el del carril izquierdo del mismo tramo en donde su diferencia es notablemente alta se deduciría que este carril tiene mejores características en lo que se refiere a la capacidad de soporte.

3.5.2 Módulo de elasticidad del concreto (E_c)

El parámetro de Elasticidad “ E_c ” obtenido mediante el proceso de retrocálculo establecido en la Metodología AASHTO 93 indicada en la sección 2.6 (Metodología AASHTO 93), se visualiza en Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Módulo de elasticidad del concreto “ E_c ” (estados de carga).

		Módulo de elasticidad E_c (psi)				
		35 kN	40 kN	45 kN	50 kN	55 kN
TRAMO 1	Carril Izquierdo	5051440	4773715	4575146	4426184	4310337
	Carril Derecho	9476060	8608628	8028272	7613170	7301734
TRAMO 2	Carril Izquierdo	5878741	5605653	5407965	5258289	5141052
	Carril Derecho	8572667	7835299	7334527	6972626	6699045

Los valores de módulo obtenidos se encuentran por encima del valor típico de módulo de elasticidad para un hormigón normal empleado en obras viales, incluso sus valores indican que son hormigones de alta resistencia dentro del rango de 42 a 100 MPa y en algunos casos sobrepasan la alta resistencia.

Al observar los valores de módulo de elasticidad obtenidos se podría decir que en promedio el pavimento que compone los tramos analizados cuentan con una resistencia a compresión superior a 28 MPa.

Al contrario del módulo de reacción estático de la subrasante los valores del módulo de



elasticidad tienen a decrecer según se incrementa la carga aplicada durante el ensayo, pero la tasa de decrecimiento no es constante por lo que más adelante se analizará esta tendencia.

3.5.3 Módulo de rotura del concreto (S'c)

En la sección 2.8.4 (Diseño de espesor de sobrecarpeta, Paso 6) se indicó que el módulo de rotura del hormigón se puede determinar por cualquiera de los siguientes procedimientos: (AASHTO, 1993)

- Mediante el ensayo de tracción indirecta.
- A través del módulo elástico del pavimento existente obtenido mediante retrocálculo.

Razón por la cual se emplea este último criterio para el cálculo del módulo de rotura, en la Tabla 3.10 muestra los valores del módulo de rotura "S'c" obtenidos.

Tabla 3.10. Módulo de rotura del concreto "S'c" (estados de carga).

		Módulo de rotura S'c (psi)				
		35 kN	40 kN	45 kN	50 kN	55 kN
TRAMO 1	Carril Izquierdo	708.24	696.16	687.52	681.04	676.00
	Carril Derecho	900.71	862.98	837.73	819.67	806.13
TRAMO 2	Carril Izquierdo	744.23	732.35	723.75	717.24	712.14
	Carril Derecho	861.41	829.34	807.55	791.81	779.91

El módulo de rotura del concreto tiene sus valores más altos en el carril derecho en los dos tramos al igual que el módulo de elasticidad, donde los valores decrecen cuando la carga aplicada en el ensayo se incrementa.

El módulo de rotura es importante para el control de agrietamientos por fatiga del pavimento originado por las cargas repetitivas del tráfico, la AASHTO señala que los valores del módulo de rotura varían entre 2.8 MPa (400 psi) y 4.8 MPa (700 psi), llegando incluso a valores de 8.2 MPa (1200 psi), en concretos con alta resistencia inicial; en este caso al observar los valores presentados en la Tabla 3.10, estos están en el punto más alto del rango descrito y en algunos casos estos valores tienden a tener características de hormigones de alta resistencia, aspecto que también se vió reflejado en el módulo de elasticidad del hormigón, por lo que se puede decir que la capa de hormigón hidráulico en los dos tramos analizados goza de buenas características.

3.6 Normalización de deflexiones

Como se mencionó en la sección 2.5.4 (Factores de ajuste en deflexiones) los valores de deflexiones medidos en campo producto de la aplicación de la carga real de ensayo deben ser ajustados a términos de deflexiones producidos por la carga normalizada de 40 kN (9000 lb) (AASHTO, 1993), por lo que para cada deflexión medida en el centro de la losa de los cinco



estados de carga considerados (35 kN, 40 kN, 45 kN, 50 kN, 55 kN) se calcula su deflexión normalizada aplicando la Ecuación 2.7.

En la Tabla 3.11 (Deflexiones Normalizadas, Carril izquierdo - Tramo 1), Tabla 3.12 (Deflexiones Normalizadas, Carril derecho - Tramo 1), Tabla 3.13 (Deflexiones Normalizadas, Carril izquierdo - Tramo 2) y Tabla 3.14 (Deflexiones Normalizadas, Carril derecho - Tramo 2) muestran los valores de deflexión normalizados representativos de cada geófono.

Tabla 3.11. Deflexiones Normalizadas Promedio, Carril izquierdo – Tramo 1 (AASHTO)

TRAMO 1 - CARRIL IZQUIERDO (AASHTO)						
Geófono	Ubicación (cm)	Deflexión (um)				
		40kN(35 kN)	40kN(40 kN)	40kN(45 kN)	40kN(50 kN)	40kN(55 kN)
D1	0	167.64	168.91	170.18	171.70	172.72
D2	20	163.58	164.08	164.34	165.35	165.86
D3	30	158.24	157.99	158.24	158.75	159.00
D4	60	132.84	132.59	132.59	132.84	133.10
D5	90	97.03	99.06	100.58	101.60	102.36
D6	120	74.93	75.44	75.95	76.45	76.96
D7	150	48.51	49.78	50.55	51.05	51.56
D8	180	30.48	30.99	31.50	31.75	32.00
D9	-30	160.27	159.26	159.26	159.51	159.77

Como se observa en la Tabla 3.11 y en las subsiguientes los valores de deflexión en los geófonos tienen un comportamiento creciente cuando las cargas de ensayos aplicadas son normalizadas mediante la ecuación de la AASHTO, estas variaciones si bien son ligeras implican que producirán una variación en la obtención del AREA del cuenco de deflexión y por consiguiente el valor de los parámetros estructurales variarán, esto último forma parte de este proyecto de tesis donde será importante conocer la repercusión de esta variación en el cálculo de espesores para el diseño de sobrecarpetas.



Tabla 3.12. Deflexiones Normalizadas Promedio, Carril derecho – Tramo 1 (AASHTO)

TRAMO 1 - CARRIL DERECHO (AASHTO)						
Geófono	Ubicación (cm)	Deflexión (um)				
		40kN(35 kN)	40kN(40 kN)	40kN(45 kN)	40kN(50 kN)	40kN(55 kN)
D1	0	48.51	50.04	52.07	52.83	53.59
D2	20	47.75	48.26	49.28	49.78	50.04
D3	30	44.96	45.21	46.23	46.23	46.74
D4	60	34.29	34.54	35.05	35.31	35.31
D5	90	17.27	19.56	21.34	22.10	22.86
D6	120	14.73	15.75	16.76	16.76	17.02
D7	150	8.13	9.65	11.43	11.18	11.68
D8	180	6.86	7.62	8.13	8.38	8.38
D9	-30	46.99	46.48	46.74	46.74	46.74

Si comparamos los valores de deflexión en el primer geófono tanto en el carril derecho como izquierdo de este primer tramo, la deflexión producida en el carril derecho representa un 30% aproximadamente de la producida en el carril izquierdo, por lo que se puede decir que la estructura del pavimento del carril derecho se encuentra en mejores condiciones que la del izquierdo.

Tabla 3.13. Deflexiones Normalizadas Promedio, Carril izquierdo – Tramo 2 (AASHTO)

TRAMO 2 - CARRIL IZQUIERDO (AASHTO)						
Geófono	Ubicación (cm)	Deflexión (um)				
		40kN(35 kN)	40kN(40 kN)	40kN(45 kN)	40kN(50 kN)	40kN(55 kN)
D1	0	126.49	127.51	128.52	129.79	129.29
D2	20	123.44	123.44	123.95	124.71	123.95
D3	30	118.62	118.36	118.62	119.13	118.36
D4	60	98.30	98.04	97.79	98.30	97.54
D5	90	69.60	71.37	72.39	73.41	73.66
D6	120	53.34	53.85	54.10	54.86	54.61
D7	150	34.04	35.05	35.56	36.32	36.58
D8	180	21.34	21.84	22.35	22.61	22.86
D9	-30	119.89	118.87	118.62	118.87	117.86



Tabla 3.14. Deflexiones Normalizadas Promedio, Carril derecho – Tramo 2 (AASHTO).

TRAMO 2 - CARRIL DERECHO (AASHTO)						
Geófono	Ubicación (cm)	Deflexión (um)				
		40kN(35 kN)	40kN(40 kN)	40kN(45 kN)	40kN(50 kN)	40kN(55 kN)
D1	0	84.07	84.33	85.85	87.12	88.39
D2	20	83.31	82.55	83.31	84.07	84.58
D3	30	80.26	78.99	79.50	80.01	80.52
D4	60	65.02	64.01	64.26	64.77	65.02
D5	90	40.64	42.42	44.20	45.47	46.48
D6	120	33.02	33.78	34.54	35.31	35.56
D7	150	19.81	21.84	22.86	23.62	24.38
D8	180	15.75	16.51	17.27	17.78	18.03
D9	-30	81.79	79.50	79.50	79.76	80.01

Al igual que el Tramo 1, en las deflexiones del primer geófono en los dos carriles existe una variación entre ellos, esta vez no tan marcada como en el primer caso, ya que la deflexión producida en el carril derecho representa el 67% aproximadamente de la que se produce en el carril izquierdo lo que indicaría que este tramo la condición tanto del carril derecho como del izquierdo tienen mayor similitud, aspecto que se evidenciará en el cálculo de los parámetros estructurales para el diseño de pavimentos rígidos.

3.7 Factor de corrección por carga

La AASHTO establece que la carga normalizada es de 40 kN (AASHTO, 1993), por lo que todas las lecturas de deflexiones tomadas con el FWD deben ser ajustadas a este valor estandarizado.

Para obtener el factor de corrección por carga según la AASHTO se establece que la carga normalizada es de 40 kN, por lo que el factor de corrección a aplicarse es de $40/(\text{carga aplicada en el ensayo})$, en base a lo indicado en la sección 2.5.4. (Factores de ajuste en deflexiones).

Por otra parte para calcular el factor de corrección por carga mediante el método de estados de carga, se toma el valor de deflexión correspondiente a la carga normalizada de 40 kN proveniente del ajuste lineal en todas las abscisas donde se ejecutaron los ensayos y con el valor de la deflexión medido en campo bajo la carga real aplicada se obtiene el valor del factor de corrección por carga de la siguiente manera: $(\text{deflexión}_{\text{carga normalizada}})/(\text{deflexión}_{\text{carga aplicada}})$.

La Figura 3.31 muestra los valores de factor de corrección obtenidos por el método de la AASHTO y por el método de ESTADOS DE CARGA.

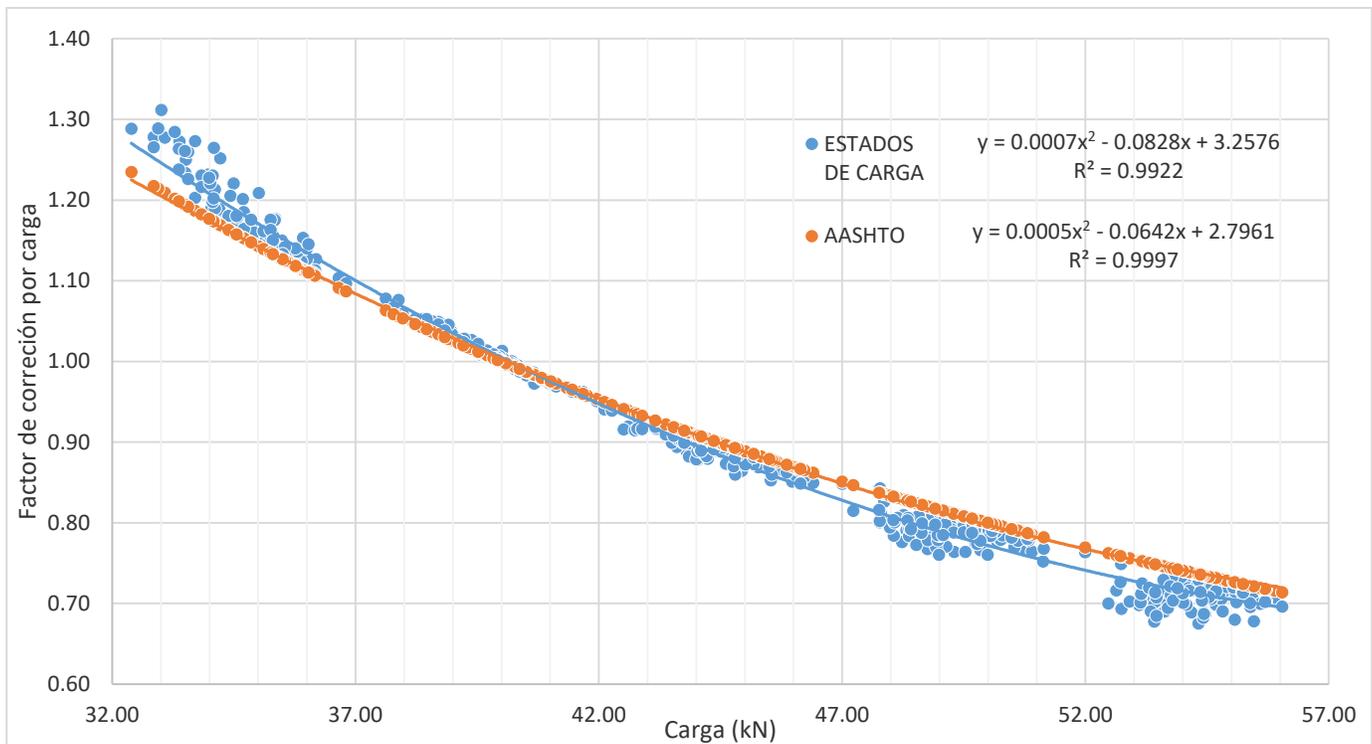


Figura 3.31. Factor de corrección por carga

En la Figura 3.31 se observa que el mejor ajuste para describir el comportamiento del factor de corrección por carga en función de la carga es una función de segundo grado en ambos casos con coeficientes de determinación de 1.00 para el método de la AASHTO y de 0.99 para el método de ESTADOS DE CARGA, por lo que en ambos casos el ajuste es excelente.

Las dos curvas tienen un comportamiento similar y una aproximación claramente marcada en el rango de 38 kN a 43 kN siendo esta la zona cuyos valores de factor de corrección son prácticamente iguales, sin embargo si bien los rangos de 32 kN a 38 kN y de 43 kN a 56 kN se nota una distancia más marcada entre las dos curvas, esta diferencia representa valores máximos de diferencia entre los dos métodos por debajo del 3.66%. Mediante un análisis de correlación se comprobará la aplicabilidad de la ecuación de la AASHTO para la normalización de deflexiones.

El análisis de correlación describe el grado o fuerza con que se produce esta relación, para ello se emplea la medida conocida como coeficiente de correlación o correlación de Pearson, que es una medida de interdependencia de dos variables aleatorias (Martínez Bencardino, 2012). El coeficiente de correlación el cual se simboliza por R o r , se define como la raíz cuadrada del coeficiente de determinación R^2 el cual mide la proporción de la varianza de la ecuación de regresión, que describe la relación entre dos variables. (Martínez Bencardino, 2012).

El coeficiente de correlación debe ser un valor comprendido en el intervalo $-1 \leq r \leq 1$ y mide la relación lineal ente X y Y, si X se emplea para predecir Y o viceversa. Un valor de $r = -1$ indica una relación lineal negativa perfecta entre X y Y, mientras que un valor de $r = 1$ señalará una asociación lineal positiva perfecta de X y Y. Si $r = 0$, entonces no existe ningún relación lineal entre X y Y. (Canavos, 1988). En la Tabla 3.15 se presenta los rangos del coeficiente de correlación “r” y su clasificación.

Tabla 3.15. Clasificación del coeficiente de correlación. (Martínez Bencardino, 2012).

Correlación perfecta	$r = 1$	$r = 1$
Correlación excelente	r entre 0.9 y 1.0	r entre -1.0 y -0.9
Correlación aceptable	r entre 0.8 y 0.9	r entre -0.9 y -0.8
Correlación regular	r entre 0.6 y 0.8	r entre -0.8 y -0.6
Correlación mínima	r entre 0.3 y 0.6	r entre -0.6 y -0.3
Ausencia de correlación	r entre 0.0 y 0.3	r entre -0.3 y 0.0

La Figura 3.32 muestra el comportamiento del coeficiente de correlación, en la Figura 3.32 (a) los puntos muestran una tendencia lineal con una inclinación menor a 90° lo que implica una correlación positiva perfecta, la Figura 3.32(b) los puntos tienen una tendencia lineal con una inclinación menor a 180° pero mayor a 90° lo que quiere decir que tiene una correlación negativa perfecta. En las figuras 3.32(c) y 3.32(d) los puntos se encuentran más dispersos, pero mantienen una tendencia lineal, dependiendo de esta la correlación puede estar dentro de los rangos de excelente a mínima, finalmente, si los puntos tienen una dispersión en la que forman una nube de puntos se dice que la correlación no existe como se muestra en la Figura 3.32(e).

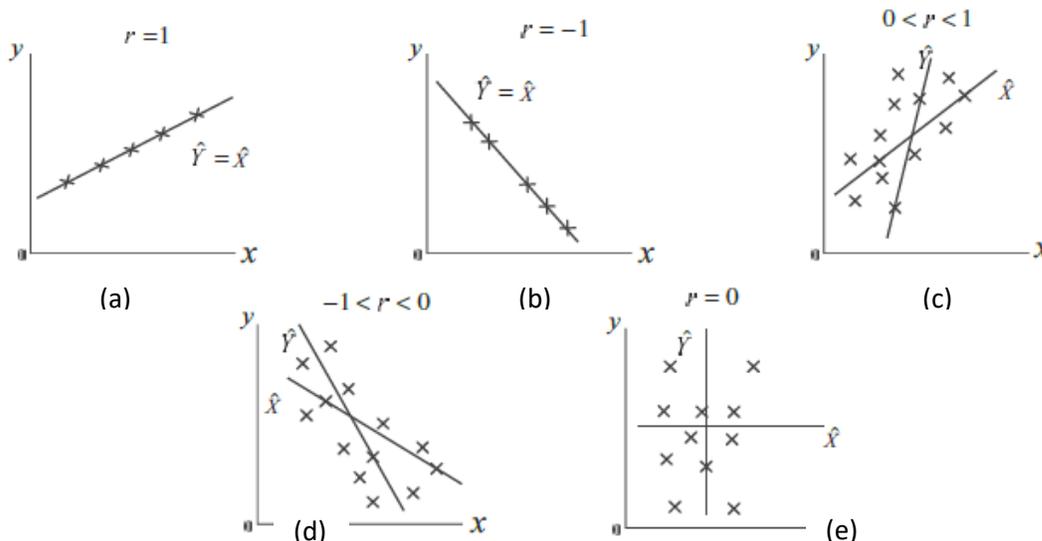


Figura 3.32. Comportamiento del coeficiente de correlación. (Martínez Bencardino, 2012).

Aplicando el factor de corrección dado por la AASHTO se ha corregido las deflexiones resultantes de las cargas reales aplicadas en campo para llevarlas a términos de deflexiones

producto de la aplicación de la carga normalizada de 40 kN y de igual manera a través de la ecuación resultante de la aplicación de ESTADOS DE CARGA para determinar el factor de corrección las deflexiones han sido normalizadas. La Figura 3.33 muestra la correlación existente entre los dos métodos de normalización de deflexión en el geófono D(1) ubicado en el centro del plato de carga.

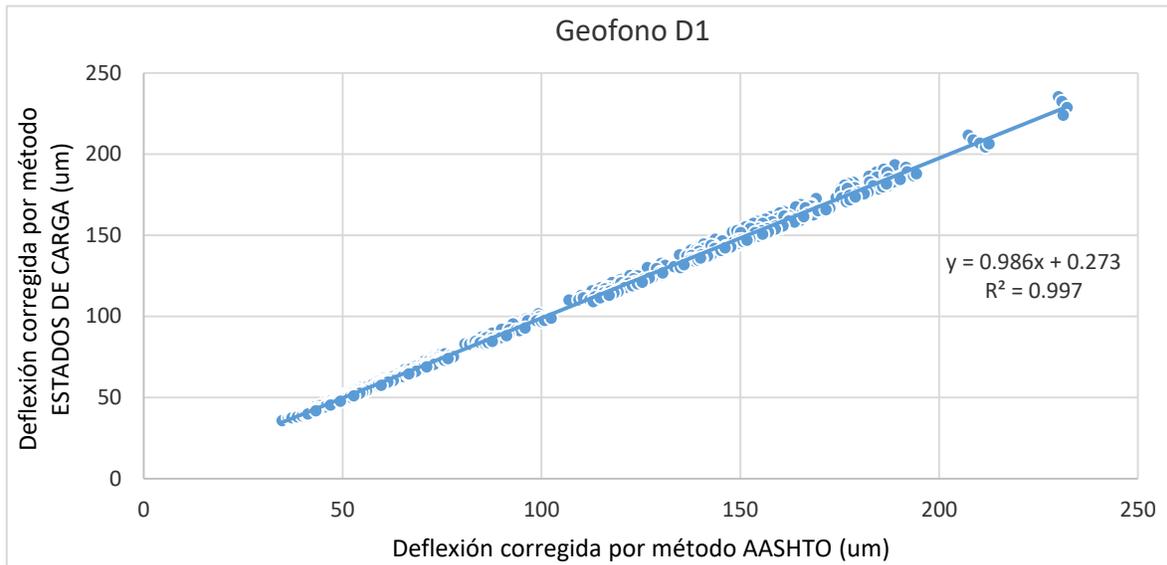


Figura 3.33. Correlación de deflexión normalizada por método AASHTO y ESTADOS DE CARGA

El coeficiente de correlación obtenido es de 0.99 que indica una correlación excelente, la pendiente de esta función de correlación es inferior en 1.39% del valor de la pendiente de la función identidad 1.00, por lo que la diferencia en los resultados de deflexión resultantes de la aplicación de los dos métodos no son significativos, por lo que el factor de corrección de la ASSHTO es aplicable dentro de este rango de análisis (35kN - 55kN) para la normalización de deflexiones.

3.7.1 Análisis de correlación de deflexiones

Como paso previo para el análisis de correlación de las deflexiones que se producen en los geófonos, en primera instancia se debe ajustar las deflexiones producidas mediante la aplicación de una carga de 40 kN (9000 lb) siendo la carga normalizada establecida por la AASHTO, por lo que todas las lecturas de deflexiones tomadas con el FWD deben ser ajustadas con relación a este valor estandarizado, para ajustar el valor de deflexión en cada geófono se aplica la ecuación 2.7. En el [Anexo 7.2](#) se presentan los valores de deflexión para cada geófono tanto para la carga de 40 kN proveniente del análisis de estados de carga, así como, para las obtenidas mediante la aplicación de la ecuación de normalización de la AASHTO.

El siguiente grupo de figuras, Figura 3.34 (Correlación de deflexiones Geófono 1), Figura 3.35 (Correlación de deflexiones Geófono 2), Figura 3.36 (Correlación de deflexiones Geófono 3), Figura 3.37 (Correlación de deflexiones Geófono 4), Figura 3.38 (Correlación de deflexiones Geófono 5), Figura 3.39 (Correlación de deflexiones Geófono 6), Figura 3.40 (Correlación de deflexiones Geófono 7), Figura 3.41 (Correlación de deflexiones Geófono 8) y Figura 3.42 (Correlación de deflexiones Geófono 9), muestran los resultados obtenidos de deflexión normalizada a la carga de 40 kN y su correlación respecto a la carga normalizada obtenida de la regresión de los estados de carga aplicados para todos los valores de deflexión de los dos carriles de los dos tramos analizados.

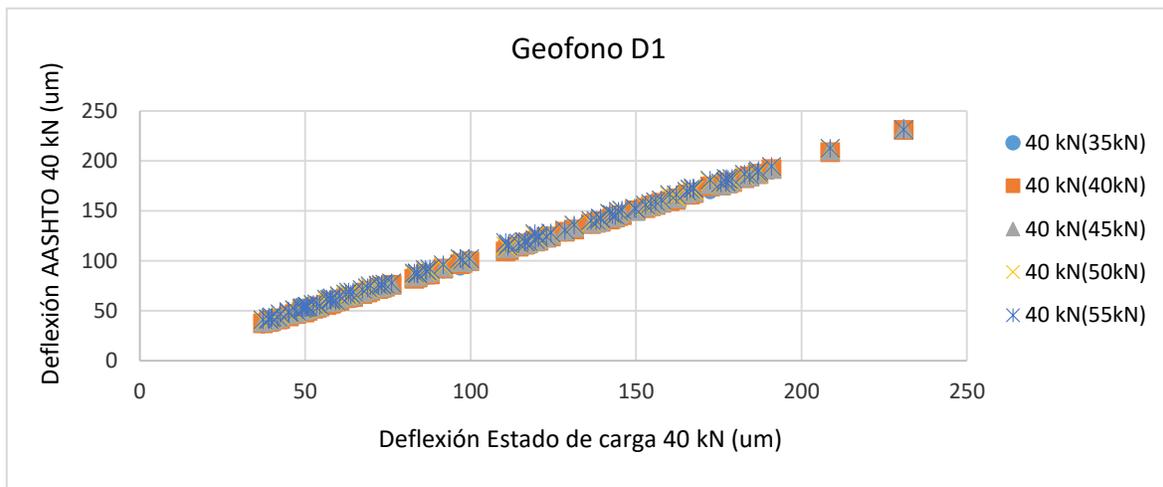


Figura 3.34. Correlación de deflexiones Geófono 1.

La relación existente entre los valores de deflexión normalizados por la ecuación de la AASHTO y el obtenido por el ajuste lineal producto de las cargas aplicadas durante los ensayos corresponde a una correlación positiva tal como se ve en la Figura 3.34 y en las subsiguientes figuras.

Otro aspecto a considerar es que los valores de deflexión que fueron normalizados mediante la ecuación de la AASHTO tuvieron ligeras variaciones entre ellos, por lo que se explicaría que los puntos de las gráficas serían prácticamente coincidentes en todos los geófonos, por lo que de acuerdo a la teoría de análisis de correlación, su coeficiente de correlación estaría en el rango de correlación excelente a correlación perfecta.

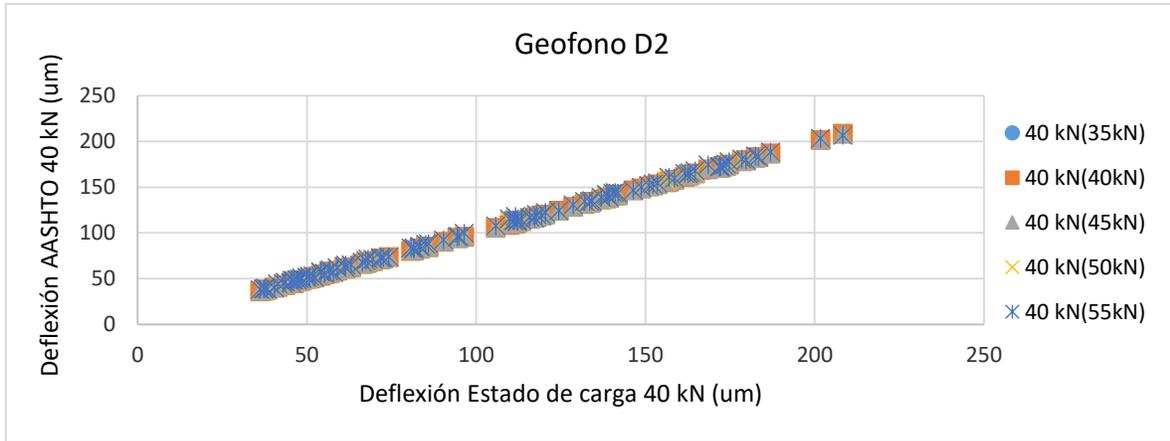


Figura 3.35. Correlación de deflexiones Geófono 2.

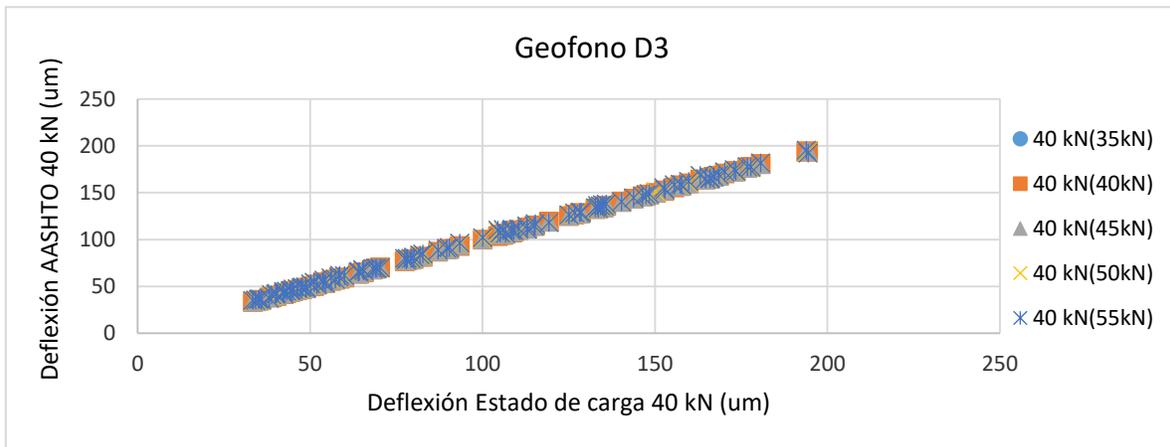


Figura 3.36. Correlación de deflexiones Geófono 3.

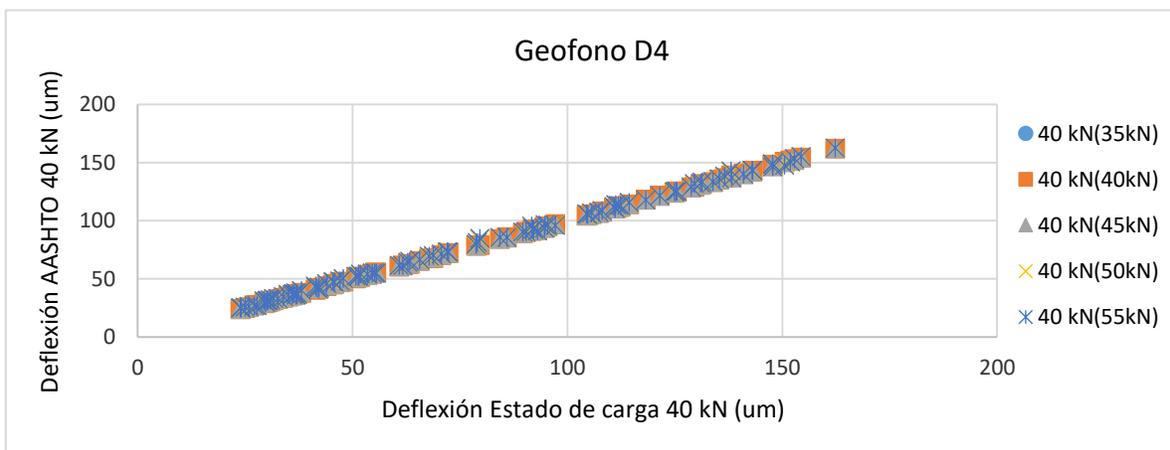


Figura 3.37. Correlación de deflexiones Geófono 4

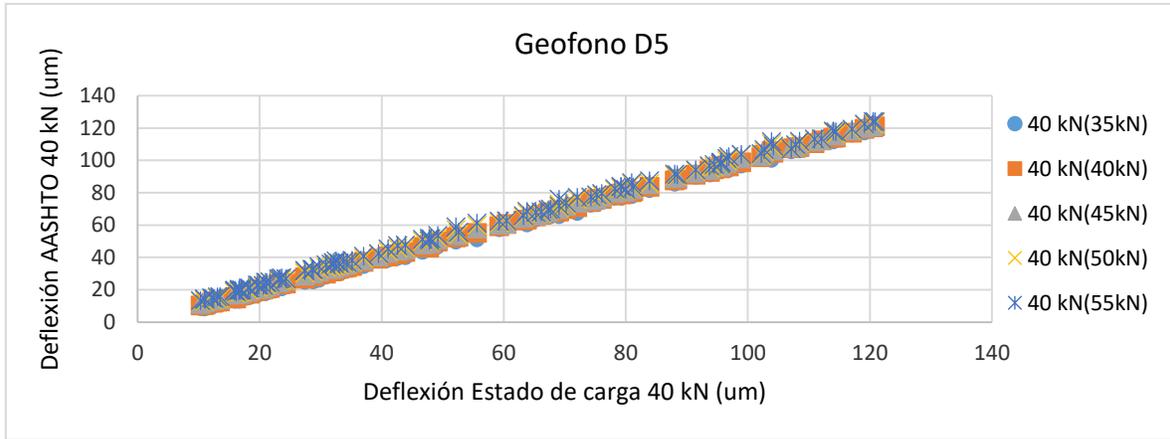


Figura 3.38. Correlación de deflexiones Geófono 5

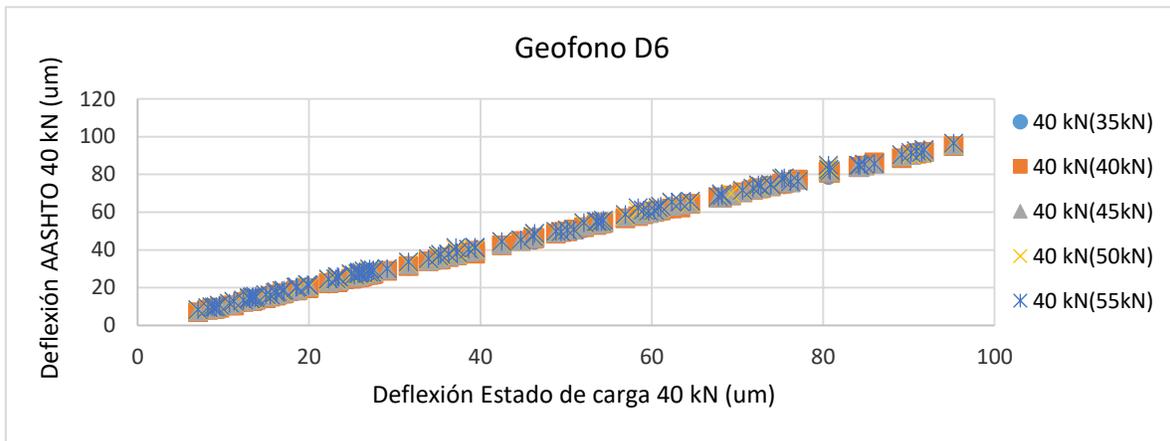


Figura 3.39. Correlación de deflexiones Geófono 6

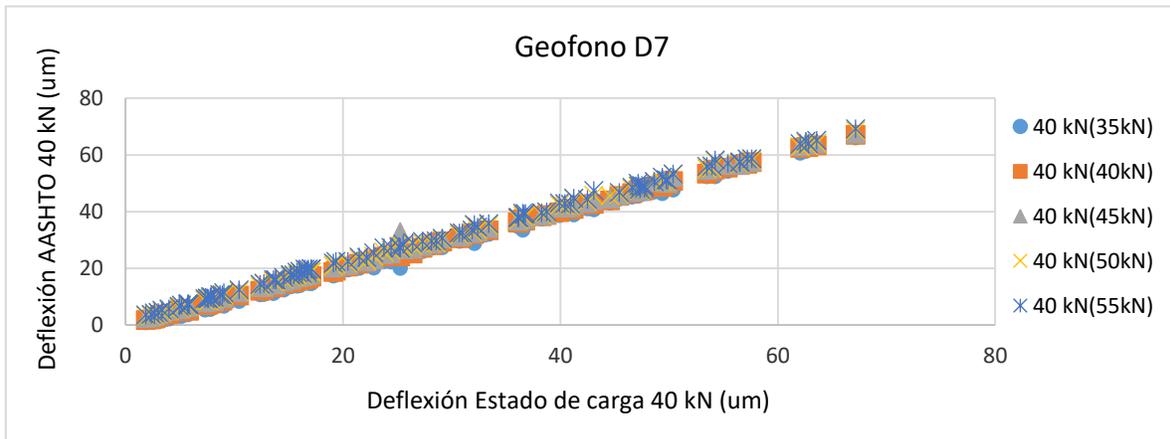


Figura 3.40. Correlación de deflexiones Geófono 7

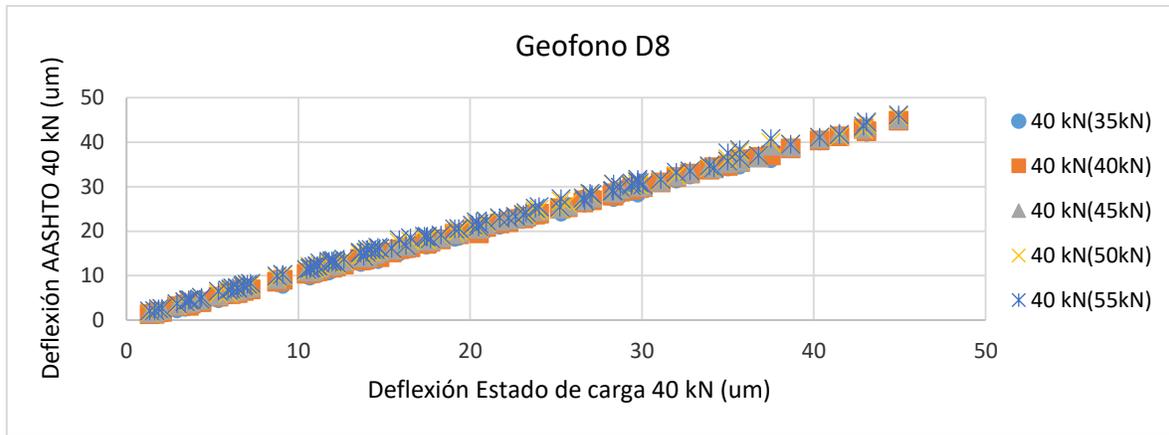


Figura 3.41. Correlación de deflexiones Geófono 8

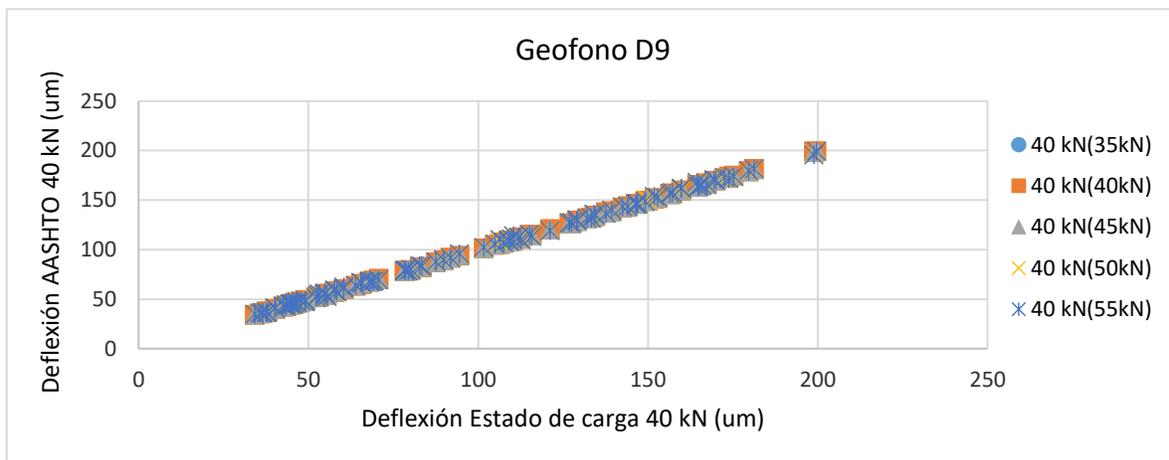


Figura 3.42. Correlación de deflexiones Geófono 9.

3.8 Parámetros normalizados obtenidos mediante retrocálculo

En base a los valores de deflexión normalizados para cada carga aplicada, se calcula cada uno de los parámetros a través del proceso de retrocálculo indicado en la metodología AASHTO 93 obteniendo los parámetros de diseño requeridos para el cálculo del espesor de la losa de hormigón y de esta manera verificar la eficiencia o deficiencia para la demanda de tráfico en el periodo de diseño considerado.

En la Tabla 3.16 (Parámetros calculados, Carril izquierdo - Tramo 1), Tabla 3.17 (Parámetros calculados, Carril derecho - Tramo 1), Tabla 3.18 (Parámetros calculados, Carril izquierdo - Tramo 2), Tabla 3.19 (Parámetros calculados, Carril derecho - Tramo 2) se presentan los valores tanto de módulo de reacción estático “k”, módulo de elasticidad del concreto “ E_c ” así como del módulo de rotura del concreto “ S_c ” para cada carga nominal aplicada una vez que sus deflexiones han sido normalizadas a la carga de 40 kN.



Tabla 3.16. Parámetros calculados carga normalizada 40 kN, Carril izquierdo – Tramo 1 (AASHTO).

TRAMO 1 - CARRIL IZQUIERDO (AASHTO)					
	40 kN(35 kN)	40 kN(40 kN)	40 kN(45 kN)	40 kN(50 kN)	40 kN(55 kN)
AREA (pulg)	30.31	30.16	30.05	29.93	29.85
Radio de rigidez relativa lk (pulg)	35.21	34.53	34.05	33.51	33.18
Módulo de reacción k dinámico (pci)	135.55	139.80	142.68	145.94	147.96
Módulo de reacción k estático (pci)	67.78	69.90	71.34	72.97	73.98
Módulo Ec (psi)	5005988	4776870	4607522	4421412	4307557
Módulo de rotura S'c (psi)	706.26	696.29	688.93	680.83	675.88

Tabla 3.17. Parámetros calculados carga normalizada 40 kN, Carril derecho – Tramo 1 (AASHTO)

TRAMO 1 - CARRIL DERECHO (AASHTO)					
	40 kN(35 kN)	40 kN(40 kN)	40 kN(45 kN)	40 kN(50 kN)	40 kN(55 kN)
AREA (pulg)	27.74	27.47	27.19	27.03	26.93
Radio de rigidez relativa lk (pulg)	26.26	25.59	24.91	24.54	24.32
Módulo de reacción k dinámico (pci)	834.60	851.29	861.99	874.83	878.00
Módulo de reacción k estático (pci)	417.30	425.65	431.00	437.42	439.00
Módulo Ec (psi)	9534137	8768508	7979377	7627316	7379358
Módulo de rotura S'c (psi)	903.23	869.93	835.60	820.29	809.50

Tabla 3.18. Parámetros calculados carga normalizada 40 kN, Carril izquierdo – Tramo 2 (AASHTO)

TRAMO 2 - CARRIL IZQUIERDO (AASHTO)					
	40 kN(35 kN)	40 kN(40 kN)	40 kN(45 kN)	40 kN(50 kN)	40 kN(55 kN)
AREA (pulg)	29.88	29.73	29.58	29.50	29.46
Radio de rigidez relativa lk (pulg)	33.30	32.67	32.11	31.77	31.62
Módulo de reacción k dinámico (pci)	200.56	206.66	212.08	214.53	217.28
Módulo de reacción k estático (pci)	100.28	103.33	106.04	107.27	108.64
Módulo Ec (psi)	5926198	5654015	5417801	5248255	5221385
Módulo de rotura S'c (psi)	746.29	734.45	724.17	716.80	715.63

Tabla 3.19. Parámetros calculados carga normalizada 40 kN, Carril derecho – Tramo 2 (AASHTO).

TRAMO 2 - CARRIL DERECHO (AASHTO)					
	40 kN(35 kN)	40 kN(40 kN)	40 kN(45 kN)	40 kN(50 kN)	40 kN(55 kN)
AREA (pulg)	29.64	29.37	29.18	29.07	28.91
Radio de rigidez relativa lk (pulg)	32.32	31.29	30.62	30.24	29.70
Módulo de reacción k dinámico (pci)	320.15	340.22	348.61	352.20	359.61
Módulo de reacción k estático (pci)	160.07	170.11	174.30	176.10	179.81
Módulo Ec (psi)	8390061	7833084	7366184	7074595	6723541
Módulo de rotura S'c (psi)	853.47	829.24	808.93	796.24	780.97

En estas tablas se puede ver la influencia que tienen la carga aplicada durante el ensayo de deflectometría, donde las deflexiones producto de estas cargas al ser normalizadas mediante la ecuación de la AASHTO provoca que existan ligeras variaciones en el parámetro de partida de la metodología de retrocálculo que es el AREA del cuenco de deflexión y como los demás



parámetros tienen un grado de sensibilidad ya sea menor o mayor a esta diferencia de valores.

Según los resultados referentes a la losa de hormigón de los dos tramos, el hormigón que lo conforma es de buena calidad ya que los valores de módulo de elasticidad y módulo de rotura indican que son hormigones de alta resistencia, por otra parte el valor que tiene más variación es el módulo de elasticidad del concreto ya que se puede ver la gran diferencia en los resultados entre carriles incluso en un mismo tramo.

3.9 Diseño de sobrecarpeta

Finalmente, a partir de la información obtenida referente a los parámetros de módulo de reacción estático de la subrasante, módulo de elasticidad del concreto, así como el módulo de rotura del concreto, se realiza el cálculo para la implementación de una sobrecarpeta de hormigón asfáltico, para lo cual se siguen los pasos indicados en la guía de diseño de pavimentos.

3.9.1 Espesor de la losa de hormigón

La determinación del espesor de la losa existente se realiza a través de la extracción de núcleos. En base a la información recopilada referente a la vía se ha constatado que existen puntos donde se lo ha realizado en el año 2018, estos son en las abscisas 9+248, 19+100 del carril izquierdo y 30+805 del carril derecho (Sánchez, 2018), lo cual sirven como insumo para en lo posterior calcular el espesor de la carpeta asfáltica necesaria.

La Tabla 3.20 muestra los valores de espesor de losa existente, en los que se ha considerado para el primer tramo de análisis el espesor de la losa correspondiente a la abscisa 9+248 y para el segundo tramo se considera el espesor de la losa correspondiente a la abscisa 19+100.

Tabla 3.20. Espesor de losa de hormigón (Sánchez, 2018).

Espesores (mm)		
Abscisa	Abscisa	Abscisa
9+248	19+200	30+805
202	210	200

3.9.2 Análisis de tráfico

De acuerdo a la información proporcionada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas MTOP se realizó el conteo de tráfico en la vía Cuenca - Molleturo - El Empalme en el año 2017, donde se incluye la proyección del mismo para un periodo de 20 años (MTOP, 2019). Esta información es la base para la proyección de tráfico y en función de las tasas de crecimiento definidas en el informe para las diferentes clasificaciones de vehículos se procede a calcular el tráfico para el periodo de diseño considerado. La Tabla 3.21 muestra el



TPDA calculado por la Dirección de Estudios del MTOP para el tramo Sayausí - Jardín del Cajas, información que contiene los dos tramos de vía analizados.

Tabla 3.21. Proyección del TPDA tramo Sayausí - Jardín del Cajas (MTOP, 2019).

PROYECTO: CUENCA - MOLLEURO - NARANJAL
 TRAMO: Sayausí - Jardín del Cajas
 DIRECCION: DOS

AÑO	LIVIANO	BUS	CAMION 2 EJES		CAMION 3 Ejes	CAMION 5 Ejes	CAMION 6 Ejes	TOTAL Vehiculos
			Liviano	Medio				
2017	3133	174	45	246	13	45	13	3670
2018	3321	178	47	257	14	47	14	3878
2019	3519	182	49	268	15	49	15	4097
2020	3730	186	52	280	15	52	15	4329
2021	3953	190	54	293	16	54	16	4575
2022	4157	194	56	304	17	56	17	4800
2023	4371	198	58	317	17	58	17	5037
2024	4597	202	61	330	18	61	18	5285
2025	4834	205	63	343	19	63	19	5546
2026	5084	209	66	357	19	66	19	5821
2027	5313	213	68	370	20	68	20	6073
2028	5552	217	71	384	21	71	21	6336
2029	5803	220	73	398	22	73	22	6611
2030	6065	224	76	412	22	76	22	6898
2031	6338	228	79	428	23	79	23	7198
2032	6591	232	81	442	24	81	24	7475
2033	6854	235	84	457	25	84	25	7763
2034	7127	239	87	472	26	87	26	8063
2035	7412	242	90	488	27	90	27	8374
2036	7708	246	93	504	27	93	27	8697
2037	8015	250	96	521	28	96	28	9033
2038	8335	253	99	538	29	99	29	9383

Como se puede ver en la Tabla 3.21, la composición vehicular que predomina en este segmento es la de vehículos livianos, en este tramo de análisis se evidencia un mayor flujo vehicular liviano y de buses de transporte publico debido a que se encuentra en una zona con mayor densidad poblacional y de turismo local. Otro vehículo con una mayor presencia son los camiones de dos ejes ya que estos están dedicados a abastecer al comercio de la zona.

▪ Periodo de diseño

El periodo de diseño del proyecto se lo realiza en función de la condición de la vía como lo sugiere la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimento presentados en la Tabla 3.22.



Tabla 3.22. Periodo de análisis. (AASHTO, 1993).

Condiciones de la carretera	Periodo de análisis (años)
Urbano de gran volumen	30 - 50
Rural de gran volumen	20 - 50
Pavimentado de bajo volumen	15 - 25
Superficie lastrada de bajo volumen	15 - 20

Considerando que al tratarse de una Red Vial Estatal que conecta dos provincias de gran importancia y que durante su trayecto no atraviesa una zona urbana densamente poblada se puede considerar que es una carretera rural de gran volumen, razón por la cual se considera un periodo de análisis de 20 años, esto bajo el criterio de que periodos más largos infliere en costos de reforzamiento estructural del pavimento existente a más de que no solo esta sea la única intervención a realizarse ya que por el volumen de tráfico también se tendrá que analizar una ampliación de la vía.

▪ Tasas de crecimiento

A partir de las tasas de crecimiento vehicular incluidas en el informe del MTOP (MTOP, 2019) se considera el final de la proyección el año 2040, las tasas de crecimiento se presentan en la Tabla 3.23.

Tabla 3.23. Tasas de crecimiento del TPDA tramo Sayausi - Jardín del Cajas. (MTOP, 2019).

TASAS	LIV	BUS	CAMION
2015-2020	1.0598	1.0227	1.0445
2020-2025	1.0516	1.0196	1.0407
2025-2030	1.0451	1.0172	1.0367
2030-2035	1.0399	1.0151	1.0333
2035-2040	1.0399	1.0149	1.0285

▪ Pesos y dimensiones

Para determinar el número de ejes equivalentes es necesario proyectar en el tiempo el tráfico actual y determinar el daño relativo que cada tipo de vehículo provocará a los tramos de diseño. Los pesos adoptados para la determinación de los factores de daño FC, son los máximos legales permitidos en las normas vigentes del Ecuador (MTOP, 2016). La Tabla 3.24 muestra los pesos de los ejes de los vehículos que conforman la base del conteo vehicular realizado en la vía tomando como base la Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones de la Tabla 3.25.

Tabla 3.24. Cargas adoptadas para cálculo de Factor de daño FC. (MTO, 2016).

Tipo de vehículo	Carga, Eje			
	Llanta Simple (Ton)	Carga, Eje Llanta Doble (Ton)	Carga, Eje Tándem (Ton)	Carga Eje Tridem (Ton)
Bus	7	11		
Camión liviano	2D	3	4	
	2DA	3	7	
Camión 3 ejes	3-A		20	
Camión 5 ejes	2S3	7	11	24
Camión 6 ejes	3S3	7		20

Tabla 3.25. Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones (MTO, 2016).

TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA POR EJE	DESCRIPCIÓN	PESO MÁXIMO PERMITIDO (Ton.)	LONGITUDES MÁXIMAS PERMITIDAS (metros)		
				Largo	Ancho	Alto
2 D			7	5,00	2,60	3,00
2DA			10	7,50	2,60	3,50
2DB			18	12,20	2,60	4,10
3-A			27	12,20	2,60	4,10
4-C			31	12,20	2,60	4,10
4-0 otomus			32	12,20	2,60	4,10
V2DB			18	12,20	2,60	4,10
V3A			27	12,20	2,60	4,10
VZS			27	12,20	2,60	4,10
T2			18	8,50	2,60	4,10
T3			27	8,50	2,60	4,10
S3			24	13,00	2,60	4,10
S2			20	13,00	2,60	4,10
S1			11	13,00	2,60	4,10
R2			22	10,00	2,60	4,10
R3			31	10,00	2,60	4,10
B1			11	10,00	2,60	4,10
B2			20	10,00	2,60	4,10
B3			24	10,00	2,60	4,10

TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA POR EJE	DESCRIPCIÓN	VEHICULAR MÁXIMO PERMITIDO (toneladas)	MÁXIMAS PERMITIDAS (metros)		
				Largo	Ancho	Alto
2S1			29	20,50	2,60	4,30
2S2			38	20,50	2,60	4,30
2S3			42	20,50	2,60	4,30
3S1			38	20,50	2,60	4,30
3S2			47	20,50	2,60	4,30
3S3			48	20,50	2,60	4,30
2R2			40	20,50	2,60	4,30
2R3			48	20,50	2,60	4,30
3R2			48	20,50	2,60	4,30
3R3			48	20,50	2,60	4,30
2B1			29	20,50	2,60	4,30
2B2			38	20,50	2,60	4,30
2B3			42	20,50	2,60	4,30
3B1			38	20,50	2,60	4,30
3B2			47	20,50	2,60	4,30
3B3			48	20,50	2,60	4,30

▪ **Número de ejes equivalentes**

Para el diseño del pavimento por método de la AASHTO es necesario determinar el número de ejes equivalentes en el carril de diseño y durante el periodo de diseño (20 años). Este valor relaciona el número de vehículos que circularan por la vía y el daño relativo de cada vehículo.

El número de ejes equivalentes de 8.2 t corresponde al número de repeticiones de carga sobre el pavimento en el período de diseño, por lo tanto, debe calcularse a cuántas pasadas de esa carga corresponde una pasada de una carga estándar de 8.2 Toneladas (18,000 libras). Esto se consigue calculando el factor de eje equivalente de cada tipo de vehículos según la carga



que produce cada eje. Para tal efecto, se debe pesar cada eje y luego transformar esta carga al número de pasadas de un eje estándar.

Para pavimentos flexibles y rígidos este factor se lo determina mediante la Ecuación 3.1 de la AASHTO.

$$FC = \frac{W_{t18}}{W_{tx}} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

W_{t18} : Cargas de ejes simples de 8.2 toneladas.

W_{tx} : Cargas de ejes simples de x toneladas.

Para calcular el factor de equivalencia se ha utilizado la Ecuación 3.2 propuesta por la AASHTO para pavimentos rígidos.

$$\frac{W_x}{W_{18}} = \left[\frac{L_{18} + L_{2s}}{L_x + L_{2x}} \right]^{4.62} \left[\frac{10^{G/\beta_x}}{10^{G/\beta_{18}}} \right] [L_{2x}]^{3.28} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

W: Aplicaciones por eje (repeticiones).

L_x : Carga del eje evaluado (kips).

L_{18} : Carga del eje patrón/estándar (kips).

L_{2x} : 1, 2, 3 Código de configuración de los ejes.

x: Eje evaluado.

1: Eje simple.

2: Eje tándem.

3: Eje tridem.

L_{2s} : Código del eje patrón, igual a 1.

Para encontrar el valor del factor G , se emplea la Ecuación 3.3.

$$G = \log \left(\frac{4.5 - P_t}{4.5 - 1.5} \right) \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

P_t : Pérdida de servicio o índice de servicio final, es un índice que se refiere al valor esperado de serviciabilidad que debe brindar el pavimento al final del periodo de



diseño; se adopta un valor de 2.5 que es el recomendado para vías de alto volumen de tráfico (AASHTO, 1993).

Para encontrar el valor del β_x se emplea la Ecuación 3.4.

$$\beta_x = 1.00 + \left(\frac{3.63(L_x + L_{2x})^{5.20}}{(D+1)^{8.46} L_{2x}^{3.52}} \right) \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde:

D: Es el espesor de la losa estimado.

Para el cálculo del número total de ejes equivalentes para el periodo de diseño de 20 años para pavimento flexible se realizaron las siguientes consideraciones dependiendo del tramo de diseño:

Factor de Distribución por Dirección: Al tratarse de una vía con un carril por dirección se ha tomado el valor de 50%, siendo este valor el sugerido en la Guía de Diseño de la AASHTO la cual se presenta en la Tabla 3.26 en el que se asume de que la mitad del flujo va por cada dirección.

Tabla 3.26. Factor de distribución por dirección (AASHTO, 1993).

Número de carriles en ambas direcciones	Porcentaje de ESAL en el carril de diseño
2	50
4	45
6 o más	40

Factor de Distribución por Carril: Los segmentos de la vía sujetos de análisis cuentan con un solo carril por dirección por lo que en base a la Tabla 3.27 tomada de la Guía de diseño AASHTO se ha considerado un valor del 100% de ESALs en el carril de diseño.

Tabla 3.27. Factor de distribución por carril (AASHTO, 1993).

Número de carriles en cada dirección	Porcentaje de ESAL en el carril de diseño
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4	50 - 75

Con la aplicación de los factores indicados el número de ejes equivalentes acumulados de diseño para el pavimento rígido para los tramos de diseño que es de 6'219.976 para un periodo de 20 años, en la Tabla 3.28 se presentan los valores de ejes acumulados (N) para cada tipo de vehículo resultado del conteo.



Tabla 3.28. Ejes equivalentes acumulados para periodo de diseño.

Factor de daño		FC	Factor de Proyección	TPDA actual	N acumulado
Tipo					
	Liviano	0.008	22.219	3730	114.965
	Bus	3.946	22.163	186	2'969.006
Camión	liviano 2D	0.063	22.193	52	13.319
	medio 2DA	0.529	22.193	280	600.105
Camión 3 ejes	3-A	5.880	22.193	15	357212
Camión 5 ejes	2S3	7.547	22.193	52	1'589.435
Camión 6 ejes	3S3	9.480	22.193	15	575.935
					6'219.976

3.9.3 Diseño de pavimentos rígidos método AASHTO 93

El método de la AASHTO para el diseño de pavimentos considera que estos soportarán niveles de tráfico superiores a 50,000 ESALs durante el período de funcionamiento. El procedimiento de diseño de la AASHTO se basa en el algoritmo de rendimiento del pavimento de prueba de carretera de AASHO Road Test inherente al uso de pasadores en uniones transversales (AASHTO, 1993). Para la determinación del espesor requerido para el número de ejes acumulados en el período de diseño será a través de la Ecuación 3.5.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}}$$

$$+ (4.22 - 0.32P_t) \times \log_{10} \left\{ \frac{S'_c \times C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k} \right)^{0.25}} \right]} \right\}$$

Ecuación 3.5

Donde:

W_{18} : Número estimado de ejes simples equivalentes de 8.2 toneladas (18 kips) a lo largo del periodo de diseño.

Z_R : Desviación estándar normal correspondiente al nivel de confianza.

S_o : Error estándar combinado de la predicción del tránsito y de la predicción del comportamiento.

ΔPSI : Diferencia entre el índice de servicio inicial (P_o) y el final (P_t)



D: Espesor del pavimento de concreto en (pulg)

S'c: Módulo de rotura en psi para el concreto de cemento portland

Cd: Coeficiente de drenaje

J: Coeficiente de transferencia de cargas, usado para ajustar las características de transferencia de cargas específicas

Ec: Módulo de elasticidad (psi) del hormigón de concreto portland

k: Módulo de reacción efectivo de la subrasante (pci)

- **Número de ejes equivalentes para el diseño**

Como ya se indicó anteriormente, el número de ejes equivalentes acumulados para el periodo de diseño de 20 años correspondiente al tramo Sayausí - Jardín del Cajas es de 6'219.976 ESALs.

- **Factor de Confiabilidad**

El nivel de confianza establece un criterio que se relaciona con el desempeño del pavimento frente a la actuación de solicitudes externas. La confiabilidad se define como la probabilidad de que el pavimento diseñado se comporte de una manera satisfactoria durante su periodo de diseño, bajo las condiciones de tránsito y ambientales.

El factor de confiabilidad de diseño tiene en cuenta variaciones tanto en la predicción del tránsito como en la predicción del comportamiento y por lo tanto proporciona un nivel predeterminado de confianza (R) en el que los tramos del pavimento sobrevivirán al período para el cual fueron diseñados (AASHTO, 1993). La Tabla 3.29 presenta los niveles de confiabilidad recomendados por la AASHTO.

Tabla 3.29. Nivel de confianza sugeridos según la clasificación. (AASHTO, 1993).

Clasificación	Nivel de Confiabilidad recomendado	
	Urbana	Rural
Autopistas interprovinciales y otras	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Carreteras locales	50 - 80	50 - 80

Para el caso, de los dos tramos de análisis, se considera un nivel de confianza de 85% correspondiente a la media del rango de una arteria principal en una zona rural, este nivel de confianza otorga una desviación estándar Z_R de 1.04. El error estándar combinado de la



predicción del tránsito y de la predicción del comportamiento So sugerido en el caso de pavimentos rígidos es de 0.30 a 0.40 (AASHTO, 1993) por lo que se asume el valor de 0.35.

▪ **Serviciabilidad**

La selección del PSI o el índice de capacidad de servicio terminal P_t más bajo permitido se basan en el índice más bajo que se tolerará antes de que sea necesaria la rehabilitación, el recapeo o la reconstrucción. Se sugiere un índice de 2.5 o más para el diseño de las principales carreteras y 2.0 para las autopistas con menor volumen de tráfico (AASHTO, 1993). En este caso se considera que al tratarse de una vía de gran importancia que conecta la provincia del Guayas y Azuay y siendo la ruta de ingreso de mercadería a la ciudad de Cuenca se considera un índice de servicio final de 2.5.

Por otra parte, en lo referente al índice de servicio inicial la AASHO Road Test propone un valor de 4.5 para pavimentos rígidos (AASHTO, 1993). De esta manera se obtiene que la pérdida de serviciabilidad ΔPSI es de 2.00.

▪ **Coefficiente de drenaje**

El tratamiento para el nivel de drenaje esperado para un pavimento rígido es mediante el uso de un coeficiente de drenaje C_d en la ecuación de desempeño. Como base para la comparación, el valor de C_d para las condiciones en el AASHO Road Test es 1.0 (AASHTO, 1993). La Tabla 3.30 muestra los valores de C_d que dependen de la calidad del drenaje.

Tabla 3.30. Coeficiente de drenaje para pavimentos rígidos. (AASHTO, 1993).

Calidad del drenaje	% de tiempo de exposición de la estructura del pavimento a nivel de humedad próximos a la saturación			
	<1%	1-5%	5-25%	>25%
Excelente	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Bueno	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00
Aceptable	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Pobre	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Muy Pobre	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

Considerando el valor del informe realizado por la consultora PROMANVIAL en el año 2014 la cual está basada en documentos del diseño original realizado por la consultora INEXTEC del año 2006 que de acuerdo a las condiciones climatológicas de la zona toma un valor de C_d igual a 1.00 (Promanvial Consulting, 2014), que considera una calidad de drenaje buena con un porcentaje de exposición de la estructura a niveles de humedad cercanos a la saturación del 5% al 25% , por lo que este valor será considerado para el cálculo del espesor de la losa requerido para la demanda futura de tráfico.

▪ Transferencia de carga

La capacidad de transferencia de carga en una junta transversal es medida mediante la eficiencia de la junta. En el proyecto, se evalúa las juntas en todas las abscisas donde se ejecutaron los ensayos en el centro de la losa, en total se realizaron 102 ensayos de transferencia de carga en los 10 km de vía. La carga nominal aplicada durante el ensayo es la carga normalizada de 40 kN, el proceso de determinación de transferencia de carga consiste en medir la deflexión en el centro de la carga y a 12 pulg (30 cm) del centro atravesando la junta tal como se indica en la Figura 3.43.

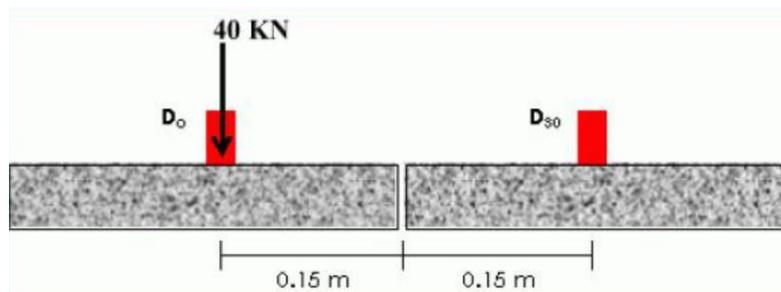


Figura 3.43. Esquema de ensayo de transferencia de carga en juntas trasversales. (Promanvial Consulting, 2014).

La Figura 3.44 muestra la ejecución del ensayo de transferencia de carga en la vía de estudio donde se aprecia que la ubicación de los geófonos está conforme a lo indicado en el esquema para la ejecución de ensayos de transferencia de carga en juntas trasversales.

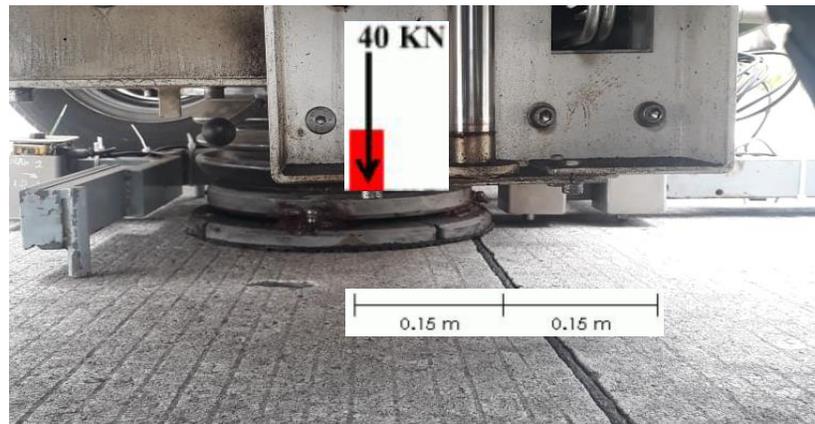
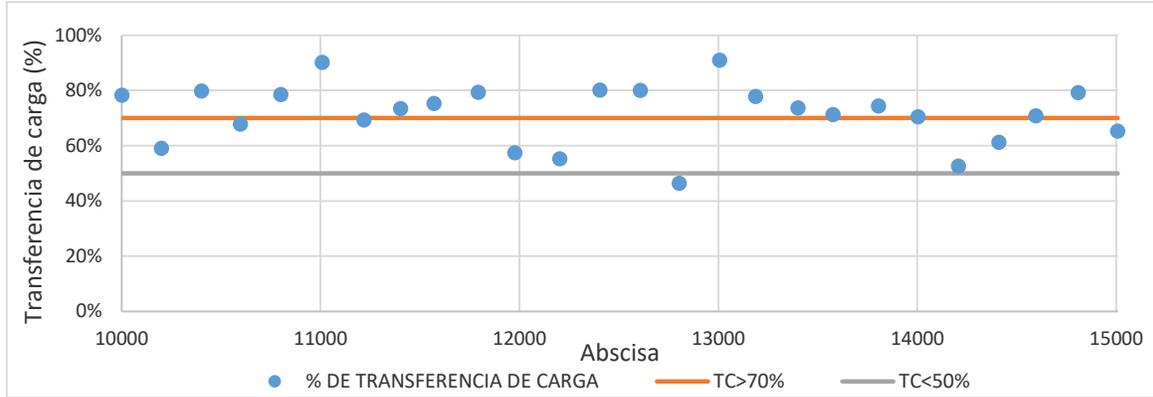


Figura 3.44. Ensayo de transferencia de carga en juntas trasversales

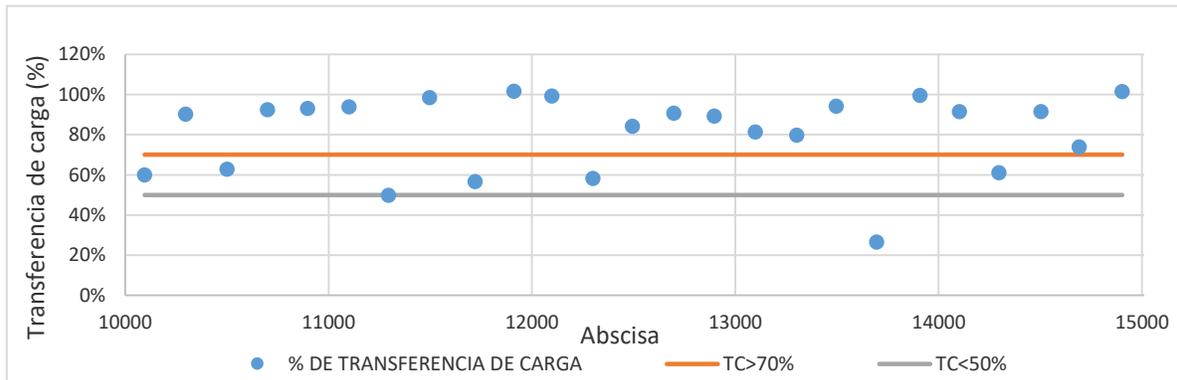
En la Figura 3.45 (Transferencia de carga en junta calzada derecha - Tramo 1), Figura 3.46 (Transferencia de carga en junta calzada izquierda - Tramo 1.), Figura 3.47 (Transferencia de carga en junta calzada derecha - Tramo 2) y Figura 3.48 (Transferencia de carga en junta calzada izquierda - Tramo 2) se indican los porcentajes de transferencia de carga de los dos tramos analizados en los dos sentidos de circulación en el que se incluye un resumen de

porcentaje de juntas con muy buena transferencia de carga superior al 70%; de regular a buena transferencia de carga entre 50% y 70%; y mala transferencia de carga menor a 50%. En el Anexo 7.3 se presenta la tabla de cálculo de transferencia de carga de todas las juntas analizadas.



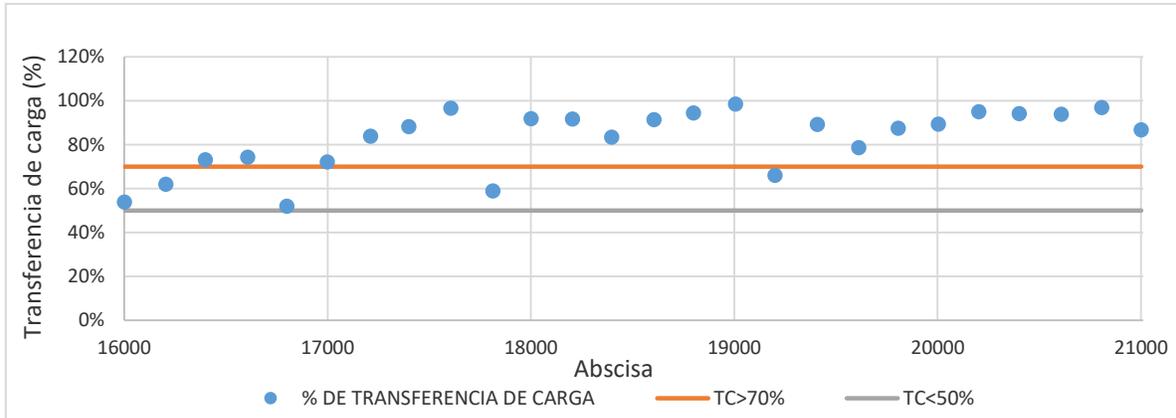
	No. Puntos	%
Transferencia de Carga mayor al 70%	17	65.38
Transferencia de Carga entre el 50% y 70%	8	30.77
Transferencia de Carga menor al 50%	1	3.85
	26	100.00

Figura 3.45. Transferencia de carga en junta calzada derecha - Tramo 1.



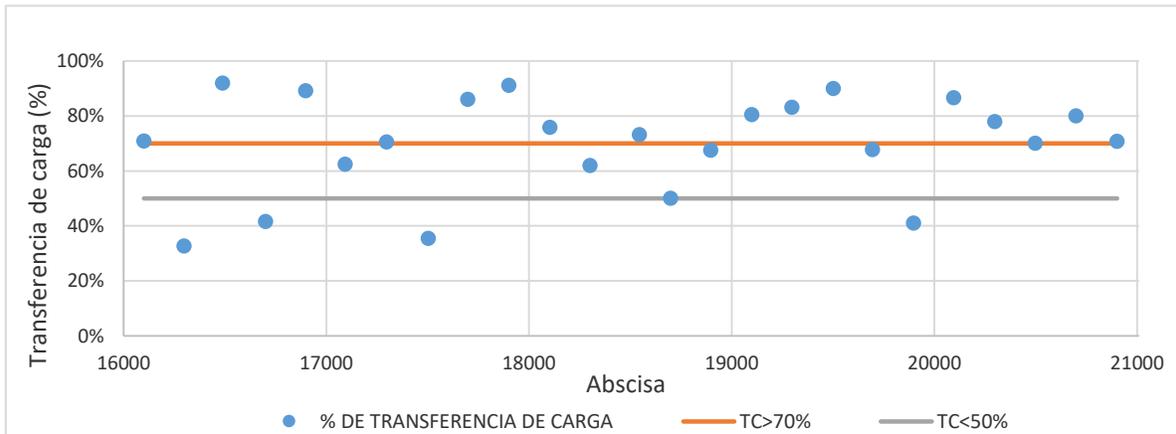
	No. Puntos	%
Transferencia de Carga mayor al 70%	18	72.00
Transferencia de Carga entre el 50% y 70%	5	20.00
Transferencia de Carga menor al 50%	2	8.00
	25	100.00

Figura 3.46. Transferencia de carga en junta calzada izquierda - Tramo 1.



	No. Puntos	%
Transferencia de Carga mayor al 70%	21	80.77
Transferencia de Carga entre el 50% y 70%	5	19.23
Transferencia de Carga menor al 50%	0	0.00
	26	100.00

Figura 3.47. Transferencia de carga en junta calzada derecha - Tramo 2.



	No. Puntos	%
Transferencia de Carga mayor al 70%	16	64.00
Transferencia de Carga entre el 50% y 70%	5	20.00
Transferencia de Carga menor al 50%	4	16.00
	25	100.00

Figura 3.48. Transferencia de carga en junta calzada izquierda - Tramo 2.

La información gráfica y los porcentajes de transferencia de carga indican que entre el 64% y 80% de las juntas transversales se encuentran en buenas condiciones de funcionamiento; entre el 20% y 30% de las juntas trasversales se comportan en condición regular y entre el



3% y 16% de las juntas están en condición mala.

En base a los resultados obtenidos de transferencia de carga y considerando el promedio del rango, el 72% de las juntas se encuentran en buenas condiciones por lo que se considera este valor para determinar el coeficiente de transferencia de carga siendo este valor $J = 3.2$, según lo indicado en la Tabla 2.9 de la sección 2.8.4 (Diseño de espesor de sobrecarpeta).

▪ Espesor de la losa de concreto

En base a los parámetros descritos anteriormente, los cuales se emplean en la ecuación dada por la AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos, se ha realizado el cálculo del espesor requerido mediante el software *Modified AASHTO Pavement Equations* implementado por la “Universidad de Idaho” en los que se ingresarán los parámetros de diseño, en lo referente al campo de módulo de elasticidad del concreto E_c , módulo de rotura S'_c y el módulo de reacción de la subrasante k . Se emplean los valores previamente obtenidos en el literal 3.8 (Parámetros normalizados obtenidos mediante retrocálculo) para cada estado de carga aplicado y que fueron normalizados a la carga de 40 kN, además para el caso de mantenimiento en los dos tramos, se considera el que posee el valor de módulo de reacción de subrasante más bajo, al ser la condición más desfavorable siendo estos los correspondientes al carril izquierdo, Tabla 3.31 (Parámetros calculados, Carril izquierdo - Tramo 1) y Tabla 3.32 (Parámetros calculados, Carril izquierdo - Tramo 2).

Tabla 3.31. Parámetros calculados para carga normalizada 40 kN, Carril izquierdo – Tramo 1.

TRAMO 1 - CARRIL IZQUIERDO (AASHTO)					
	40kN(35 kN)	40kN(40 kN)	40kN(45 kN)	40kN(50 kN)	40kN(55 kN)
Módulo de reacción k estático (pci)	67.78	69.90	71.34	72.97	73.98
Módulo de elasticidad E_c (psi)	5005988	4776870	4607522	4421412	4307557
Módulo de rotura S'_c (psi)	706.26	696.29	688.93	680.83	675.88

Tabla 3.32. Parámetros calculados para carga normalizada 40 kN, Carril izquierdo – Tramo 2.

TRAMO 2 - CARRIL IZQUIERDO (AASHTO)					
	40kN(35 kN)	40kN(40 kN)	40kN(45 kN)	40kN(50 kN)	40kN(55 kN)
Módulo de reacción k estático (pci)	100.28	103.33	106.04	107.27	108.64
Módulo de elasticidad E_c (psi)	5926198	5654015	5417801	5248255	5221385
Módulo de rotura S'_c (psi)	746.29	734.45	724.17	716.80	715.63

La Figura 3.49 muestra la interfaz de ingreso de los parámetros de diseño de pavimentos rígidos que requiere el programa *Modified AASHTO Pavement Equations*.



★ Modified AASHTO Rigid Pavement Equation ×

Inputs

St. Normal Deviate (Zr)	<input type="text" value="1.04"/>	Initial Serviceability (Po)	<input type="text" value="4.5"/>	Modulus of Rupture of Concrete (Sc)	<input type="text" value="675.88"/>	psi
Overall St. Deviation (So)	<input type="text" value="0.35"/>	Terminal Serviceability (Pt)	<input type="text" value="2.5"/>	Modulus of Subgrade Reaction (K)	<input type="text" value="73.98"/>	pci
No. of Application (Wt18)	<input type="text" value="6219976"/>	Modulus of Elasticity of Concrete (Ec)	<input type="text" value="4307556.69"/>	Load Transfer Coefficient (J)	<input type="text" value="3.2"/>	
				Drainage Coefficient (Cd)	<input type="text" value="1.0"/>	

Slab Thickness

D = 9.148029

Figura 3.49. Software Modified ASHTO Rigid Pavement Equation.

La metodología de retrocálculo implementada por la AASHTO ha permitido obtener los parámetros estructurales de la losa y de la subrasante con ligeras diferencias dependiendo de la carga que se aplique durante el ensayo, finalmente como era de esperarse estas variaciones tienen su repercusión en los resultados del espesor de losa requerido para las cargas de tráfico proyectadas en el período de diseño, hay que notar que estas variaciones que se producen son también ligeras produciendo un espesor mayor cuando la carga aplicada durante el ensayos es mayor.

La Tabla 3.33 presenta los resultados obtenidos de espesor de losa en pulgadas, requeridos para el tráfico proyectado en el periodo de diseño considerado.

Tabla 3.33. Espesor de losa requerido para carga normalizada 40 kN (pulgadas)

	40kN(35 kN)	40kN(40 kN)	40kN(45 kN)	40kN(50 kN)	40kN(55 kN)
TRAMO 1	9.02	9.06	9.09	9.13	9.15
TRAMO 2	8.68	8.73	8.77	8.80	8.80

Nota: Los espesores calculados se presentan con formato decimal con el fin de demostrar la variación existente.

La variación de este espesor está en el 0.5% en el caso más desfavorable por lo que en términos de diseño este valor no tendría mayor influencia ya que se toman valores enteros, a través de la Tabla 3.34 se observa más claramente lo indicado anteriormente donde el valor máximo a tomar para diseño es de 24 cm en el primer tramo y de 23 cm en el segundo tramo, incluso si por temas de presupuesto estos valores pueden ser redondeados a valores de 23.50 cm en el primer tramo y a 22.50 cm en el segundo tramo donde aún no se ven afectados por

las variaciones en sus valores ya que estas son bajas.

Tabla 3.34. Espesor de losa requerido para carga normalizada 40 kN (centímetros)

	40kN(35 kN)	40kN(40 kN)	40kN(45 kN)	40kN(50 kN)	40kN(55 kN)
TRAMO 1	22.90	23.01	23.09	23.18	23.24
TRAMO 2	22.05	22.17	22.28	22.36	22.36

Nota: Los espesores calculados se presentan con formato decimal con el fin de demostrar la variación existente.

La Figura 3.50 muestra la tendencia de estos valores donde se nota claramente que la variación del espesor de la losa es mínimo según la carga aplicada en el ensayo de deflectometría.

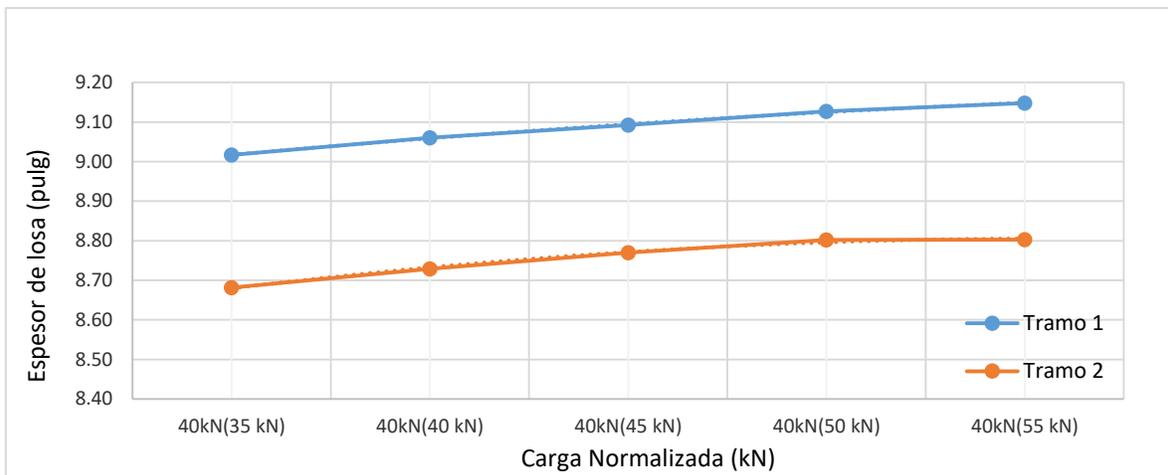


Figura 3.50. Variación del espesor de losa de hormigón requerido

3.9.4 Espesor efectivo de losa del pavimento existente D_{ef}

Previo al cálculo del espesor efectivo de la losa del pavimento existente es necesario conocer los daños presentes en la superficie del pavimento, ya que de estos daños y la intervención a realizarse en estos dependerá del cálculo de los factores que afectan al espesor de la losa existente.

Como se indicó, y de acuerdo a la información referente a PCI de los tramos analizados, los cuales fueron proporcionados por el MTOP, el Tramo 1 abscisas 10+000 - 15+000 tiene un PCI de 75 (Muy Bueno) mientras que el Tramo 2 abscisas 16+000 - 21+000 el valor de PCI es de 89 (Excelente). El grupo de figuras presentados a continuación, Figura 3.51 (Parche asfáltico), Figura 3.52 (Grieta de Esquina), Figura 3.54 (Grieta transversal), Figura 3.53 (Punzonamiento), Figura 3.56 (Despostillamiento de junta), Figura 3.55 (Grieta longitudinal), Figura 3.58 (Parche deteriorado) y Figura 3.57 (Pulimento de agregados), muestran los daños encontrados en la superficie de los tramos analizados.



Figura 3.52. Grieta de Esquina.



Figura 3.51. Parche asfáltico.



Figura 3.54. Grieta transversal.

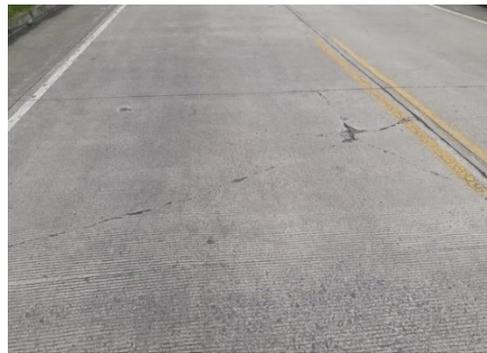


Figura 3.53. Punzonamiento.



Figura 3.56. Despostillamiento de junta.

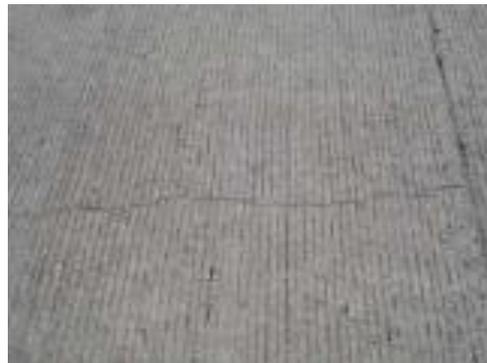


Figura 3.55. Grieta longitudinal.



Figura 3.58. Parche deteriorado.

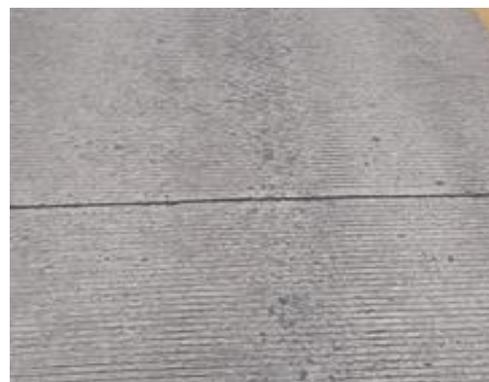


Figura 3.57. Pulimento de agregados.



El espesor efectivo de la losa existente está representado mediante la Ecuación 3.6.

$$D_{ef} = F_{jc} * F_{dur} * F_{fat} * D \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Siendo D el espesor de la losa de hormigón y los valores de “F” son factores de ajuste, que se presentan a continuación.

Factor de ajuste por juntas y fisuras F_{jc} : Este factor considera la pérdida de serviciabilidad producto de fisuras reflejadas y deterioradas en la sobrecarpetas causadas por juntas o fisuras no reparadas y discontinuidades en el pavimento existente lo que conlleva a la pérdida de serviciabilidad. Considerando que las fisuras transversales de las losas se pueden reflejar en el reforzamiento asfáltico, es obligatorio repararlas al menos las de severidad alta, previo al reforzamiento estructural. Si no se las repara, el valor del espesor de la losa de concreto efectivo se reduciría y el espesor de reforzamiento sería muy cuantioso. La Tabla 3.35 (Losas con grietas de esquina), Tabla 3.36 (Losas con grietas longitudinales), Tabla 3.37 (Losas con grietas transversales) y Tabla 3.38 (Losas con parches deteriorados) muestran los resultados del inventario de daños presentes en los tramos considerados para el análisis.

Tabla 3.35. Losas con grietas de esquina. (MTOPI, 2018)

	Baja	Media	Alta
10+000 - 15+000	10	5	4
16+000 - 21+000	3	1	0

Tabla 3.36. Losas con grietas longitudinales. (MTOPI, 2018)

	Baja	Media	Alta
10+000 - 15+000	0	1	0
16+000 - 21+000	1	0	0

Tabla 3.37. Losas con grietas transversales. (MTOPI, 2018)

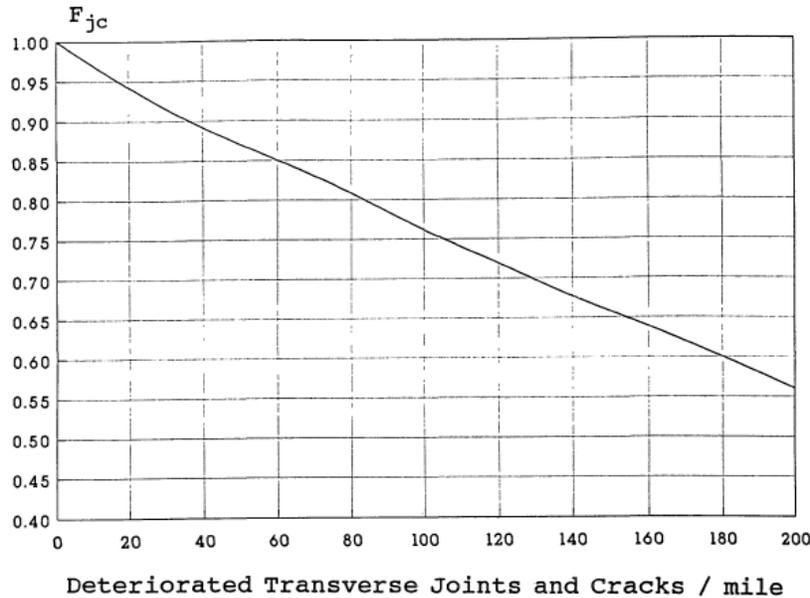
	Baja	Media	Alta
10+000 - 15+000	6	9	2
16+000 - 21+000	7	1	1

Tabla 3.38. Losas con parches deteriorados. (MTOPI, 2018)

	Baja	Media	Alta
10+000 - 15+000	10	2	0
16+000 - 21+000	7	1	0

Para determinar el factor de ajuste por la presencia de fisuras media y alta se supone que no se repararán las fisuras de severidad media, sin embargo, se deberán hacer un arreglo total de las juntas y losas punzonadas.

En función del número de fisuras, juntas deterioradas no reparadas, baches, etc, se determina el F_{jc} a través de la Figura 3.59.


 Figura 3.59. Factor de ajuste F_{jc}. (AASHTO, 1993).

La Tabla 3.39 muestra el número de daños por milla que se emplearon para el cálculo del factor F_{jc} en los dos tramos considerados, así como el factor obtenido.

 Tabla 3.39. Factor de ajuste por fisuras F_{jc}.

	Deterioros/milla	F _{jc}
10+000 - 15+000	27	0.93
16+000 - 21+000	13	0.97

Factor de ajuste por durabilidad F_{dur}: Este factor considera la pérdida de serviciabilidad en el pavimento existente cuando existen fisuras de durabilidad o fallas debidas a reacción álcali – agregado, considerando que el agregado pulido es uno de los problemas de durabilidad del concreto que se presenta con muy poca frecuencia en los tramos de análisis, la Tabla 3.40 muestra el área afectada por pulimento de agregados.

Tabla 3.40. Pulimento de agregados.

	Area afectada m ²	Area del tramo m ²	% de afectacion
10+000 - 15+000	225.7	36000	0.63%
16+000 - 21+000	171.4	36000	0.48%

El área afectada por efecto de pulimento de agregado es sumamente baja por lo que se asumirá el factor F_{dur} igual a 1.00 que se considera que no existen problemas de durabilidad.

Factor de ajuste por fatiga F_{fat}: Este factor considera daños de fatiga previos al recapeo. Se determina la extensión de fisuras transversales (en pavimentos de hormigón simple o con



armadura discontinua) o por punzonamiento (hormigón con refuerzo continuo) que pueden haber sido provocadas por repetición de cargas.

De acuerdo a la Tabla 3.37 (Losas con grietas transversales) el porcentaje de losas con grietas transversales en los dos tramos analizados son menores al 5 % por lo que se toma el valor de 0.99 que es el valor promedio del rango para pocas fisuras transversales en hormigón simple con juntas.

Finalmente, la Tabla 3.41 muestra los resultados del espesor de losa efectivo de la losa existente en función de los daños presentes en la superficie del pavimento.

Tabla 3.41. Espesor efectivo de la losa de hormigón existente.

	D (cm)	F _{jc}	F _{dur}	F _{fat}	Def
10+000 - 15+000	20.20	0.93	1.00	0.99	18.60
16+000 - 21+000	21.00	0.97	1.00	0.99	20.17

3.9.5 Determinación del espesor de la sobrecarpeta

Se realiza el cálculo del espesor de la sobrecarpeta de hormigón asfáltico mediante la Ecuación 3.7.

$$D_{ol} = A * (D_f - D_{ef}) \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde:

D_{ol} : Espesor de la sobrecarpeta, pulg

A: Factor de conversión de deficiencia del espesor del pavimento de hormigón en un espesor de concreto asfáltico

D_f : Espesor de losa requerido para soportar el tránsito futuro, pulg

D_{ef} : Espesor efectivo de la losa existente, pulg

El factor A es función de la deficiencia en el espesor del pavimento de hormigón, se determina mediante la Ecuación 3.8.

$$A = 2.2233 + 0.0099(D_f - D_{ef})^2 - 0.1534(D_f - D_{ef}) \quad \text{Ecuación 3.8}$$

La Tabla 3.42 (Espesor reforzamiento estructural Tramo 1) y Tabla 3.43 (Espesor reforzamiento estructural Tramo 2) muestra los resultados obtenidos del espesor de la sobrecarpeta (D_{ol}) para cada carga aplicada durante los ensayos y que han sido normalizadas a la carga de 40 kN para el periodo de diseño de 20 años.



Tabla 3.42. Espesor reforzamiento estructural para carga normalizada 40 kN, Tramo 1.

	40kN(35 kN)	40kN(40 kN)	40kN(45 kN)	40kN(50 kN)	40kN(55 kN)
Df (pulg)	9.02	9.06	9.09	9.13	9.15
Def (pulg)	7.32	7.32	7.32	7.32	7.32
A	1.99	1.99	1.98	1.98	1.98
Dol (pulg)	3.38	3.45	3.51	3.57	3.61

Tabla 3.43. Espesor reforzamiento estructural para carga normalizada 40 kN, Tramo 2.

	40kN(35 kN)	40kN(40 kN)	40kN(45 kN)	40kN(50 kN)	40kN(55 kN)
Df (pulg)	8.68	8.73	8.77	8.80	8.80
Def (pulg)	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94
A	2.11	2.11	2.10	2.10	2.10
Dol (pulg)	1.57	1.66	1.75	1.81	1.81

El espesor de hormigón asfáltico requerido para el reforzamiento estructural tiene un comportamiento similar al espesor de losa requerido para el tráfico proyectado, es decir este es creciente según se incrementa la carga en el ensayo de deflectometría, sin embargo la variación de este espesor de carpeta asfáltica es mayor que la del espesor de la losa de hormigón.



CAPÍTULO 4

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior. Este capítulo inicia con un análisis de los cuencos de deflexión obtenidos para las diferentes cargas aplicadas durante el ensayo de deflectometría y en base a su forma y la deflexión máxima obtenida se evalúa la estructura del pavimento. Mediante los resultados de regresión se realiza un análisis del comportamiento de los parámetros estructurales del pavimento como son: el módulo de rotura del concreto, módulo de elasticidad del concreto y el módulo de reacción de la subrasante, y a partir de este último, se realiza la caracterización. Seguidamente se examinan los resultados del coeficiente de correlación existente entre los valores de deflexión reales una vez que han sido normalizados por el método de la AASHTO y el correspondiente a la carga normalizada proveniente del ajuste lineal realizado con los resultados de los ensayos. Además, se realiza un análisis de los parámetros obtenidos mediante la aplicación del método de retrocálculo de la AASHTO 93 para todos los escenarios planteados en la metodología de trabajo. También, se incluye un análisis de correlación entre los parámetros obtenidos para las cargas reales una vez que fueron normalizados y el correspondiente a la carga normalizada proveniente de la regresión realizada con los valores de los ensayos. Finalmente, se efectúa un análisis de los resultados obtenidos del diseño de sobrecarpeta donde se verifica la influencia de la carga aplicada durante los ensayos de deflectometría tanto en el espesor de la losa de hormigón requerida para las condiciones futuras y el de sobrecarpeta de hormigón asfáltico empleada como refuerzo estructural.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de cuencos de deflexión

Mediante la metodología expuesta en la sección 2.5.3 (Parámetros obtenidos de pruebas deflectométricas) se realiza un análisis del comportamiento de la estructura del pavimento de acuerdo a los parámetros de AREA, incluyendo la forma del cuenco y de la deflexión máxima producida. El AREA del cuenco de deflexión está dada por la Ecuación 4.1.

$$\text{AREA}(\text{mm}) = 150 * \left[1 + 2 \left(\frac{d_{12}}{d_0} \right) + 2 \left(\frac{d_{24}}{d_0} \right) + \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right) \right] \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

d_0 : Deflexión máxima bajo el plato de carga.

d_{12} : Deflexión a 12 pulgadas (30 cm) desde el plato de carga.

d_{24} : Deflexión a 24 pulgadas (60 cm) desde el plato de carga.

d_{36} : Deflexión a 36 pulgadas (90 cm) desde el plato de carga.

La Tabla 4.1 muestra los valores de área obtenidos para cada carril de cada tramo según la carga aplicada.

Tabla 4.1. AREA (mm) de cuenco de deflexión (estados de carga).

		Area del cuenco de deflexión (mm)				
		35 kN	40 kN	45 kN	50 kN	55 kN
TRAMO 1	Carril izquierdo	758.29	754.10	750.90	748.38	746.34
	Carril derecho	692.56	685.31	680.04	676.03	672.89
TRAMO 2	Carril izquierdo	746.18	742.59	739.84	737.69	735.94
	Carril derecho	741.52	734.75	729.71	725.80	722.69

La Figura 4.1 muestra el cuenco de deflexión aplicando una carga de 40 kN para los dos carriles de cada tramo a fin de apreciar la forma del cuenco y su valor máximo de deflexión producido.

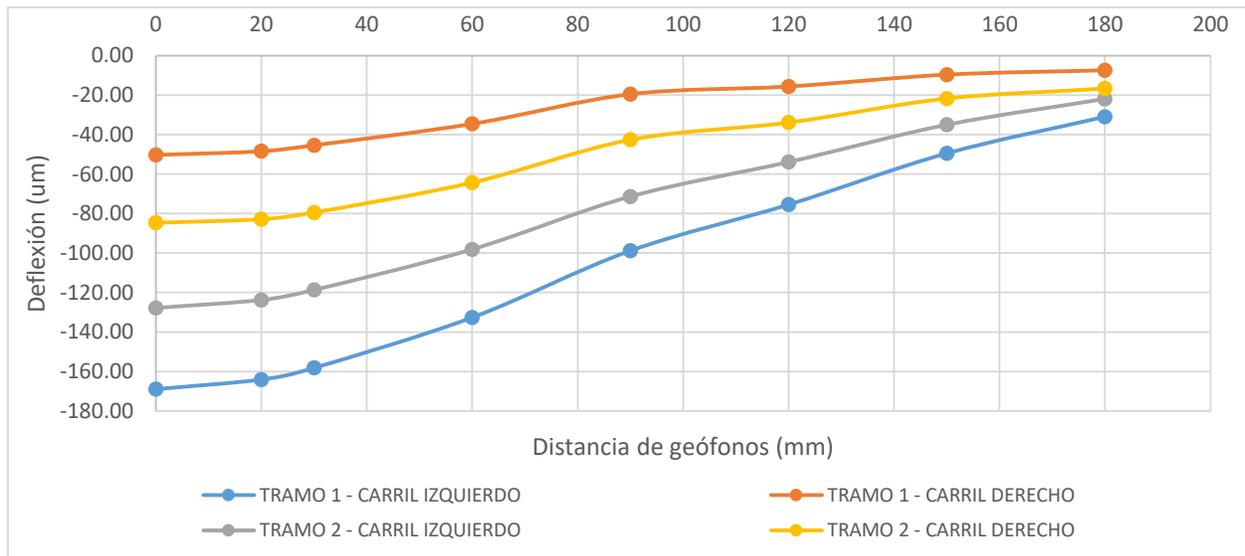


Figura 4.1. Cuenco de Deflexión carga normalizada (estados de carga)

Como se aprecia en la Figura 4.1 todos los cuencos tienen una curva extensa es decir que se tienen lecturas representativas en todos los geófonos, lo que conlleva a clasificarlas dentro del grupo Tipo I y Tipo II según la Figura 4.2 de deflexiones características en pavimentos, indicando en primera instancia que el pavimento se encuentra en buenas condiciones, lo que es corroborado por el PCI de los segmentos.

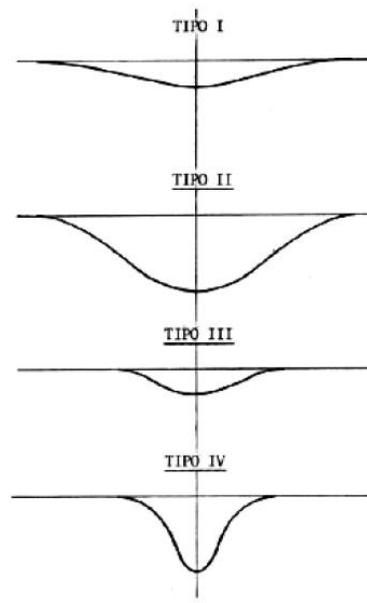


Figura 4.2. Tipos de cuenco de deflexion. (Bejarano, 2015)

Considerando los valores de deflexión máxima representativa producida en cada carril de los dos segmentos, se puede indicar que el carril derecho en ambos casos tienen deflexiones bajas a comparación con las del carril izquierdo; esto se debería a que en los puntos ensayados del carril derecho del primer tramo se encuentran en zonas de corte mientras que el lado izquierdo corresponde en su mayor parte a zonas de terraplén (ver Figura 4.4. Abscisa 11+600 y Figura 4.3. Abscisa 13+400), por otro lado en el segundo tramo existe una alternancia de zonas de corte y terraplén (ver Figura 4.6. Abscisa 17+600 y Figura 4.5. Abscisa 20+000).



Figura 4.4. Abscisa 11+600



Figura 4.3. Abscisa 13+400



Figura 4.6. Abscisa 17+600



Figura 4.5. Abscisa 20+000

Nota: En el Anexo 7.4 se muestran las fotografías correspondientes a las abscisas donde se realizaron los ensayos.

En el primer tramo se podría decir que los valores de módulos de reacción de la subrasante del lado derecho estarían en rangos altos, mientras que en el carril izquierdo los valores de módulos de reacción serían menores. En el segundo tramo el carril derecho presenta mejores condiciones de la subrasante, sin embargo, esta zona es más uniforme que la primera ya que la diferencia en su deflexión en relación al valor promedio es del 20% mientras que para el primer tramo es del 55%. Tomando en cuenta estas consideraciones, en la Tabla 4.2 se muestran los resultados de análisis de los cuencos de deflexión y su valoración del comportamiento de la estructura del pavimento.

Tabla 4.2. Caracterización de estructura del pavimento.

Tramo	Carril	Tipo de cuenco	Valor de AREA	Máxima Deflexión	Evaluación
1	Izquierdo	Tipo 2	Alto	Alto	Pavimento Fuerte/Subrasante Débil
	Derecho	Tipo 1	Alto	Bajo	Pavimento Fuerte/Subrasante Fuerte
2	Izquierdo	Tipo 2	Alto	Alto	Pavimento Fuerte/Subrasante Débil
	Derecho	Tipo 1	Alto	Bajo	Pavimento Fuerte/Subrasante Fuerte

De acuerdo a la evaluación realizada, la subrasante está catalogada como “fuerte” en el lado derecho mientras que del lado izquierdo presenta una condición de subrasante “débil” esto por los valores de deflexión obtenidos, por otro lado el tipo del cuenco nos da la característica de que el pavimento se encuentra en buenas condiciones.

4.2 Análisis del AREA del cuenco de deflexión

Aplicando el concepto de AREA incluido en la metodología AASHTO 93, en la Tabla 4.3 se muestran los valores de AREA obtenidos y en la Figura 4.7 se visualizan gráficamente estos valores para cada estado de carga en los tramos 1 y 2 donde se incluye la línea de tendencia para estos valores.

Tabla 4.3. AREA (pulg) de cuenco de deflexión (estados de carga).

		AREA del cuenco de deflexión (pulg)				
		35 kN	40 kN	45 kN	50 kN	55 kN
TRAMO 1	Carril Izquierdo	30.33	30.16	30.04	29.94	29.85
	Carril derecho	27.70	27.41	27.20	27.04	26.92
TRAMO 2	Carril Izquierdo	29.85	29.70	29.59	29.51	29.44
	Carril derecho	29.66	29.39	29.19	29.03	28.91

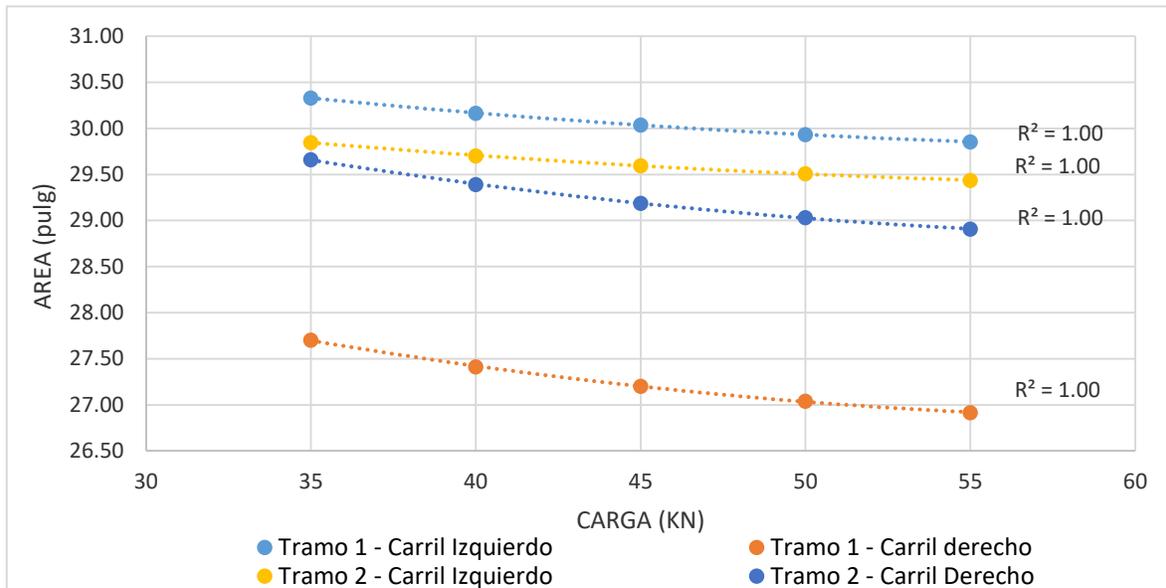


Figura 4.7. AREA del cuenco de deflexión (estados de carga)

De los resultados presentados tanto en la Tabla 4.3 y de la Figura 4.7 se puede indicar lo siguiente:

- La línea de tendencia que siguen estos valores se ajusta a una ecuación polinómica de grado 2 con un valor de R^2 igual a 1.00 definiendo perfectamente el comportamiento del parámetro AREA, además, esta tendencia se mantiene independientemente de la condición del PCI del pavimento de los dos tramos analizados.
- La relación existente entre la carga aplicada durante el ensayo y el AREA del cuenco de deflexión, es inversamente proporcional, es decir, que al aumentar la carga disminuye el AREA del cuenco.
- Si se observa la curva correspondiente a los valores de AREA del carril derecho del Tramo 1 esta se encuentra más distante de las otras tres curvas, esto nos da un punto de comparación para identificar la sensibilidad de los parámetros estructurales de acuerdo al AREA del cuenco de deflexión, en promedio la diferencia entre los valores



de AREA para cada carga aplicada son del 10.31%, 8.68% y 7.27% para el carril izquierdo del Tramo 1 y los carriles izquierdo y derecho del Tramo 2 respectivamente.

4.3 Análisis de parámetros obtenidos mediante retrocálculo (estados de carga)

4.3.1 Módulo de reacción estático k

En la tabla Tabla 4.4 se presentan los valores del módulo de reacción estático obtenido mediante retrocálculo para cada carga nominal de los ensayos de deflexión realizados.

Tabla 4.4. Módulo de reacción estático k (pci) (estados de carga)

		Módulo de reacción estático k (pci)				
		35 kN	40 kN	45 kN	50 kN	55 kN
TRAMO 1	Carril Izquierdo	67.57	69.80	71.49	72.82	73.89
	Carril Derecho	420.63	427.56	431.82	434.60	436.51
TRAMO 2	Carril Izquierdo	101.10	103.55	105.39	106.84	108.00
	Carril Derecho	161.71	168.35	173.17	176.81	179.66

Como se puede ver en la Tabla 4.4 la relación existente entre la carga aplicada durante el ensayo y el módulo de reacción efectivo estático, es directamente proporcional, es decir, que al aumentar la carga se incrementa el valor del módulo k.

En el análisis del AREA del cuenco deflexión se indicó que los resultados del carril derecho del Tramo 1 se iban a tomar como referencia para comprobar la sensibilidad en la obtención de los parámetros estructurales, se había encontrado una diferencia en promedio en el AREA del 10.31% para el carril izquierdo del Tramo 1, 8.68% en el carril izquierdo del Tramo 2 y 7.27% en el carril derecho del Tramo 2, el parámetro de módulo de reacción estático sufre una variación del 83.5%, 75.60%, 60.05% para el carril izquierdo del Tramo 1 y los carriles izquierdo y derecho del Tramo 2 respectivamente en comparación al valor del carril derecho del Tramo 1, por lo que se puede decir que la relación de porcentajes de variación entre estos dos parámetros es de un factor de 8.35.

La tasa de incremento entre los valores de módulos de reacción k mostrados en la tabla 4.4 disminuye conforme aumenta la carga, partiendo desde un valor en promedio del 2.87% en una variación de carga de 35 kN a 40 kN, mientras que para una variación de carga de 50 kN a 55 kN este valor es de 1.15% por lo que se podría percibir que mientras mayor sea la carga de ensayo en relación a la carga normalizada esta tasa irá disminuyendo.

En la Figura 4.8 se visualizan los valores para cada estado de carga en los Tramos 1 y 2 donde se incluye la línea de tendencia, mismos que están incluidos en la Tabla 4.4.

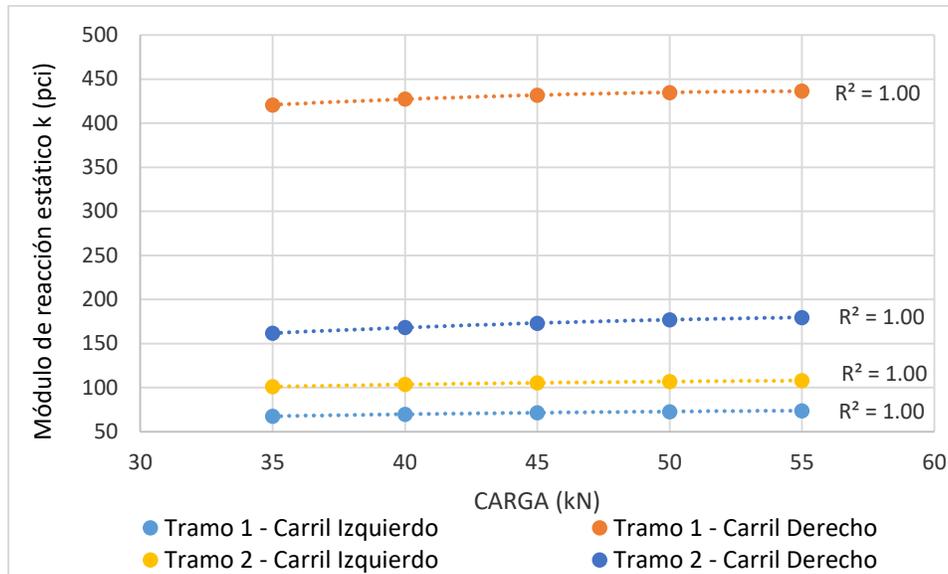


Figura 4.8. Módulo de reacción estático “k” (estados de carga)

Al igual que el AREA del cuenco de deflexión, la línea de tendencia que siguen estos valores se ajusta a una ecuación polinómica de grado 2 con un valor de R^2 igual a 1.00, esta tendencia se mantiene en los dos Tramos por lo que el valor de PCI Excelente y Muy Bueno no tienen influencia en este comportamiento.

Los valores de módulo de reacción efectivo estático provenientes de las deflexiones representativas para los dos carriles de los dos tramos de análisis mediante el proceso de retrocálculo permite incluirlos dentro de los rangos conforme la caracterización de la subrasante y su capacidad de soporte, en la Tabla 4.5 (Montejo, 2002) se muestran los rangos de módulo de reacción k de la subrasante.

Tabla 4.5. Caracterización de la Subrasante. (Montejo, 2002).

Tipo de suelo	Soporte	Rango de Valores de k (pci)
Suelo de grano fino	Bajo	75 - 120
Arenas y mezclas de arenas con gravas	Medio	130 - 170
Arenas y mezclas de arenas con grava libre de finos	Alto	180 - 220
Subrasante tratada con cemento	Muy Alto	250 - 400

Conforme a la Tabla 4.5 y de los resultados obtenidos del módulo de reacción efectivo k, se puede clasificar la subrasante de los carriles de los dos tramos tal como se muestra en la Tabla 4.6. La subrasante del carril derecho tiene mejores características de soporte, tal como se dijo en la sección 4.1 (Análisis de cuencos de deflexión), donde se advertía según la forma del cuenco que este carril tiene mejores características que las del carril izquierdo, ya que el proyecto vial que se desarrolla en zona de corte el material de la subrasante tienen mejores condiciones que un carril implementado en una zona de relleno. La Tabla 4.6 muestra la



caracterización de la subrasante para la carga de 40 kN que corresponde a la carga normalizada (AASHTO, 1993).

Tabla 4.6. Caracterización de la subrasante (carga normalizada 40 kN).

		k obtenido(pci)	Rango de Valores de k (pci)	Soporte
TRAMO 1	Carril Izquierdo	69.80	75 - 120	Bajo
	Carril Derecho	427.56	250 - 400	Muy Alto
TRAMO 2	Carril Izquierdo	103.55	75 - 120	Bajo
	Carril Derecho	168.35	130 - 170	Medio

El valor del módulo de reacción estático k de la subrasante en el carril derecho del Tramo 1 presenta una condición de soporte muy alto incluso supera el rango considerado en la Tabla 4.5 (Montejo, 2002), como ya se indicó anteriormente el valor de AREA del cuenco presentaba los valores más distantes con relación a los otros siendo estos los más bajos por lo que era un indicio de que esta zona cuenta con características de soporte diferentes y se confirmaría que la presencia de las zonas de corte en este carril permiten una mejor estabilidad y soporte.

4.3.2 Módulo de elasticidad del concreto (E_c)

En la Tabla 4.7 constan los valores correspondientes a Módulo de elasticidad producto del proceso de retrocálculo.

Tabla 4.7. Módulo de elasticidad del concreto " E_c " (estados de carga).

		Módulo de elasticidad E_c (psi)				
		35 kN	40 kN	45 kN	50 kN	55 kN
TRAMO 1	Carril Izquierdo	5051440	4773715	4575146	4426184	4310337
	Carril Derecho	9476060	8608628	8028272	7613170	7301734
TRAMO 2	Carril Izquierdo	5878741	5605653	5407965	5258289	5141052
	Carril Derecho	8572667	7835299	7334527	6972626	6699045

De acuerdo a los resultados obtenidos se evidencia que la relación existente entre la carga aplicada durante el ensayo y el módulo de elasticidad E_c , es inversamente proporcional, es decir, que al aumentar la carga disminuye el valor del módulo de elasticidad.

Además, la tasa de decrecimiento entre los módulos de elasticidad " E_c " mostrados en la Tabla 4.7 disminuye conforme aumenta la carga, partiendo desde un valor en promedio del 6.97% en una variación de carga de 35 kN a 40 kN, mientras que para una variación de carga de 50 kN a 55 kN este valor promedio es de 3.22%. Estos valores de tasa de decrecimiento al compararlos con los la tasa crecimiento del módulo de reacción estático " k " son superiores, lo que implica que este parámetro tiene una mayor variabilidad según la carga que se le aplique.

En la Figura 4.9 se grafican estos valores para cada estado de carga en los tramos 1 y 2 donde se ha incluido la línea de tendencia.

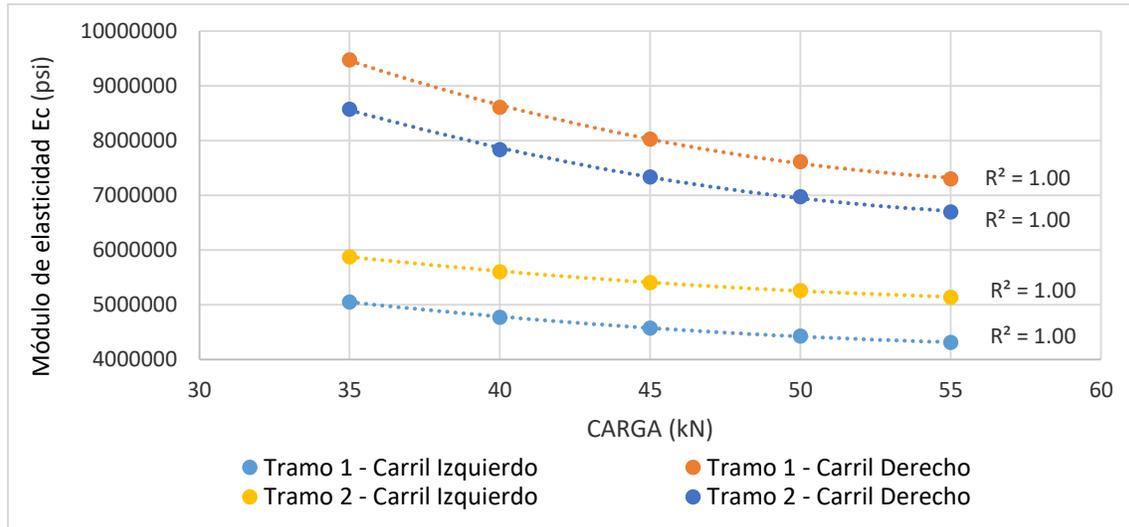


Figura 4.9. Módulo de elasticidad del concreto “Ec” (estados de carga).

Nuevamente, al igual que los demás parámetros calculados anteriormente los valores siguen la misma tendencia de una ecuación polinómica de grado 2 donde el valor de R^2 es igual a 1.00, lo que quiere decir que su tendencia está claramente definida por esta ecuación, también es importante mencionar que el valor de PCI que tienen los Tramos analizados no ejercen influencia en la tendencia ya que todos los valores siguen el mismo comportamiento.

De acuerdo al rango de valores de módulo de elasticidad para concreto propuestos por la Centro de investigaciones de Pavimentos de la Universidad de California presentados en la Tabla 2.2 (Módulos de elasticidad de materiales), tomando como valor típico $E_c = 3'625,940$ psi, el valor obtenido para todos los carriles tomando como valor referencial el correspondiente a la carga normalizada de 40 kN (AASHTO, 1993) se encuentran por encima de este valor por lo que se puede clasificarlos valores buenos, muy buenos y excelentes. En la Tabla 4.8 se muestra el resumen de la caracterización de los módulos de elasticidad obtenidos para la carga de referencia.

Tabla 4.8. Caracterización del módulo de elasticidad “Ec” (carga normalizada 40 kN).

		Ec obtenido(psi)	% superior a valor típico	Valoración de Ec
TRAMO 1	Carril Izquierdo	4773715	31.65%	Muy Bueno
	Carril Derecho	8608628	137.42%	Excelente
TRAMO 2	Carril Izquierdo	5605653	54.60%	Muy bueno
	Carril Derecho	7835299	116.09%	Excelente



4.3.3 Módulo de rotura del concreto ($S'c$)

El último parámetro obtenido mediante la metodología de retrocálculo es el módulo de rotura del concreto, como ya se mencionó anteriormente esa propiedad del concreto permite controlar el agrietamiento por fatiga del pavimento originado por las cargas repetitivas de tráfico por lo que valores altos garantizan un desempeño favorable, la Tabla 4.9 constan los valores correspondientes a módulo de rotura calculados.

Tabla 4.9. Módulo de rotura del concreto " $S'c$ " (estados de carga).

		Módulo de rotura $S'c$ (psi)				
		35 kN	40 kN	45 kN	50 kN	55 kN
TRAMO 1	Carril Izquierdo	708.24	696.16	687.52	681.04	676.00
	Carril Derecho	900.71	862.98	837.73	819.67	806.13
TRAMO 2	Carril Izquierdo	744.23	732.35	723.75	717.24	712.14
	Carril Derecho	861.41	829.34	807.55	791.81	779.91

De acuerdo a los datos presentados en la tabla anterior se concluye que la relación existente entre la carga aplicada durante el ensayo y el módulo de rotura $S'c$, es inversamente proporcional, es decir, que al aumentar la carga disminuye el valor del módulo de rotura.

La tasa de decrecimiento entre los módulos de rotura $S'c$ mostrados en la Tabla 4.9 disminuye conforme se incrementa la carga, partiendo desde un valor en promedio del 2.80% en una variación de carga de 35 kN a 40 kN, mientras que para una variación de carga de 50 kN a 55 kN este valor promedio es de 1.15%. Estos valores de tasa de decrecimiento al compararlos con los la tasa decrecimiento del módulo de reacción efectivo " k " son prácticamente similares, adicionalmente, este parámetro tendría una menor variabilidad dependiendo de la carga que se aplique durante el ensayo de deflectometría.

La Figura 4.10 muestra los valores obtenidos de módulo de rotura para cada estado de carga en los tramos 1 y 2 donde se incluye la línea de tendencia para constatar el comportamiento de este parámetro.

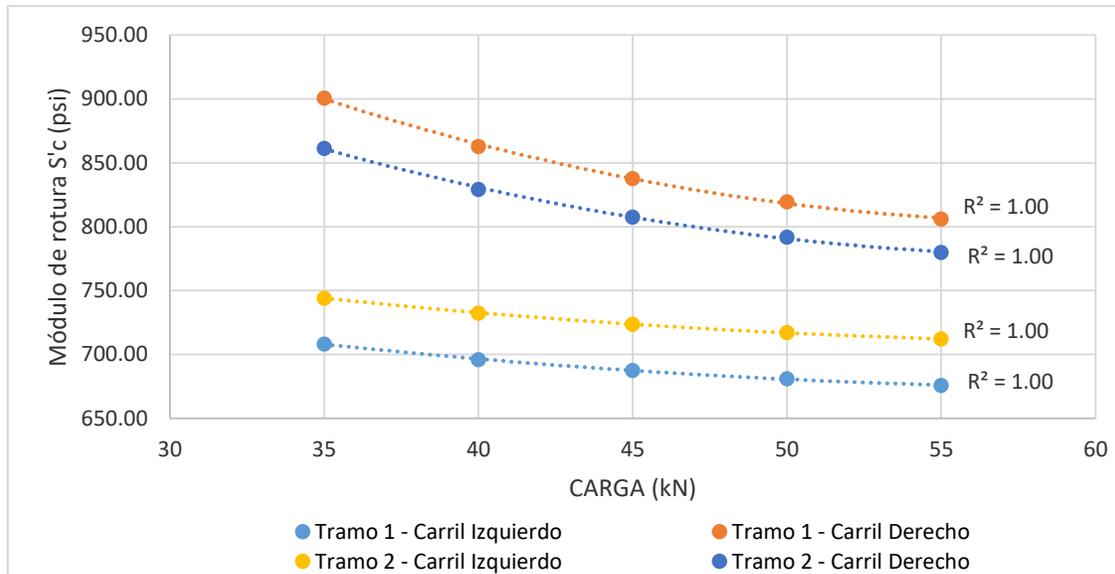


Figura 4.10. Módulo de de rotura del concreto “S’c” (estados de carga)

El parámetro módulo de rotura del concreto $S'c$ tiene una tendencia de una ecuación de segundo grado independiente de la condición de PCI presente en los tramos analizados, el valor de R^2 igual a 1.00 determina que el ajuste es perfecto por lo que queda claramente definido el comportamiento de este parámetro según la carga aplicada durante el ensayo de deflectometría.

Finalmente Según la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 93, se indica que los valores de módulo de rotura del hormigón se encuentran entre 2.8 MPa (400 psi) y 4.8 MPa (700 psi), llegando incluso a valores de 8.2 MPa (1200 psi) en concretos con alta resistencia inicial (AASHTO, 1993). Los valores obtenidos a partir del módulo de elasticidad para la carga normalizada de 40 kN se encuentran por encima del límite superior, salvo el caso del valor para el carril izquierdo del Tramo 1 mismo que se encuentra con un valor muy cercano al límite superior del rango de referencia.

4.4 Análisis de correlación de deflexiones

Tal como se indicó en las gráficas del numeral 3.7.1 (Análisis de correlación de deflexiones), los valores de deflexión una vez que se ha realizado el proceso de normalización han sido comparados con los valores de deflexión para una carga de 40 kN resultado de la regresión lineal proveniente del análisis de estado de carga. A partir de ello se realiza un análisis tanto del coeficiente de correlación así como la pendiente de la ecuación lineal que describe esta relación con el fin de verificar su proximidad a la función identidad es decir una recta que pasa por el origen y con pendiente igual a 1.00, en la Tabla 4.10 se presentan los valores del coeficiente de correlación obtenidos.



Tabla 4.10. Coeficiente de correlación, análisis de correlación de deflexiones.

Geofono	Ubicación (cm)	Coef. Correlación "r"				
		40 kN(35kN)	40 kN(40kN)	40 kN(45kN)	40 kN(50kN)	40 kN(55kN)
D1	0	0.9998	0.9999	0.9999	0.9997	0.9996
D2	20	0.9999	0.9999	0.9999	0.9997	0.9996
D3	30	0.9999	1.0000	0.9999	0.9998	0.9996
D4	60	0.9999	1.0000	0.9999	0.9997	0.9996
D5	90	0.9997	0.9999	0.9998	0.9996	0.9994
D6	120	0.9998	0.9999	0.9999	0.9997	0.9995
D7	150	0.9992	0.9998	0.9990	0.9994	0.9992
D8	180	0.9995	0.9998	0.9997	0.9992	0.9989
D9	-30	0.9999	1.0000	0.9999	0.9998	0.9996

Los valores obtenidos de coeficiente de correlación en todos los casos se encuentran próximos al valor de 1.00 por lo que estos resultados en todos los casos tienen una buena relación lineal entre ellos. A continuación en la Tabla 4.11 se muestra los valores de la pendiente de la función que describe el comportamiento de esta correlación.

Tabla 4.11. Pendiente de la función correlación de deflexiones.

Geofono	Ubicación (cm)	Pendiente "m"				
		40 kN(35kN)	40 kN(40kN)	40 kN(45kN)	40 kN(50kN)	40 kN(55kN)
D1	0	1.007	1.003	0.999	1.000	1.000
D2	20	1.005	1.002	0.998	0.999	0.999
D3	30	1.005	1.001	0.997	0.996	0.996
D4	60	1.005	1.001	0.996	0.996	0.995
D5	90	1.007	1.004	1.001	1.001	1.000
D6	120	1.000	1.002	0.998	0.997	0.996
D7	150	1.011	1.004	1.000	0.996	0.996
D8	180	1.005	1.001	1.000	1.003	1.005
D9	-30	1.003	1.000	0.998	0.998	0.997

La variación de la pendiente de la función que describe la correlación de los valores de deflexión al compararla con la pendiente de la función identidad 1.00, son valores que se ubican dentro del rango de -0.5% al 1.10%, valores que se pueden asumirlos como bajos.

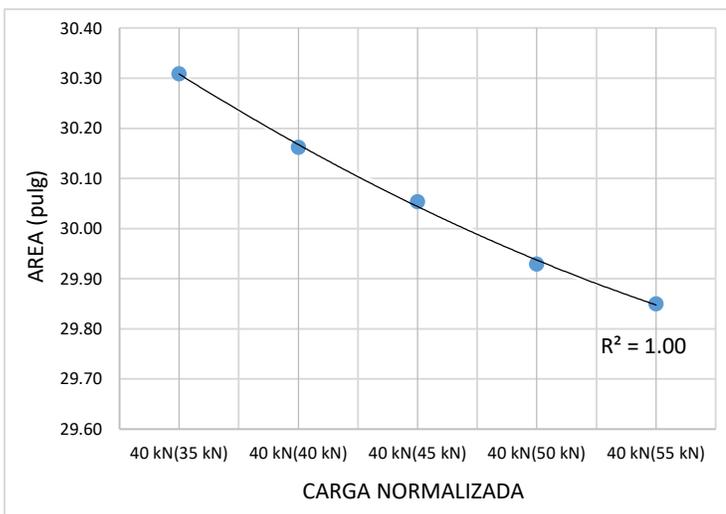
Como se puede ver en la Tabla 4.11, los valores de la pendiente son valores muy cercanos a la unidad y en algunos casos igual, sin embargo, es importante mencionar que al no tener valores iguales en todos los casos, es un indicador que la aplicación de la ecuación de normalización de la AASHTO para diferentes cargas producen ligeras variaciones en los valores de deflexión por lo que más adelante se analizará su influencia en los posteriores cálculos como lo es la definición del valor del AREA del cuenco de deflexión ya que de este depende la obtención de los parámetros de diseño de pavimentos rígidos.



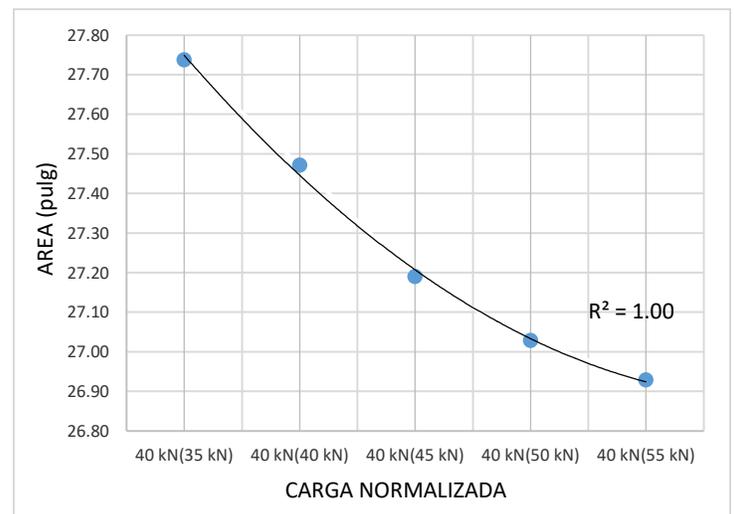
4.5 Análisis de parámetros normalizados obtenidos mediante retrocálculo

Dependiendo la carga nominal aplicada durante el ensayo de deflectometría, la tendencia de los parámetros normalizados obtenidos es interpretada mediante un análisis de regresión el cual busca determinar la relación existente entre la carga nominal normalizada aplicada y el valor del parámetro.

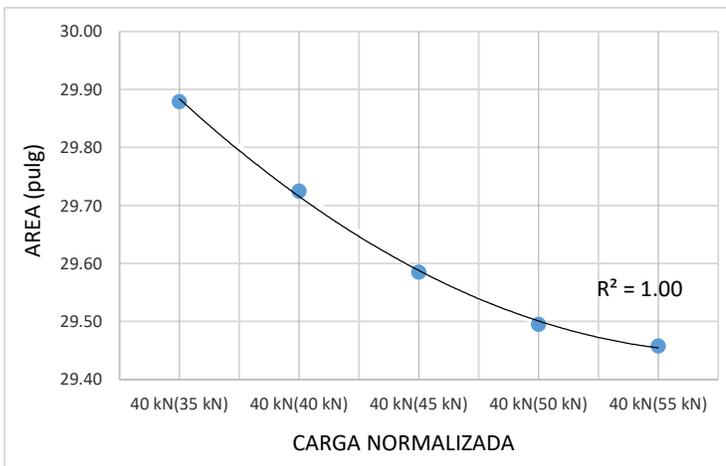
En la Figura 4.11, se puede observar la tendencia del valor del AREA del cuenco de deflexión en función de la carga real de ensayo cuando es normalizada, en este caso, la tendencia se ajusta a una ecuación de segundo grado donde el coeficiente de determinación es 1.00, lo que quiere decir que existe una excelente relación entre estas variables.



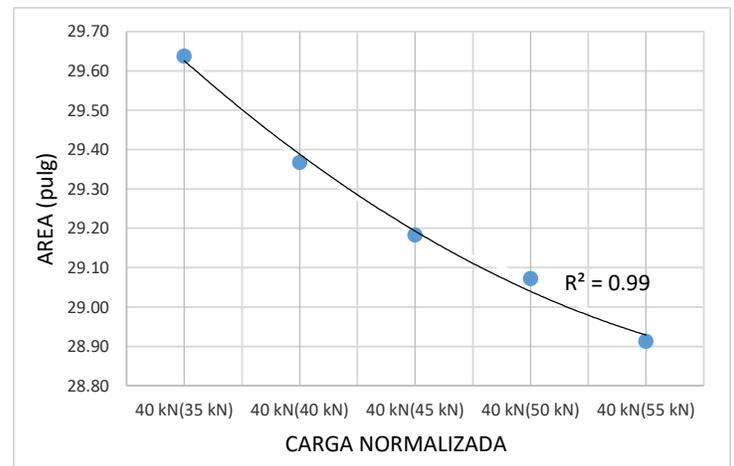
Carril izquierdo – Tramo 1



Carril derecho – Tramo 1



Carril izquierdo – Tramo 2



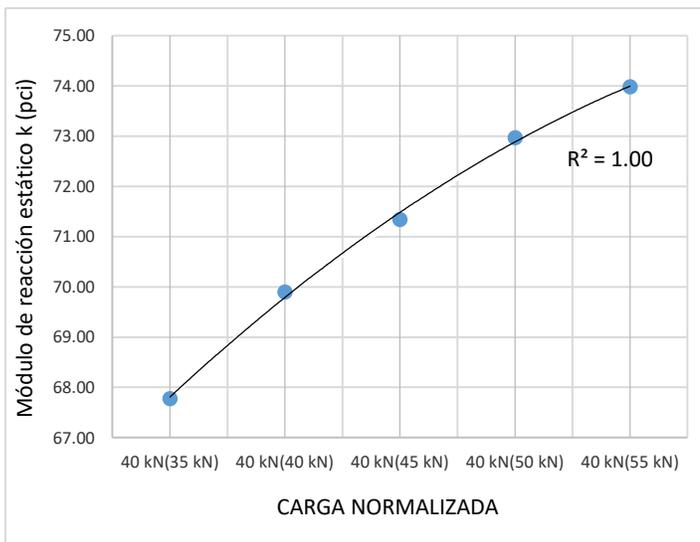
Carril derecho – Tramo 2

Figura 4.11. AREA del cuenco vs carga nominal normalizada

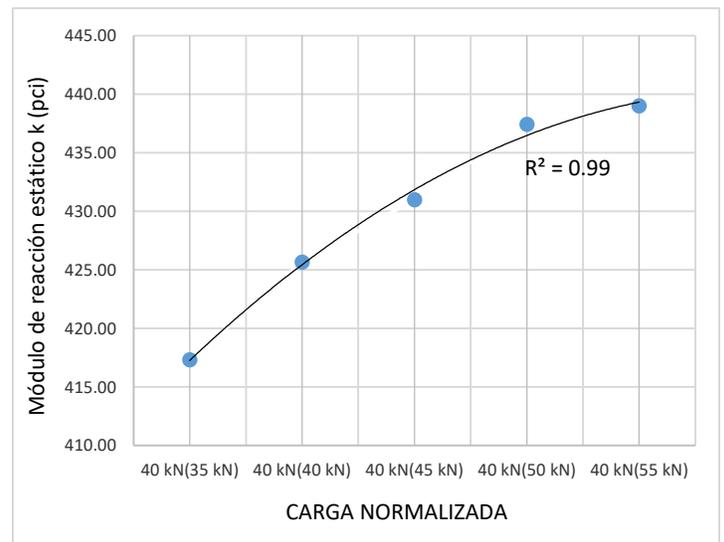


Si la carga aplicada durante el ensayo dista más de la carga normalizada de 40 kN, en este caso el valor del AREA del cuenco de deflexión disminuye; a partir de este valor de AREA se obtienen los parámetros de diseño, por lo que es importante conocer la influencia de la variación de este valor en la obtención de los demás parámetros.

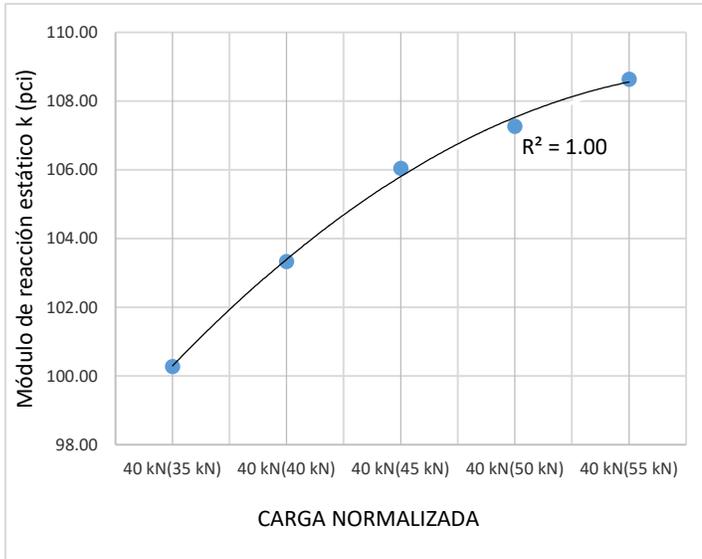
En la Figura 4.12 (Módulo de reacción estático “k” vs carga nominal normalizada), Figura 4.13 (Módulo de elasticidad “Ec” vs carga nominal normalizada) y Figura 4.14 (Módulo de rotura “S’c” vs carga nominal normalizada) se muestra la tendencia de los parámetros de diseño obtenidos para los carriles izquierdo y derecho de los tramos considerados mediante el proceso de retrocálculo en base a la metodología AASHTO 93, en los que se ajusta a una curva de segundo grado y cuyos coeficientes de determinación tienen un valor de 1.00 o próximo a este, lo que indican un ajuste excelente. La tendencia del módulo de reacción estático de la subrasante es creciente según se incrementa la carga aplicada durante el ensayo y esta es normalizada, por otra parte, los módulos de elasticidad y rotura del concreto mantienen una tendencia decreciente según se incrementa la carga aplicada durante el ensayo.



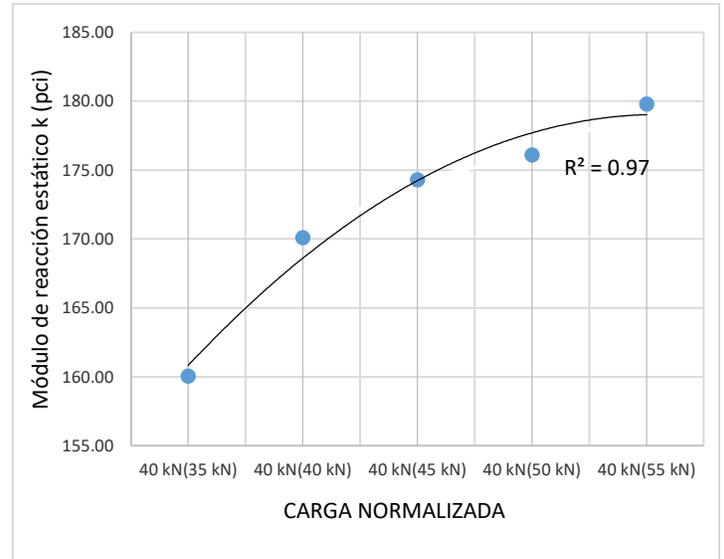
Carril izquierdo – Tramo 1



Carril derecho – Tramo 1

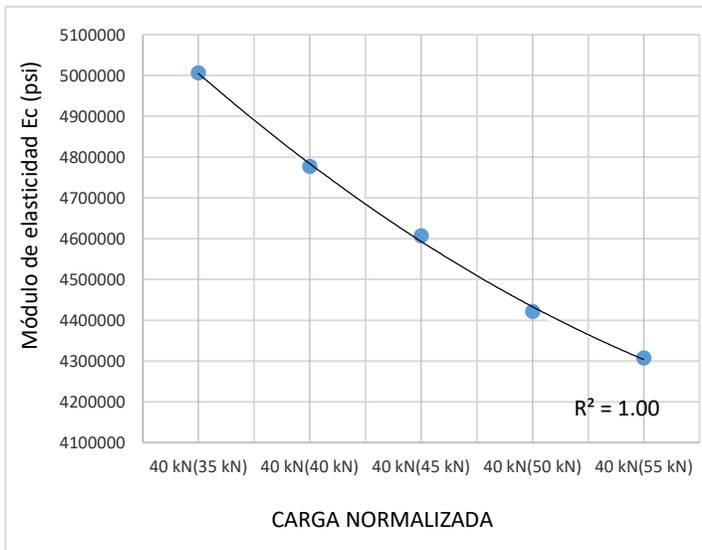


Carril izquierdo – Tramo 2

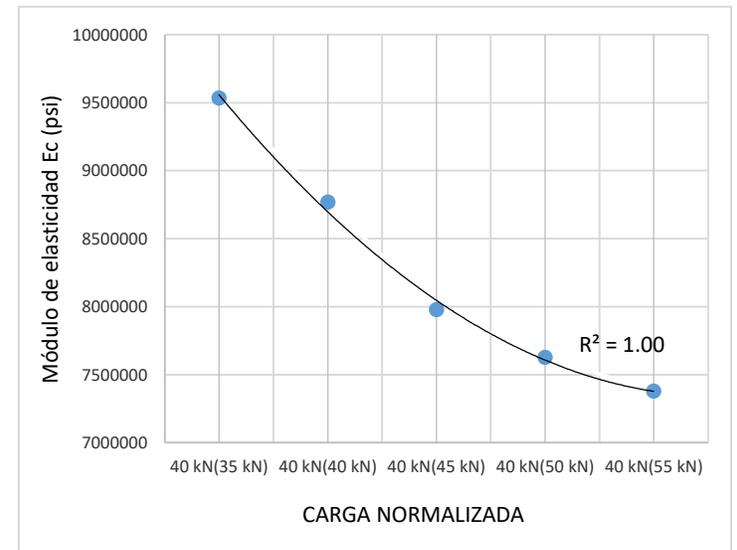


Carril derecho – Tramo 2

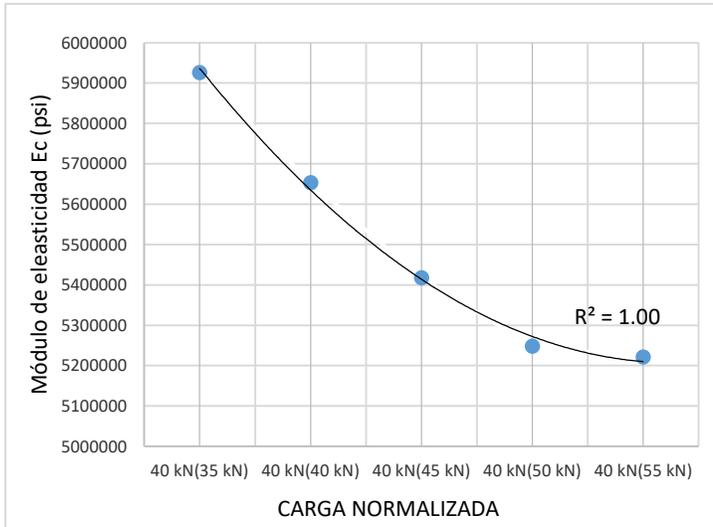
Figura 4.12. Módulo de reacción estático “k” vs carga nominal normalizada



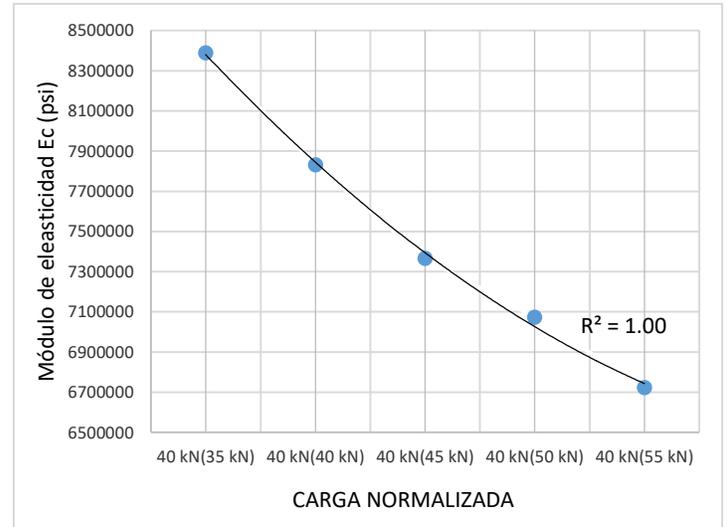
Carril izquierdo – Tramo 1



Carril derecho – Tramo 1

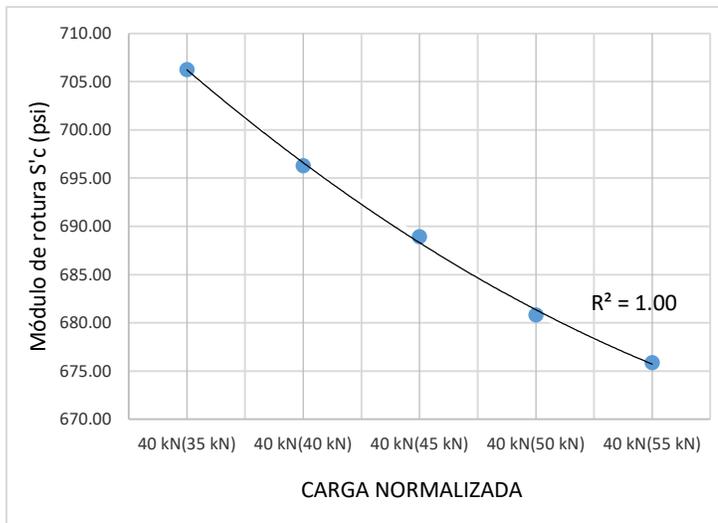


Carril izquierdo – Tramo 2

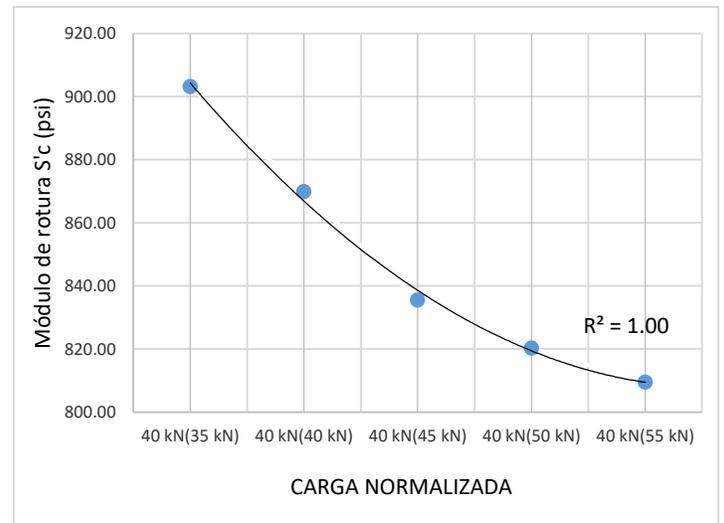


Carril derecho – Tramo 2

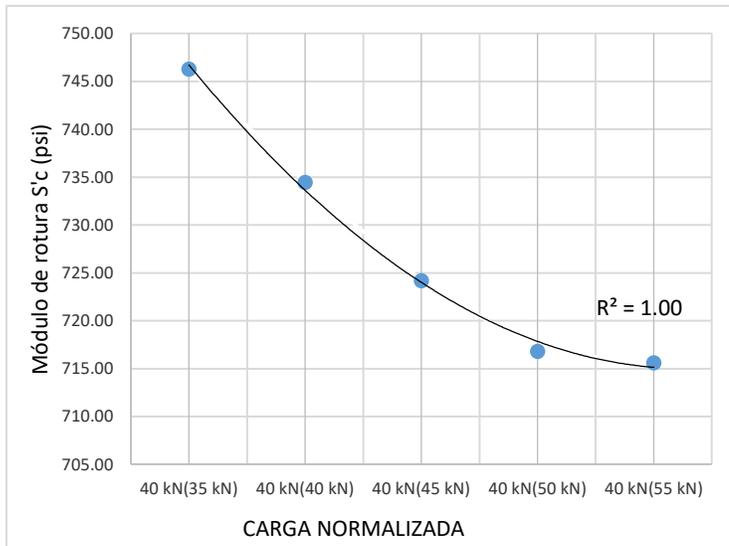
Figura 4.13. Módulo de elasticidad “ E_c ” vs carga nominal normalizada



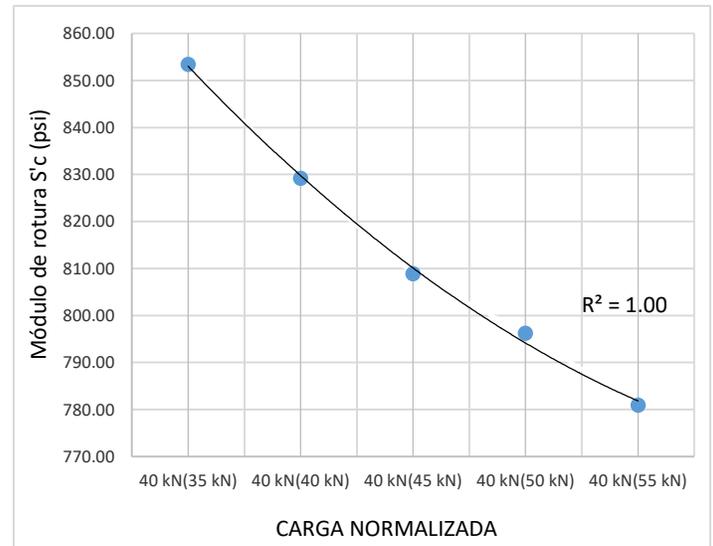
Carril izquierdo – Tramo 1



Carril derecho – Tramo 1



Carril izquierdo – Tramo 2



Carril derecho – Tramo 2

Figura 4.14. Módulo de rotura “S’c” vs carga nominal normalizada

La influencia de la carga aplicada durante el ensayo tiene incidencia en los valores de los parámetros obtenidos mediante retrocálculo, la Tabla 4.12 (Carril izquierdo – Tramo 1), Tabla 4.13 (Carril derecho – Tramo 1), Tabla 4.14 (Carril izquierdo – Tramo 2) y Tabla 4.15 (Carril derecho – Tramo 2) muestran los porcentajes de variación de los parámetros obtenidos con relación a los obtenidos aplicando la carga normalizada de 40 kN.

Tabla 4.12. Variabilidad de parámetros respecto a carga normalizada de 40 kN, Carril izquierdo – Tramo 1

TRAMO 1 - CARRIL IZQUIERDO (AASHTO)					
	40 kN(35 kN)	40 kN(40 kN)	40 kN(45 kN)	40 kN(50 kN)	40 kN(55 kN)
AREA (pulg)	-0.49%	-	0.36%	0.77%	1.04%
Módulo de reacción k estático (pci)	3.03%	-	-2.06%	-4.39%	-5.84%
Módulo Ec (psi)	-4.80%	-	3.55%	7.44%	9.82%
Módulo de rotura S'c (psi)	-1.43%	-	1.06%	2.22%	2.93%

Tabla 4.13. Variabilidad de parámetros respecto a carga normalizada de 40 kN, Carril derecho – Tramo 1

TRAMO 1 - CARRIL DERECHO (AASHTO)					
	40 kN(35 kN)	40 kN(40 kN)	40 kN(45 kN)	40 kN(50 kN)	40 kN(55 kN)
AREA (pulg)	-0.97%	-	1.03%	1.61%	1.98%
Módulo de reacción k estático (pci)	1.96%	-	-1.26%	-2.76%	-3.14%
Módulo Ec (psi)	-8.73%	-	9.00%	13.01%	15.84%
Módulo de rotura S'c (psi)	-3.83%	-	3.95%	5.71%	6.95%



Tabla 4.14. Variabilidad de parámetros respecto a carga normalizada de 40 kN, Carril izquierdo – Tramo 2

TRAMO 2 - CARRIL IZQUIERDO (AASHTO)					
	40 kN(35 kN)	40 kN(40 kN)	40 kN(45 kN)	40 kN(50 kN)	40 kN(55 kN)
AREA (pulg)	-0.52%	-	0.47%	0.77%	0.90%
Módulo de reacción k estático (pci)	2.95%	-	-2.62%	-3.81%	-5.14%
Módulo Ec (psi)	-4.81%	-	4.18%	7.18%	7.65%
Módulo de rotura S'c (psi)	-1.61%	-	1.40%	2.40%	2.56%

Tabla 4.15. Variabilidad de parámetros respecto a carga normalizada de 40 kN, Carril derecho – Tramo 2

TRAMO 2 - CARRIL DERECHO (AASHTO)					
	40 kN(35 kN)	40 kN(40 kN)	40 kN(45 kN)	40 kN(50 kN)	40 kN(55 kN)
AREA (pulg)	-0.92%	-	0.63%	1.00%	1.54%
Módulo de reacción k estático (pci)	5.90%	-	-2.47%	-3.52%	-5.70%
Módulo Ec (psi)	-7.11%	-	5.96%	9.68%	14.16%
Módulo de rotura S'c (psi)	-2.92%	-	2.45%	3.98%	5.82%

De las tablas mencionadas se puede resaltar que en los carriles de los tramos analizados se observa que el valor del AREA del cuenco de deflexión tiene una variación máxima de 1.98% cuando la carga nominal ejercida durante el ensayo es de 55 kN, 15 kN superior a la carga normalizada. Por otra parte, para una carga inferior en 5 kN de la carga normalizada su variación máxima es de 0.97%, sin embargo, a pesar de ser variaciones relativamente pequeñas, los valores de los parámetros obtenidos sufren variaciones considerables con relación a estas, en la Figura 4.15 se aprecia el comportamiento de la variación del módulo de elasticidad en función del porcentaje de variación del AREA del cuenco de deflexión.

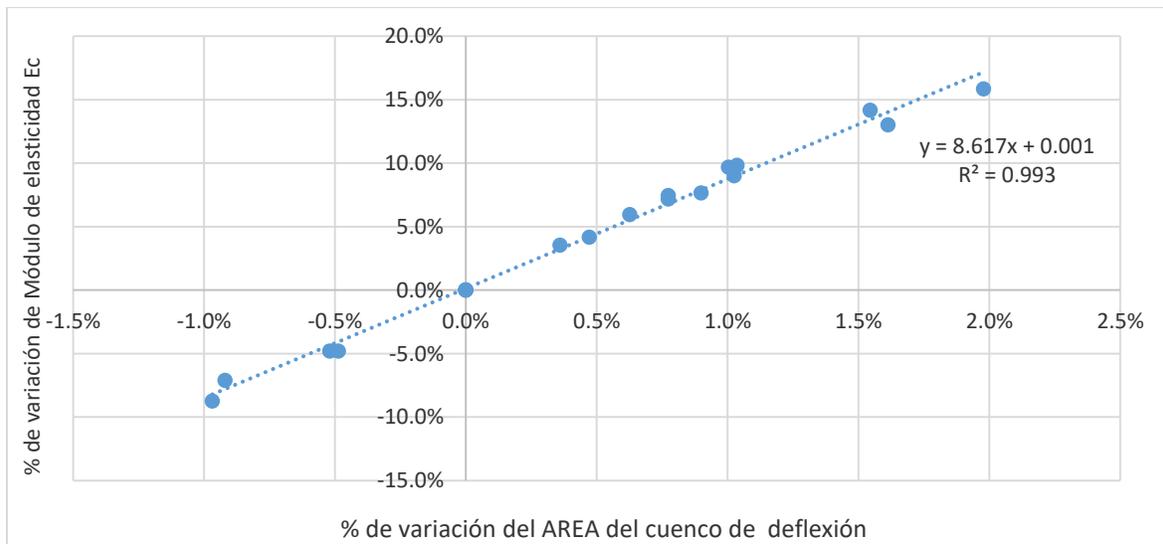


Figura 4.15. Variación del AREA vs. Variación módulo de elasticidad “Ec”.



La tendencia de los valores de la relación entre el porcentaje de variación del AREA del cuenco de deflexión y el porcentaje de variación del módulo elástico del concreto se la puede describir como lineal, en el que su coeficiente de determinación obtenido en este caso es 0.99, siendo este un ajuste excelente.

La calidad de la subrasante Baja o Muy Alta (Montejo, 2002) donde se han ejecutado los ensayos no han afectado la tendencia que sigue la función de variación de módulo de elasticidad del concreto con respecto a la variación del AREA del cuenco de deflexión.

Cuando se aplica una carga diferente a la normalizada durante un ensayo y esta a su vez es llevada a términos de carga normalizada según la metodología AASHTO, el valor del módulo de elasticidad E_c difiere en un porcentaje creciente con relación a la variación del AREA del cuenco de deflexión, en este caso se ha visto que la relación entre el porcentaje de variación del módulo elástico del concreto con el porcentaje de variación del AREA del cuenco es de 8.62.

Otro aspecto que tiene gran notoriedad en las tablas de variabilidad de parámetros respecto a carga normalizada, es que el módulo de elasticidad de concreto es el que más variabilidad tiene ante ligeros cambios en el AREA del cuenco de deflexión en comparación a los demás parámetros, además en los carriles que poseen mejores características de la subrasante este porcentaje tiene mayor incidencia incluso supera el 50% del valor de esta variación entre los carriles del mismo tramo.

A continuación la Figura 4.16, muestra la tendencia definida por los valores de la variación del módulo de rotura del concreto con relación a la variación del valor del AREA que ocurre en el cuenco de deflexión.

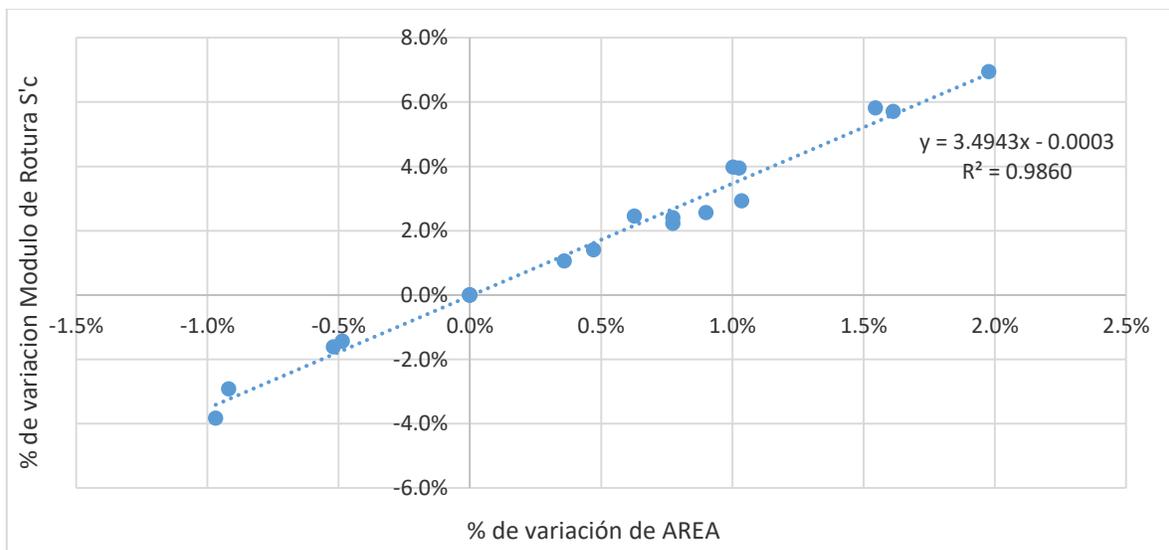


Figura 4.16. Variación del AREA vs. Variación módulo de rotura “S’c”



La tendencia que existe entre la variación del AREA del cuenco de deflexión y la variación que se produce en el valor del módulo de rotura del concreto es de carácter lineal, esta relación tienen un ajuste catalogado como excelente ya que su valor es del 0.99.

Al igual que el módulo de elasticidad del concreto, como se puede ver en la Figura 4.16, este parámetro no sufre ninguna variación en su tendencia si la condición de la subrasante es de calidad Bajo o Muy alta, además en la formulación para la obtención de este parámetro se lo realiza en forma directa donde el módulo de elasticidad es únicamente afectado por un coeficiente y la adición de una constante (ver Ecuación 2.22), por lo que explica su similar comportamiento con el módulo de elasticidad..

De igual manera, cuando se aplica una carga diferente a 40 kN durante un ensayo y esta es normalizada según la metodología AASHTO, el valor del módulo de rotura difiere en un porcentaje creciente con relación a la variación del AREA del cuenco de deflexión, en este caso la relación entre el porcentaje de variación del módulo de rotura del concreto con el porcentaje de variación del AREA del cuenco de deflexión es de 3.49.

Finalmente, si comparamos los valores de variación de módulo de rotura de los carriles de cada tramo analizado, la relación que existe entre el valor de variación de un carril con una subrasante en mejores condiciones implica que supera el doble de esta variación de la subrasante con condiciones de soporte bajas.

Concluyendo con el Análisis de parámetros normalizados obtenidos mediante retrocálculo, la Figura 4.17 muestra los valores de variación del módulo de reacción estático k de la subrasante con relación a la variación del cuenco de deflexión.

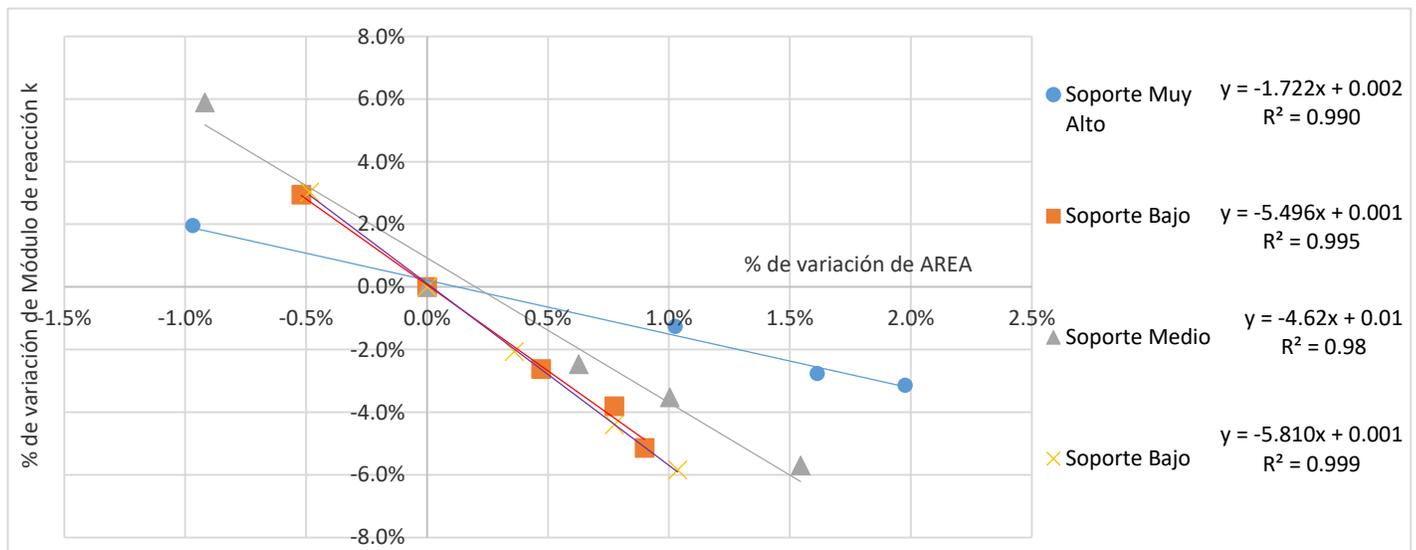


Figura 4.17. Variación del AREA vs. Variación módulo de reacción “k”



Para cada caracterización de la subrasante se ha definido un ajuste a una ecuación lineal en donde todos los valores de R^2 están muy cercanos a la unidad, por lo que su ajuste será excelente.

Como se puede ver en la Figura 4.17 la calidad de soporte de la subrasante tiene incidencia en la tendencia de los valores de la relación existente entre la variación del módulo de reacción de la subrasante con respecto a la variación del AREA del cuenco de deflexión aspecto que no sucedió en el análisis de variación del módulo de elasticidad y rotura del concreto.

Cuando se aplica una carga diferente a 40 kN y esta a su vez es llevada a términos de carga normalizada según la metodología AASHTO, el valor módulo de reacción de la subrasante difiere en un porcentaje decreciente con relación a la variación del AREA del cuenco de deflexión, en este caso, la relación entre el porcentaje de variación del módulo de reacción de la subrasante y el porcentaje de variación del AREA del cuenco de deflexión es 1.73 en el caso de suelos de capacidad de soporte Muy Alta, mientras que para suelos de capacidad de soporte media en promedio esta relación es del 4.38, y para suelos de capacidad baja de soporte la relación es del 5.64, lo que evidencia que las subrasantes con mejor calidad de soporte se comportan de manera más uniforme y su valor de módulo de reacción k será más cercano al obtenido con la carga normalizada de 40 kN.

Considerando el valor de módulo de reacción que se obtuvo para el carril izquierdo del Tramo 1 (69.80 psi), definido como subrasante de capacidad de soporte baja y el valor del módulo de reacción del carril derecho del Tramo 1 (427.56 psi) definido como subrasante de capacidad de soporte Muy alta, se concluiría que las pendientes de las funciones lineales de las tendencias entre la variación del módulo de reacción k con respecto a la variación del AREA del cuenco de deflexión oscilan en el rango de -58° a -80° .

4.6 Análisis de correlación de los parámetros de diseño

Como ya se indicó anteriormente existe una variación en los valores de los parámetros que se obtienen según la carga aplicada durante el ensayo de deflectometría, el análisis de correlación permite en este caso de corroborar este comportamiento, para ello se ha realizado retrocálculo en todos los puntos donde se ejecutaron los ensayos para obtener los parámetros de diseño, para luego mediante los valores de coeficiente de correlación y la pendiente del ajuste de esta correlación explicar esta variación.

La Figura 4.18 muestra la correlación existente entre los valores de AREA obtenidos mediante retrocálculo previamente normalizando la carga aplicada y el valor de AREA obtenido del ajuste lineal del ensayo de estados de carga.

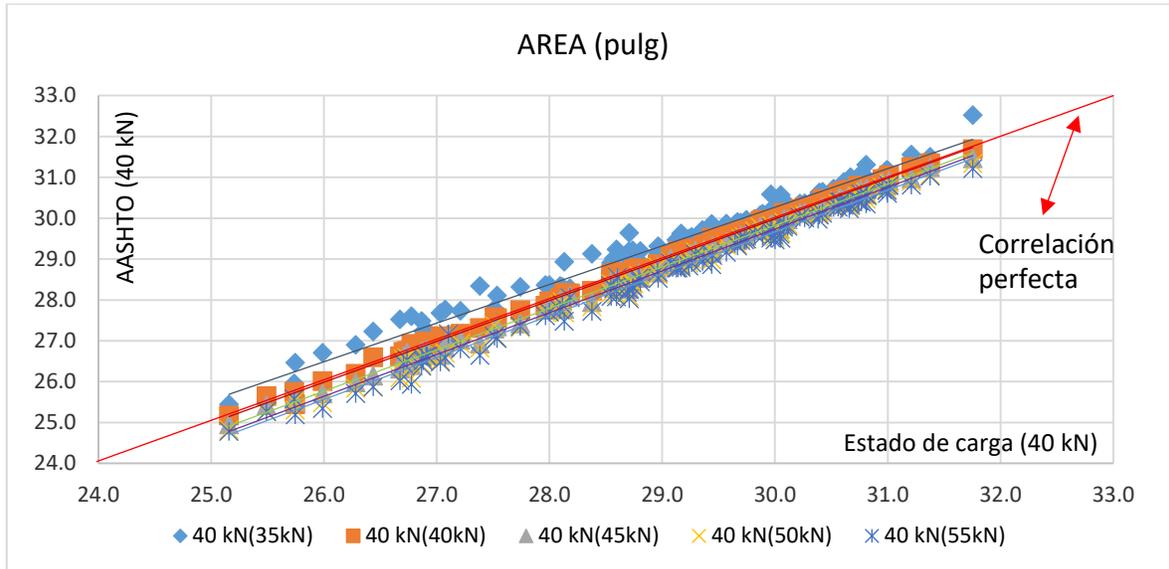


Figura 4.18. Correlación AREA de cuenco de deflexión.

Se observa, en primera instancia que el coeficiente de correlación obtenido como lo indica la Tabla 4.16 muestra un grado de correlación excelente, es decir, existe su relación lineal entre las dos variables en todos los casos. Es importante hacer notar que aunque los valores de este coeficiente están por encima de 0.99, la mejor correlación existe cuando se toman los resultados del ensayo con la carga normalizada, cuando la carga aplicada es superior a la normalizada, la tasa de variación del coeficiente es menor que cuando se la compara con una carga menor a la normalizada.

Tabla 4.16. Coeficiente de correlación, AREA del cuenco de deflexión.

Coef. Correlación "r"				
40 kN(35kN)	40 kN(40kN)	40 kN(45kN)	40 kN(50kN)	40 kN(55kN)
0.9908	0.9990	0.9984	0.9970	0.9959

La pendiente del ajuste lineal de la correlación (Tabla 4.17) tiene su mejor ajuste a la pendiente de la función identidad (es decir una recta que pasa por el origen y cuya pendiente sea igual a 1.00) cuando se consideran los resultados de aplicar la carga normalizada durante el ensayo, para una carga menor a la normalizada en este caso con una diferencia de 5 kN, esta pendiente tiene una variación de 5.52%, mientras que si la carga es superior su variación de pendiente está en el orden de 1.37%, 2.36%, 2.39% para las cargas de 45 kN, 50 kN, 55 kN respectivamente, lo que quiere decir que los resultados se verían más afectados si se aplican cargas menores a la normalizada.

Tabla 4.17. Pendiente del ajuste de correlación, AREA del cuenco de deflexión.

Pendiente "m"				
40 kN(35kN)	40 kN(40kN)	40 kN(45kN)	40 kN(50kN)	40 kN(55kN)
0.9448	0.9985	1.0137	1.0236	1.0239

La Figura 4.19 muestra la correlación de los valores obtenidos del coeficiente de reacción estático de la subrasante obtenidos mediante retrocálculo previamente normalizando la carga aplicada y el valor de k obtenido del ajuste lineal del ensayo de estados de carga.

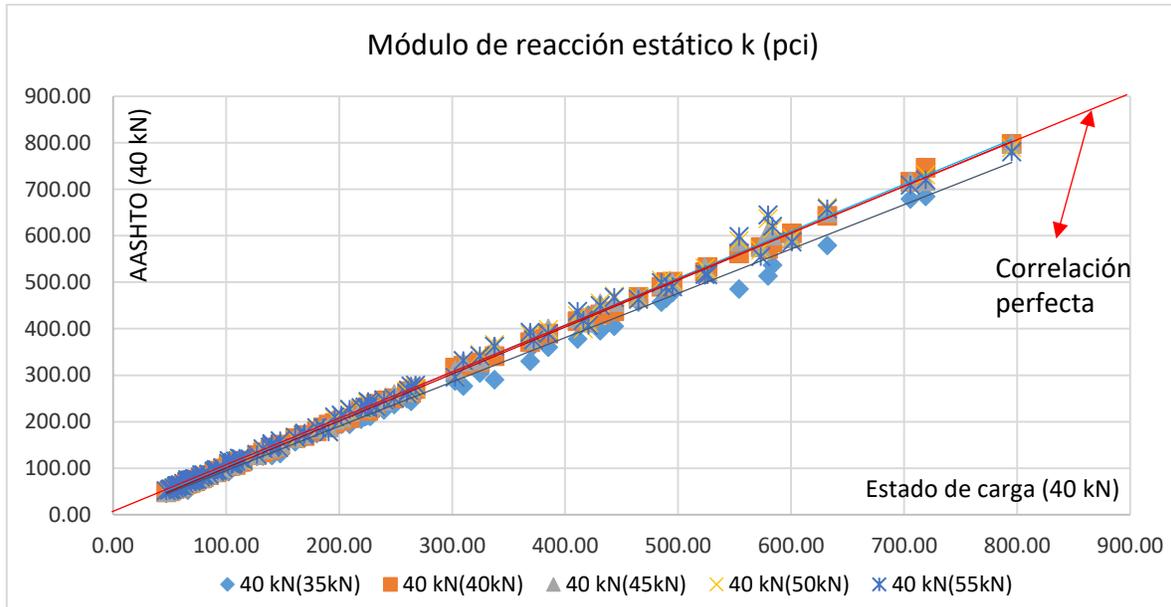


Figura 4.19. Correlación Módulo de reacción estático k

Al igual que el valor del coeficiente de correlación del AREA del cuenco de deflexión, también en este caso este valor indica un grado de correlación excelente entre las variables en comparación. La Tabla 4.18 muestra los valores obtenidos, donde el mejor ajuste se obtiene para la carga aplicada de 40 kN durante el ensayo, para cargas superiores la diferencia es mínima y esta variación es más notoria cuando la carga de ejecución de ensayo es menor.

Tabla 4.18. Coeficiente de correlación, módulo de reacción estático k.

Coef. Correlación "r"				
40 kN(35kN)	40 kN(40kN)	40 kN(45kN)	40 kN(50kN)	40 kN(55kN)
0.9979	0.9998	0.9995	0.9989	0.9983

La pendiente del ajuste lineal obtenido de la correlación de los valores del coeficiente de reacción de la subrasante presentado en la Tabla 4.19 a pesar de estar de ser valores cercanos a la unidad se evidencia que la aplicación de cargas menores a la normalizada durante el ensayo produce una variación del 4.67% lo que implica obtener valores de módulo más bajos



al normalizado, mientras que para cargas superiores esta variación en pendiente es menor a 1.8%.

Tabla 4.19. Pendiente del ajuste de correlación, módulo de reacción estático k.

Pendiente "m"				
40 kN(35kN)	40 kN(40kN)	40 kN(45kN)	40 kN(50kN)	40 kN(55kN)
0.9533	1.0104	1.0149	1.018	1.0092

El módulo de elasticidad del concreto es sin duda el parámetro que se ve más afectado cuando se varía la carga durante el ensayo, así lo demuestra la Figura 4.20 donde existe una diferencia más marcada en las líneas de tendencia de la correlación existente.

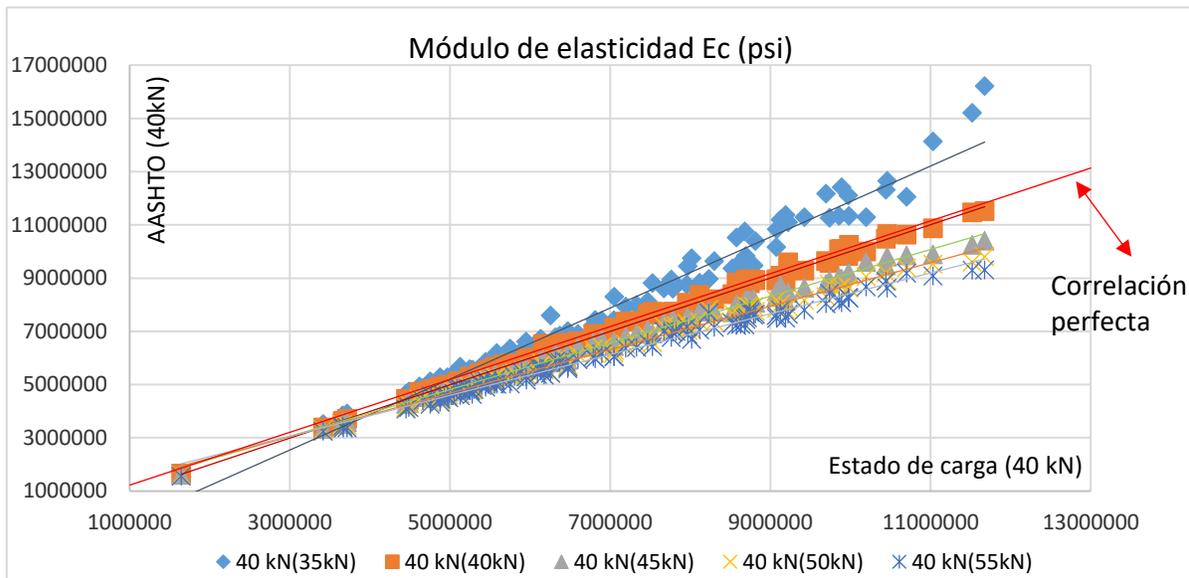


Figura 4.20. Correlación Módulo de elasticidad estático Ec

Los coeficientes de correlación presentados en la Tabla 4.20 muestran un grado de correlación excelente entre los valores de módulo de elasticidad obtenidos mediante retrocálculo previamente normalizando la carga aplicada y el valor de Ec obtenido del ajuste lineal del ensayo de estados de carga, sin embargo, nuevamente el valor de “r” obtenido con la carga inferior a la carga normalizada presenta una diferencia mayor en comparación a las cargas superiores en relación a la carga de 40 kN.

Tabla 4.20. Coeficiente de correlación, módulo de elasticidad Ec

Coef. Correlación "r"				
40 kN(35kN)	40 kN(40kN)	40 kN(45kN)	40 kN(50kN)	40 kN(55kN)
0.9870	0.9976	0.9978	0.9959	0.9940

La pendiente del ajuste lineal muestra claramente la variación de los valores de módulo de elasticidad según la carga aplicada durante el ensayo como se ve en la Tabla 4.21, para el

caso de la carga de 35 kN la pendiente tienen una variación del 33.34% en relación a la normalizada, este valor indica que existirá una variación considerable en la obtención de este parámetro, mientras que para las cargas superiores, si bien no son superiores a la obtenida con 35 kN, incluso para su carga más distante 55 kN con una diferencia del 23.48% son valores que muestran mayor sensibilidad al cambio de carga durante el ensayo.

Tabla 4.21. Pendiente del ajuste de correlación, módulo de elasticidad E_c .

Pendiente "m"				
40 kN(35kN)	40 kN(40kN)	40 kN(45kN)	40 kN(50kN)	40 kN(55kN)
1.3334	1.002	0.877	0.815	0.7652

Finalmente, y como se observó anteriormente, el módulo de rotura tienen una relación directa con el módulo de elasticidad, por lo que el comportamiento tanto del coeficiente de correlación (Tabla 4.22) como de las pendientes del ajuste lineal (Tabla 4.23) coinciden con las de estas, por lo que este parámetro tienen el mismo grado de afectación, demostrando su sensibilidad en su valor a la carga aplicada durante un ensayo de deflectometría.

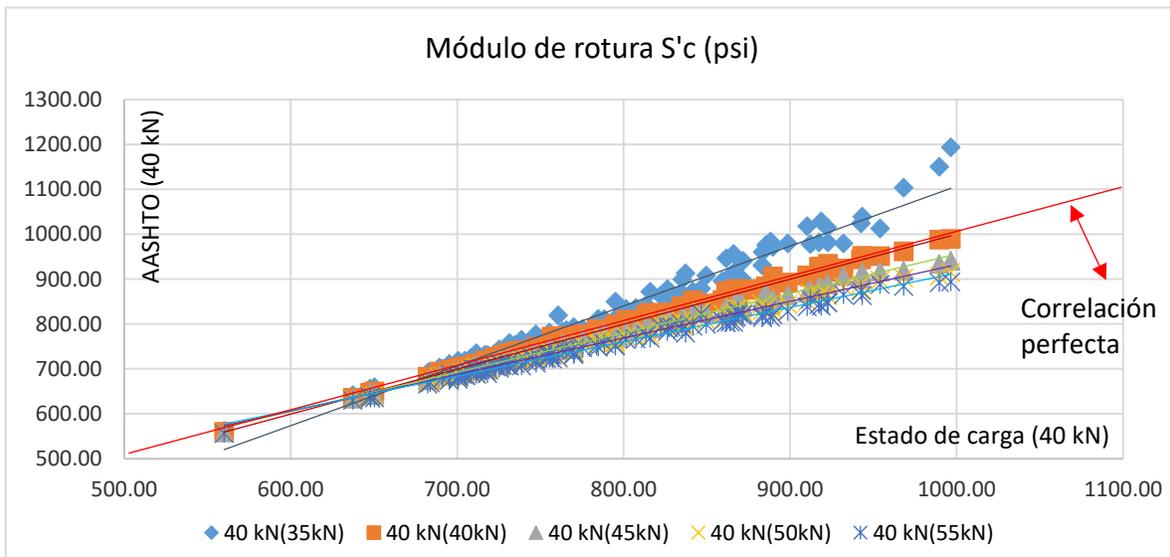


Figura 4.21. Correlación Módulo de rotura $S'c$.

Tabla 4.22. Coeficiente de correlación, módulo de rotura $S'c$.

Coef. Correlación "r"				
40 kN(35kN)	40 kN(40kN)	40 kN(45kN)	40 kN(50kN)	40 kN(55kN)
0.9870	0.9976	0.9978	0.9959	0.9940

Tabla 4.23. Pendiente del ajuste de correlación, módulo de rotura $S'c$.

Pendiente "m"				
40 kN(35kN)	40 kN(40kN)	40 kN(45kN)	40 kN(50kN)	40 kN(55kN)
1.3334	1.0022	0.8774	0.8155	0.7652



Luego de analizar los parámetros obtenidos por retrocálculo, se concluye que el valor de la carga aplicada durante el ensayo de deflectometría influye en mayor medida en el módulo de elasticidad y módulo de rotura del concreto, además, este grado de afectación se ve en mayor medida reflejado cuando la carga aplicada durante el ensayo es inferior a la carga normalizada de 40 kN. Ahora bien, es importante conocer cómo estas variaciones en los valores tienen repercusión en el cálculo del espesor de la losa de hormigón cuando se realiza una campaña de rehabilitación vial por lo que más adelante se analizará este punto.

4.7 Diseño de sobrecarpetas

4.7.1 Espesor de losa requerido

La aplicación de la fórmula general de la AASHTO para diseño de pavimentos rígidos en función de los parámetros de diseño considerados produce diferentes valores del espesor de la losa de hormigón necesaria para soportar el tráfico proyectado en el periodo de diseño considerado, la Tabla 4.24 muestra los espesores obtenidos para el diseño.

Tabla 4.24. Espesor de losa requerido (cm)

	40kN(35 kN)	40kN(40 kN)	40kN(45 kN)	40kN(50 kN)	40kN(55 kN)
TRAMO 1	22.90	23.01	23.09	23.18	23.24
TRAMO 2	22.05	22.17	22.28	22.36	22.36

Nota: Los espesores calculados se presentan con formato decimal con el fin de demostrar la variación existente.

La Figura 4.22 muestra el comportamiento de la variabilidad en el espesor de la losa calculado.

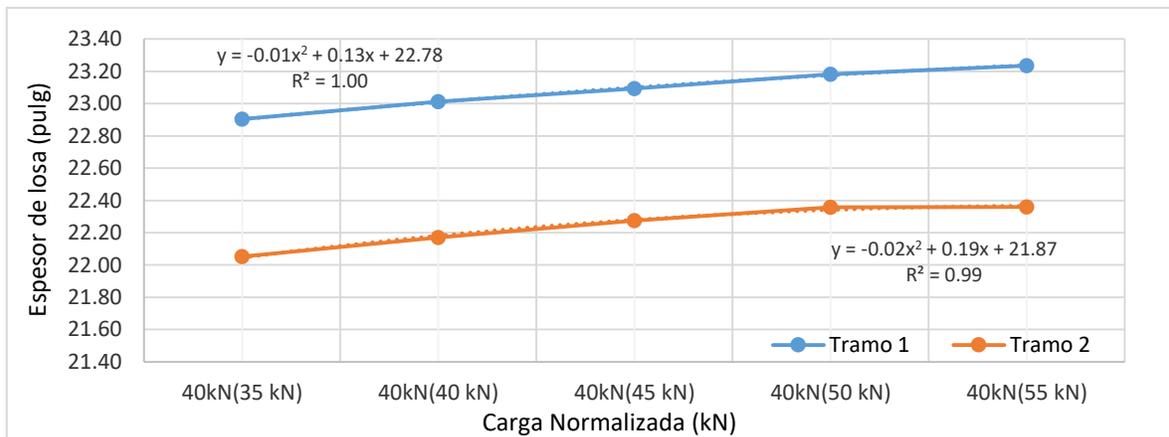


Figura 4.22. Espesor de losa requerido (pulg)

Se observa en la figura que el espesor de la losa de hormigón necesario para la demanda de tráfico con relación a la carga aplicada durante el ensayo de deflectometría luego de que esta ha sido normalizada es creciente y su mejor ajuste es de una ecuación de segundo grado.



El porcentaje de variación del espesor de la losa, si se lo compara con la obtenida con la correspondiente a la carga normalizada de 40 kN es muy baja, tal como se aprecia en la Tabla 4.25, con valores por debajo del 1.00%, lo que en términos de diseño no es una afectación significativa ya que la selección de un espesor de losa se basa en valores enteros siendo estos de 24 cm y 23 cm para el Tramo 1 y Tramo 2 respectivamente, sin embargo considerando temas de presupuesto se puede tomar valores decimales, en este caso para el Tramo 1 se consideraría 23.5 cm y para el Tramo 2, 22.5 cm.

Tabla 4.25. Porcentaje de variación en espesor de losa requerido

	40kN(35 kN)	40kN(40 kN)	40kN(45 kN)	40kN(50 kN)	40kN(55 kN)
TRAMO 1	-0.47%	-	0.35%	0.74%	0.97%
TRAMO 2	-0.54%	-	0.47%	0.84%	0.85%

4.7.2 Espesor de sobrecarpeta

En base a la formulación dada por la AASHTO se calcula el espesor de la sobrecarpeta de hormigón asfáltico necesario para el reforzamiento estructural de los tramos considerados en el análisis. La Tabla 4.26 muestra los valores de espesor de sobrecarpeta requeridos.

Tabla 4.26. Espesor de sobrecarpeta requerido (pulg)

	40kN(35 kN)	40kN(40 kN)	40kN(45 kN)	40kN(50 kN)	40kN(55 kN)
TRAMO 1	3.38	3.45	3.51	3.57	3.61
TRAMO 2	1.57	1.66	1.75	1.81	1.81

Nota: Los espesores calculados se presentan con formato decimal con el fin de demostrar la variación existente.

El porcentaje de variación del espesor de la sobrecarpeta comparada con la obtenida con la correspondiente a la carga normalizada de 40 kN tiene una variación mayor a que la losa de hormigón requerida, en este caso el mayor valor de variación es de 4.52% para el primer tramo y del 8.85% para el segundo tramo, tal como se ve en la Tabla 4.27, sin embargo, al igual que en el diseño de losas los valores que se asumen son números enteros razón por la cual estas variaciones obtenidas no afectan al valor considerado dentro de un diseño que en este caso se asume un valor de 4 pulgadas en el primer tramo y de 2 pulgadas en el segundo tramo.

Tabla 4.27. Porcentaje de variación en espesor de sobrecarpeta requerido

	40kN(35 kN)	40kN(40 kN)	40kN(45 kN)	40kN(50 kN)	40kN(55 kN)
TRAMO 1	-2.22%	-	1.65%	3.44%	4.52%
TRAMO 2	-5.67%	-	4.91%	8.73%	8.85%

La Figura 4.23 muestra la tendencia de los valores de sobrecarpeta que se obtuvieron a través de la metodología AASHTO.

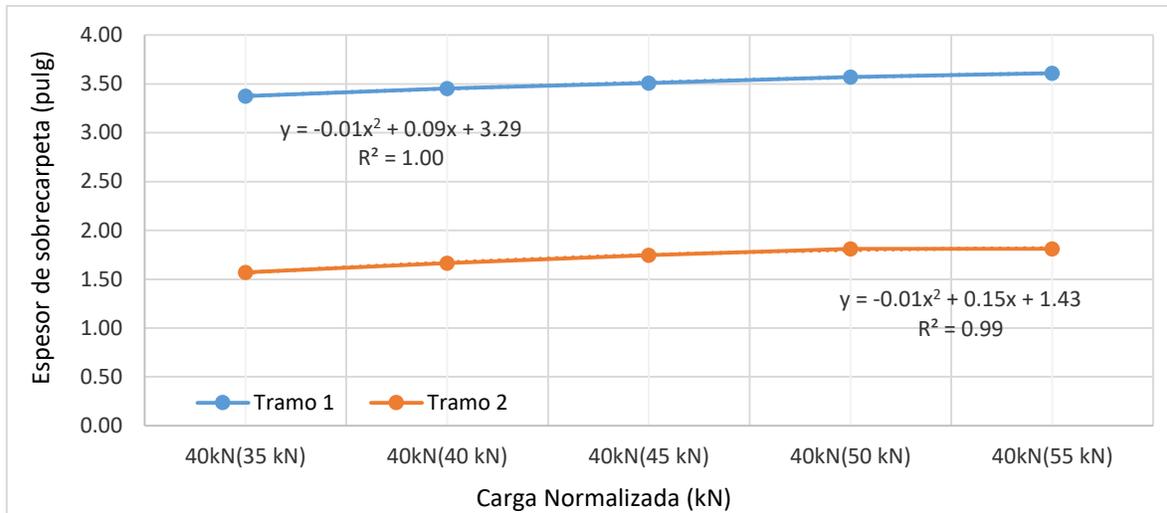


Figura 4.23. Espesor de sobrecarpeta requerido.

El espesor de la sobrecarpeta de hormigón asfáltico requerido como reforzamiento estructural con relación a la carga aplicada durante el ensayo de deflectometría es creciente y su mejor ajuste es de una ecuación de segundo grado.

Independientemente de la carga aplicada durante los ensayos de deflectometría en los dos tramos analizados, la aplicación de la formulación de la AASHTO ha permitido determinar el mismo espesor de la sobrecarpeta para un rango de cargas comprendido entre 35 kN a 55 kN. Con lo cual se puede indicar que el espesor de la sobrecarpeta de hormigón asfáltico requerida no es afectado por carga de ejecución del ensayo de deflectometría cuando esta es diferente a la carga normalizada de 40 kN.



5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo de titulación se realiza la evaluación estructural en dos segmentos de la vía Cuenca - Molleturo - El Empalme, comprendidos en las abscisas 10+000 - 15+000 y 16+000 - 21+000, cuyos valores de Índice de Condición de Pavimento PCI son de Excelente y Muy Bueno, respectivamente. Dentro del ensayo FWD se ejecuta la aplicación de cinco diferentes cargas en intervalos de 5 kN partiendo desde 35 kN hasta 55 kN, cargas aplicadas en el centro de la losa cada 200 metros carril, determinándose las deflexiones para cada carga.

A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones del análisis del factor de corrección por carga de la AASHTO y de la influencia de la carga aplicada en la ejecución de ensayos de carga de impulso a través del uso del Deflectómetro de Impacto (FWD) en la obtención de los parámetros estructurales del pavimento y el diseño de sobrecarpeta de hormigón asfáltico aplicando la Metodología AASHTO 93.

5.1 Conclusiones

En lo concerniente al factor de corrección de carga para el cálculo de deflexiones, mediante un análisis de regresión de las deflexiones obtenidas de las cinco diferentes cargas aplicadas en el ensayo deflectométrico, se concluye que el mejor ajuste corresponde a una ecuación lineal con un factor de determinación comprendido entre 0.99 a 1.00, lo que quiere decir que tiene un ajuste excelente.

La ecuación obtenida para determinar el factor de corrección por carga mediante el método de Estados de Carga, tiene una variación máxima del 3.66% del valor correspondiente al factor de corrección dado por la AASHTO en el rango analizado, sin embargo mediante un análisis de correlación entre los resultados de las deflexiones normalizadas por los dos métodos se comprobó que la aplicación de la formulación para la corrección de la AASHTO es factible ya que el grado de correlación es excelente determinado por un coeficiente de correlación de 0.997 y pendiente de la función de correlación de 0.986.

Por medio de la aplicación de la ecuación para la corrección por carga definida en la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos de la AASHTO 93, todas las deflexiones medidas en campo son normalizadas a 40 kN, y a través de un análisis de correlación se estableció que en todas las lecturas de los geófonos existe una correlación excelente con respecto a la deflexión correspondiente a la carga normalizada de 40 kN obtenida del análisis de regresión, cuyo coeficiente de correlación se encuentra en un rango de 0.99 a 1.00.

La pendiente de la función que define la correlación existente entre la deflexión normalizada por el método AASHTO y el valor de deflexión correspondiente a 40 kN obtenido del análisis de regresión de las cinco diferentes cargas aplicadas en el ensayo deflectométrico, tiene una variabilidad en el rango del -0.5% al 1.10% con respecto a la pendiente de la función



identidad que es 1.00, siendo esta una variación mínima, por lo que la ecuación de corrección dada por la AASHTO se considera adecuada en el rango de análisis.

En lo que respecta a la influencia de la aplicación de estados de carga en los cuencos de deflexión y en la obtención de los parámetros módulo de reacción de la subrasante (k), módulo de elasticidad del concreto (E_c) y módulo de rotura del concreto ($S'c$), mediante la aplicación de la ecuación de la AASHTO 93 para el cálculo del AREA del cuenco de deflexión y la metodología de retrocálculo para el cálculo de parámetros estructurales de la subrasante y del concreto, se obtiene el parámetro AREA, el módulo de reacción estático de la subrasante (k), el módulo de elasticidad del concreto (E_c) y el módulo de rotura del concreto ($S'c$), para cada estado de carga y a través de un análisis de regresión, se determinó que la tendencia que tienen estos parámetros es una ecuación de segundo grado con el coeficiente de determinación R^2 igual a 1.00, lo que indica que existe un excelente ajuste entre las variables de la carga aplicada y los parámetros estructurales del concreto y de la subrasante. Las funciones que definen el parámetro AREA del cuenco de deflexión, el módulo de elasticidad (E_c) del concreto y el módulo de rotura del concreto ($S'c$) son inversamente proporcionales a la carga aplicada, mientras que la función del módulo de reacción de la subrasante (k) es directamente proporcional a la carga.

Se realizó la normalización de las deflexiones obtenidas de cada carga al valor de 40 kN mediante el factor de corrección propuesto por la AASHTO para comprobar la variación en los parámetros AREA del cuenco de deflexión y mediante el proceso de retrocálculo, el módulo de reacción estático de la subrasante (k), el módulo de elasticidad (E_c) y el módulo de rotura del concreto ($S'c$). De este análisis, se evidenció que la aplicación de una carga distinta a la carga normalizada durante el ensayo FWD produce variaciones en los resultados de los parámetros estructurales y que además la tendencia de estos resultados los describe una ecuación de segundo grado cuyo coeficiente de determinación R^2 es 1.00, es decir, que tiene un ajuste excelente. Para el caso del parámetro AREA del cuenco de deflexión, el módulo de elasticidad (E_c) y el módulo de rotura del concreto ($S'c$), la función es inversamente proporcional, mientras que en el caso del módulo de reacción estático de la subrasante (k) esta es directamente proporcional a la carga.

Se realizó un análisis de la influencia de la calidad de soporte de la subrasante en la relación existente entre la variación del parámetro AREA y la variación de los parámetros módulo de reacción de la subrasante (k), módulo de elasticidad del concreto (E_c) y módulo de rotura del concreto ($S'c$), donde se concluyó que en el caso de los parámetros referentes al concreto estos guardan una misma tendencia que es una función lineal independiente de la calidad de la subrasante. Mientras que, para el caso de la subrasante, este parámetro registra una función lineal decreciente con un coeficiente de determinación cercano a la unidad para cada calidad de soporte.



Se determinó que la relación entre el porcentaje de variación del módulo de reacción de la subrasante y el porcentaje de variación del parámetro AREA es de 1.73, en el caso de suelos de capacidad de soporte Muy Alta, mientras que, para suelos de capacidad de soporte Media, en promedio, esta relación es del 4.38, y para suelos de capacidad Baja, la relación es del 5.64, lo que quiere decir que la subrasante tiene un comportamiento más uniforme cuando la calidad de soporte es Muy Alta, adicionalmente las pendientes de las funciones lineales entre la variación del módulo de reacción con respecto a la variación del AREA oscilan en el rango de -58° (calidad Muy Alta) a -80° (calidad de soporte Baja).

Mediante un análisis de correlación de los parámetros AREA, módulo de reacción de la subrasante (k), módulo de elasticidad (E_c) y módulo de rotura del concreto ($S'c$), se comprobó que los valores de estos parámetros obtenidos con la carga de 40 kN proveniente del ajuste lineal y de la aplicación de la ecuación de ajuste de la AASHTO, tienen un coeficiente de determinación de 0.98 a 1.00, lo que indica una correlación excelente. Sin embargo, en cuanto se refiere a la pendiente de la función de correlación se demostró que tanto el módulo de elasticidad del concreto (E_c) y el módulo de rotura del concreto ($S'c$) tienen una mayor variabilidad con respecto a la pendiente de la función identidad. Para el caso de la carga de 35 kN, la pendiente tienen una variación del 33%, mientras que para la carga de 55 kN, tiene una variación de -23%, demostrando que estos parámetros tienen una mayor sensibilidad al momento de ejecutar ensayos con cargas diferentes a la carga normalizada de 40 kN.

Con respecto al diseño de sobrecarpas de hormigón asfáltico, aplicando la metodología de diseño de sobrecarpas de hormigón asfáltico sobre capas de rodadura de concreto, se calculó el espesor de sobrecarpa asfáltica necesaria para soportar las cargas de tráfico proyectadas en un periodo de diseño de 20 años para las diferentes cargas normalizadas según la AASHTO, se determinó que la variación del espesor de losa de concreto requerido está por debajo del 1.00% con relación al espesor calculado en los dos tramos analizados 24cm para el Tramo 1 y 23 cm para el Tramo 2 cuando se ejecuta el ensayo con la carga normalizada de 40 kN, lo que no representa una variación significativa. Por otra parte, el espesor de la sobrecarpa tiene una variación más significativa de 4.52% para el primer tramo y del 8.85% para el segundo tramo, por lo que el espesor de la sobrecarpa tiene un grado de sensibilidad mayor, sin embargo, estas variaciones no son representativas en términos de diseño ya que en los casos analizados el espesor sugerido de diseño permanece igual para los cinco estados de carga, correspondiente a 4.00 pulgadas de sobrecarpa en el primer tramo y de 2.00 pulgadas en el segundo tramo.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda que al momento de la toma de datos de campo se evite aplicar la carga en presencia del paso de vehículos pesados, debido a que estos producen vibraciones en el pavimento provocando la toma de valores alterados y no confiables.



Es importante considerar análisis independientes por carril si se presentan variaciones considerables en las lecturas de deflexiones ya que de esta manera se tiene una mejor apreciación del estado real de la vía y se puede discernir de mejor manera los resultados obtenidos para proyectos de rehabilitación de pavimentos.

En el caso de que en el deflectómetro de impacto la carga de ensayo sea definida por la altura de caída del peso, se recomienda realizar ensayos de prueba previos a tomar la lectura definitiva debido a que en diferentes puntos de ensayo la misma altura de caída puede provocar variaciones en la carga.

Si se aplican cargas fuera del rango analizado en este proyecto (35kN – 55kN), es recomendable considerar que el factor de corrección de la AASHTO tendrá una mayor diferencia con respecto al factor de corrección real calculado por el método de Estados de Carga, por lo que los resultados tendrán que cotejarse entre los dos métodos a fin de evitar variaciones significativas en el cálculo de parámetros estructurales del concreto y la subrasante que al final podrán tener repercusión en el cálculo de espesores de sobrecarpetas de refuerzo.

Es aconsejable no realizar ensayos de deflectometría con valores de carga demasiado distantes de la carga normalizada por la AASHTO (40 kN) ya que la carga aplicada influye en los resultados obtenidos de los parámetros estructurales y estos al final tienen influencia en el cálculo de espesores de sobrecarpeta para rehabilitación, que si bien guardan un porcentaje de variación bajo, pueden sobredimensionar el diseño.

Se sugiere, como línea de investigación, realizar un análisis de la influencia de la carga aplicada en ensayos de deflectometría en pavimentos rígidos con valores de PCI inferiores a los expuestos en este estudio con el fin de corroborar que el comportamiento de los parámetros estructurales de la subrasante y del concreto mantienen las mismas tendencias debido a que en este caso los cuencos de deflexión variarían, debido a que la valoración de la estructura es pavimento débil/subrasante fuerte y pavimento débil/subrasante débil.

Para futuras investigaciones, se sugiere realizar ensayos de estados de carga en pavimentos flexibles con condiciones de PCI similares a las que cuentan los tramos ensayados para verificar si se mantienen las mismas tendencias en los parámetros estructurales del pavimento, considerando la influencia de la temperatura de la superficie del pavimento al momento del levantamiento de información de campo, pues en los pavimentos flexibles la medición de la temperatura es importante.



6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (1993). Guide for Design of Pavements Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Arriaga, M., Garnica, P., & Rico, A. (1998). Índice Internacional de rugosidad en la red carretera de México, Publicación Técnica No. 108. Sanfandila - Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- ASTM Standars. (n.d.). Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements. ASTM International Designation D 4695-96.
- ASTM Standars. (n.d.). Standard Test Method for Deflections with a Falling – Weight - Type Impulse Load Device. ASTM International Designation D 4694-96.
- Avila, E., & Albarracín, F. (2014). Evaluación de pavimentos en base a métodos no destructivos y análisis inverso caso de estudio: Vía Chicti – Sevilla de Oro. Cuenca - Ecuador.
- Avila, E., & Bojorque, J. (2015). Evaluación de pavimentos en base a métodos no destructivos y análisis inverso. Revista semestral de la DIUC, 150.
- Barrantes, R., & Sibaja, D. (2008). Desarrollo de herramientas de gestión con base en la determinación de índices Red Vial Nacional. San José, Costa Rica: Unidad de Investigación (UI).
- Bejarano, L. (2015). Análisis estructural de un pavimento flexible con presencia de deterioro por medio de deflexiones obtenidos con equipo de carga dinámica y estática. Bogotá - Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Canavos, G. C. (1988). Probabilidad y estadística: aplicaciones y métodos. Mexico: McGraw - Hill.
- Chang Albitres, C. (2010). Evaluación de pavimentos: criterios y aplicaciones. Revista Vial.
- CIM GROUP. (2014). CIM GROUP Consultora de Ingeniería. Retrieved from <http://cim-group.net/servicio/ensayo-destructivo-en-pavimentos-mediante-deflectometro-de-impacto-fwd/>
- Corros, M., Urbáez, E., & Corredor, G. (2009). Manual de Evaluación de Pavimentos. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Escobar, K., García, A., & Guzmán, C. (2007). Análisis comparativo de la evaluación de



- pavimentos por medio de la viga benkelman y el deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD). El Salvador: Universidad de el Salvador.
- Gaete, R., Fuentes, C., & Valverde, S. (2003). *Uso del deflectómetro de impacto para la evaluación Estructural de recapeados asfálticos sobre pavimentos de hormigón*. Chile: Universidad de Concepción.
- Garnica, P., & Perez, A. (2013). *Influencia de la temperatura en la determinación de la capacidad estructural de pavimentos flexibles*. Mexico: Instituto Mexicano del Transporte.
- Higuera, C. H. (2009). *Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto*. Revista Facultad de Ingeniería UPTC - Colombia.
- Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design (2nd Ed)*. Pearson Prentice Hall.
- IBCH. (2015). *Diseño de Sobrecarpetas en pavimentos existentes (AASHTO 1993)*. La Paz – Bolivia: Instituto Boliviano del cemento y el hormigón.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2007). *Evaluación estructural de pavimentos utilizando el deflectómetro de impacto*. Mexico DF: Publicación mensual de divulgación externa NOTAS núm. 108, octubre 2007, artículo 1.
- Martínez Bencardino, C. (2012). *Estadística y muestreo Décima tercera edición*. Bogota: ECOE Ediciones.
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- MTOP. (2016). *Acuerdo Ministerial 018-2016*. Quito: Ministerio de Transporte y Obras Públicas.
- MTOP. (2018). *Mantenimiento por resultados de la vía E582 Cuenca - Molleturo - El Empalme*. Ecuador: Ministerio de Transporte y Obras Públicas.
- MTOP. (2019). *Datos de conteo de tráfico vía Cuenca – Molleturo – El Empalme*. Ecuador: Ministerio de Transporte y Obras Públicas.
- MTOP. (2019). *Plan Anual Comprometido*. Ecuador: Ministerio de Transporte y Obras Públicas.
- Norma 6.1-IC, A. 3. (2003). *Norma 6.1-IC «Secciones de firme» de la Instrucción de Carreteras*. España.



- Pavement Research Center. (2008). Calback manual version 1.0. Tech. Rep. University of California Pavement Research Center.
- Promanvial Consulting, C. L. (2014). Evaluación funcional y estructural de la vía Cuenca - Molleturo - Pto. Inca. Quito.
- Sánchez, A. (2018). Análisis estructural de pavimentos rígidos a través de métodos no destructivos y aplicación de elementos finitos. Universidad de Cuenca.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2013-2018). Programa de Auscultacion de la Red Carretera Federal. Mexico.
- Strategic Highway Research Program . (1992). Falling Weight Deflectometer Quality Assurance Software. Tennessee.
- U.S. Department of Transportation. (2017). Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing, Analysis, and Interpretation.
- Vásquez, L. R. (2002). Pavement Condition Index (PCI) para pavimentos asfálticos y de concreto en carreteras. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.



7 ANEXOS

7.1 Valores de deflexión obtenido a través de análisis de regresión

Geofono D(1) Tramo 1 Carril Izquierdo						
Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10098	1.00	103.99	119.54	135.08	150.63	166.17
10301	1.00	160.80	184.39	207.99	231.58	255.17
10504	1.00	142.90	165.39	187.88	210.37	232.85
10702	1.00	147.02	172.43	197.84	223.25	248.66
10901	1.00	124.56	144.74	164.91	185.08	205.26
11103	1.00	125.04	145.72	166.40	187.08	207.76
11298	1.00	152.82	177.35	201.88	226.41	250.94
11500	1.00	137.44	160.20	182.95	205.71	228.46
11723	1.00	121.77	142.09	162.41	182.73	203.05
11915	1.00	112.79	131.29	149.80	168.30	186.81
12100	1.00	140.25	162.18	184.12	206.05	227.98
12303	1.00	180.79	208.67	236.54	264.41	292.29
12498	1.00	144.52	167.48	190.44	213.40	236.36
12701	1.00	155.42	179.04	202.65	226.27	249.88
12899	1.00	162.73	186.72	210.70	234.68	258.67
13102	1.00	144.07	167.32	190.58	213.84	237.10
13305	1.00	154.30	177.12	199.95	222.77	245.59
13499	1.00	154.36	177.89	201.43	224.97	248.51
13699	1.00	153.01	175.69	198.37	221.05	243.73
13910	1.00	158.38	182.78	207.18	231.58	255.98
14104	1.00	142.97	166.39	189.81	213.23	236.66
14299	1.00	165.46	190.95	216.44	241.93	267.41
14505	1.00	136.55	157.69	178.84	199.99	221.13
14693	1.00	129.66	149.56	169.45	189.35	209.25
14904	1.00	201.82	230.97	260.11	289.26	318.40
Max	1.00	201.82	230.97	260.11	289.26	318.40
Min	1.00	103.99	119.54	135.08	150.63	166.17
Promedio	1.00	146.14	168.94	191.75	214.56	237.36
Desviacion	0.00	20.94	23.62	26.32	29.05	31.79



Geofono D(2) Tramo 1 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10098	1.00	103.06	117.30	131.53	145.77	160.00
10301	1.00	157.36	179.76	202.17	224.58	246.98
10504	1.00	141.53	162.62	183.71	204.79	225.88
10702	1.00	144.78	168.57	192.35	216.13	239.91
10901	1.00	121.66	140.46	159.27	178.07	196.88
11103	1.00	121.85	141.07	160.29	179.51	198.74
11298	1.00	151.44	174.76	198.08	221.40	244.72
11500	1.00	135.60	156.97	178.34	199.72	221.09
11723	1.00	119.51	138.43	157.35	176.27	195.19
11915	1.00	111.61	128.64	145.67	162.69	179.72
12100	1.00	138.19	158.58	178.97	199.36	219.75
12303	1.00	175.82	201.79	227.75	253.72	279.68
12498	1.00	141.77	163.16	184.54	205.93	227.32
12701	1.00	151.81	173.96	196.10	218.25	240.40
12899	1.00	160.57	183.41	206.25	229.09	251.93
13102	1.00	142.74	164.66	186.57	208.48	230.39
13305	1.00	150.79	172.24	193.68	215.13	236.57
13499	1.00	150.26	172.04	193.83	215.61	237.39
13699	1.00	150.44	171.87	193.31	214.75	236.18
13910	1.00	155.50	178.55	201.59	224.63	247.68
14104	1.00	139.74	161.65	183.57	205.48	227.40
14299	1.00	162.93	186.97	211.01	235.05	259.09
14505	1.00	133.90	153.59	173.27	192.96	212.65
14693	1.00	123.70	141.97	160.23	178.50	196.76
14904	1.00	182.86	208.38	233.90	259.43	284.95
Max	1.00	182.86	208.38	233.90	259.43	284.95
Min	1.00	103.06	117.30	131.53	145.77	160.00
Promedio	1.00	142.78	164.06	185.33	206.61	227.89
Desviacion	0.00	18.97	21.45	23.95	26.47	29.01



Geofono D(3) Tramo 1 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10098	1.00	99.82	112.96	126.10	139.24	152.38
10301	1.00	152.31	173.52	194.73	215.95	237.16
10504	1.00	137.87	157.81	177.75	197.69	217.63
10702	1.00	140.37	163.18	185.99	208.79	231.60
10901	1.00	117.13	134.80	152.47	170.14	187.81
11103	1.00	118.07	135.92	153.76	171.60	189.45
11298	1.00	148.02	170.26	192.51	214.75	236.99
11500	1.00	132.49	152.63	172.77	192.91	213.05
11723	1.00	115.41	133.40	151.39	169.37	187.36
11915	1.00	108.87	125.05	141.23	157.41	173.59
12100	1.00	133.62	152.87	172.13	191.38	210.63
12303	1.00	169.13	193.86	218.60	243.33	268.07
12498	1.00	137.11	157.28	177.46	197.63	217.81
12701	1.00	147.65	168.60	189.55	210.50	231.45
12899	1.00	155.92	177.80	199.68	221.57	243.45
13102	1.00	139.05	159.78	180.51	201.23	221.96
13305	1.00	145.82	166.02	186.21	206.41	226.61
13499	1.00	144.31	164.74	185.18	205.61	226.04
13699	1.00	145.67	165.98	186.29	206.60	226.91
13910	1.00	151.01	173.00	195.00	217.00	238.99
14104	1.00	134.76	155.61	176.46	197.32	218.17
14299	1.00	157.72	180.71	203.70	226.68	249.67
14505	1.00	129.74	148.40	167.06	185.72	204.38
14693	1.00	118.16	135.22	152.28	169.35	186.41
14904	1.00	170.98	194.43	217.87	241.31	264.75
Max	1.00	170.98	194.43	218.60	243.33	268.07
Min	1.00	99.82	112.96	126.10	139.24	152.38
Promedio	1.00	138.04	158.15	178.27	198.38	218.49
Desviacion	0.00	17.88	20.28	22.71	25.16	27.62



Geofono D(4) Tramo 1 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10098	1.00	82.28	93.05	103.83	114.60	125.37
10301	1.00	130.15	147.84	165.53	183.22	200.91
10504	1.00	118.30	135.38	152.46	169.54	186.62
10702	1.00	118.76	138.13	157.50	176.88	196.25
10901	1.00	96.41	110.81	125.22	139.62	154.03
11103	1.00	97.18	111.86	126.54	141.22	155.90
11298	1.00	128.81	147.77	166.73	185.69	204.65
11500	1.00	112.39	129.55	146.70	163.86	181.01
11723	1.00	96.24	111.26	126.28	141.30	156.31
11915	1.00	92.04	105.65	119.27	132.88	146.49
12100	1.00	112.76	128.87	144.98	161.09	177.20
12303	1.00	142.06	162.33	182.59	202.85	223.12
12498	1.00	114.18	130.95	147.72	164.49	181.26
12701	1.00	125.25	143.01	160.77	178.53	196.29
12899	1.00	133.56	151.91	170.25	188.60	206.95
13102	1.00	118.87	136.61	154.36	172.10	189.84
13305	1.00	121.66	138.25	154.85	171.44	188.04
13499	1.00	117.46	133.91	150.37	166.82	183.28
13699	1.00	123.87	140.95	158.03	175.11	192.19
13910	1.00	129.16	147.80	166.44	185.08	203.73
14104	1.00	114.00	131.37	148.74	166.11	183.48
14299	1.00	134.81	154.42	174.04	193.65	213.27
14505	1.00	109.64	125.28	140.93	156.58	172.23
14693	1.00	94.53	108.12	121.72	135.31	148.91
14904	1.00	132.85	150.52	168.20	185.87	203.55
Max	1.00	142.06	162.33	182.59	202.85	223.12
Min	1.00	82.28	93.05	103.83	114.60	125.37
Promedio	1.00	115.89	132.63	149.36	166.10	182.83
Desviacion	0.00	15.46	17.49	19.55	21.64	23.74



Geofono D(5) Tramo 1 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10098	1.00	57.03	66.17	75.30	84.44	93.57
10301	1.00	97.37	112.07	126.77	141.47	156.16
10504	1.00	88.07	102.71	117.35	132.00	146.64
10702	1.00	87.23	103.92	120.61	137.30	153.99
10901	1.00	67.10	79.20	91.31	103.41	115.52
11103	1.00	67.19	79.29	91.39	103.49	115.60
11298	1.00	97.62	114.02	130.42	146.82	163.22
11500	1.00	82.24	96.91	111.58	126.25	140.92
11723	1.00	68.21	80.96	93.72	106.47	119.23
11915	1.00	66.43	78.21	89.99	101.76	113.54
12100	1.00	82.13	95.61	109.10	122.58	136.06
12303	1.00	104.27	120.89	137.50	154.12	170.74
12498	1.00	82.48	96.60	110.72	124.83	138.95
12701	1.00	93.43	108.47	123.51	138.56	153.60
12899	1.00	101.43	117.11	132.79	148.47	164.15
13102	1.00	88.95	104.21	119.48	134.74	150.01
13305	1.00	88.58	102.21	115.85	129.48	143.11
13499	1.00	82.29	95.67	109.05	122.43	135.82
13699	1.00	93.50	107.86	122.22	136.57	150.93
13910	1.00	98.73	114.45	130.16	145.87	161.58
14104	1.00	84.06	98.92	113.77	128.63	143.49
14299	1.00	102.62	119.16	135.70	152.25	168.79
14505	1.00	80.68	93.74	106.80	119.86	132.92
14693	1.00	64.26	75.26	86.25	97.25	108.25
14904	1.00	93.35	107.15	120.95	134.75	148.55
Max	1.00	104.27	120.89	137.50	154.12	170.74
Min	1.00	57.03	66.17	75.30	84.44	93.57
Promedio	1.00	84.77	98.83	112.89	126.95	141.01
Desviacion	0.00	13.28	15.00	16.75	18.53	20.32



Geofono D(6) Tramo 1 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10098	1.00	44.63	50.92	57.21	63.50	69.79
10301	1.00	75.38	85.99	96.60	107.20	117.81
10504	1.00	70.20	80.81	91.43	102.05	112.66
10702	1.00	68.50	80.63	92.76	104.88	117.01
10901	1.00	52.45	61.05	69.65	78.25	86.85
11103	1.00	50.60	59.03	67.45	75.88	84.30
11298	1.00	78.63	90.89	103.15	115.41	127.68
11500	1.00	64.73	75.46	86.19	96.92	107.65
11723	1.00	53.07	62.35	71.63	80.92	90.20
11915	1.00	52.35	60.76	69.18	77.59	86.00
12100	1.00	63.12	72.75	82.37	92.00	101.62
12303	1.00	77.45	89.19	100.94	112.69	124.44
12498	1.00	62.51	72.44	82.37	92.31	102.24
12701	1.00	73.25	84.13	95.01	105.88	116.76
12899	1.00	80.11	91.53	102.94	114.36	125.77
13102	1.00	69.59	80.66	91.73	102.80	113.87
13305	1.00	66.75	76.20	85.65	95.11	104.56
13499	1.00	59.51	68.23	76.95	85.67	94.39
13699	1.00	73.59	84.27	94.95	105.63	116.31
13910	1.00	78.48	90.25	102.02	113.79	125.56
14104	1.00	64.52	75.21	85.91	96.60	107.30
14299	1.00	79.63	91.80	103.97	116.14	128.31
14505	1.00	62.43	71.82	81.20	90.59	99.98
14693	1.00	46.39	53.71	61.04	68.37	75.70
14904	1.00	67.62	77.08	86.54	96.00	105.46
Max	1.00	80.11	91.80	103.97	116.14	128.31
Min	1.00	44.63	50.92	57.21	63.50	69.79
Promedio	1.00	65.42	75.49	85.55	95.62	105.69
Desviacion	0.00	10.72	12.15	13.61	15.09	16.58



Geofono D(7) Tramo 1 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10098	1.00	27.19	31.89	36.59	41.30	46.00
10301	1.00	49.10	56.51	63.92	71.33	78.74
10504	1.00	46.19	53.93	61.68	69.43	77.18
10702	1.00	45.43	54.23	63.03	71.83	80.63
10901	1.00	33.44	39.91	46.39	52.87	59.35
11103	1.00	30.83	36.66	42.49	48.32	54.15
11298	1.00	53.67	62.59	71.52	80.45	89.38
11500	1.00	42.56	50.39	58.22	66.05	73.88
11723	1.00	34.24	41.24	48.23	55.23	62.23
11915	1.00	34.25	40.43	46.60	52.77	58.95
12100	1.00	40.39	47.20	54.01	60.82	67.63
12303	1.00	47.62	55.40	63.18	70.96	78.73
12498	1.00	40.01	47.15	54.29	61.44	68.58
12701	1.00	48.94	56.52	64.09	71.67	79.25
12899	1.00	54.50	62.83	71.17	79.50	87.84
13102	1.00	45.62	53.48	61.33	69.19	77.05
13305	1.00	41.20	47.34	53.48	59.62	65.76
13499	1.00	35.05	40.94	46.83	52.73	58.62
13699	1.00	49.96	57.61	65.26	72.92	80.57
13910	1.00	55.04	63.60	72.15	80.71	89.26
14104	1.00	41.37	48.64	55.90	63.17	70.44
14299	1.00	53.48	62.06	70.63	79.20	87.77
14505	1.00	41.14	47.74	54.33	60.93	67.53
14693	1.00	27.42	32.39	37.36	42.33	47.30
14904	1.00	41.35	47.73	54.10	60.47	66.85
Max	1.00	55.04	63.60	72.15	80.71	89.38
Min	1.00	27.19	31.89	36.59	41.30	46.00
Promedio	1.00	42.40	49.54	56.67	63.81	70.95
Desviacion	0.00	8.25	9.28	10.34	11.41	12.50



Geofono D(8) Tramo 1 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10098	1.00	17.71	20.50	23.29	26.08	28.87
10301	1.00	29.88	34.20	38.51	42.82	47.13
10504	1.00	29.36	33.94	38.51	43.08	47.65
10702	1.00	29.95	35.69	41.43	47.18	52.92
10901	1.00	22.89	26.98	31.07	35.17	39.26
11103	1.00	18.36	21.72	25.08	28.44	31.80
11298	1.00	34.89	40.34	45.78	51.22	56.66
11500	1.00	31.28	37.51	43.74	49.96	56.19
11723	1.00	23.69	28.36	33.03	37.70	42.37
11915	1.00	23.16	27.10	31.04	34.98	38.92
12100	1.00	25.27	29.39	33.50	37.62	41.74
12303	1.00	24.40	28.33	32.27	36.20	40.13
12498	1.00	25.11	29.43	33.75	38.08	42.40
12701	1.00	31.02	35.71	40.41	45.10	49.80
12899	1.00	36.20	41.48	46.77	52.05	57.33
13102	1.00	28.30	32.79	37.29	41.79	46.28
13305	1.00	22.05	25.21	28.38	31.54	34.71
13499	1.00	19.89	23.10	26.31	29.53	32.74
13699	1.00	32.11	36.79	41.47	46.15	50.83
13910	1.00	37.31	42.90	48.49	54.08	59.67
14104	1.00	24.50	28.74	32.98	37.22	41.46
14299	1.00	33.33	38.65	43.97	49.29	54.61
14505	1.00	26.10	30.06	34.03	37.99	41.96
14693	1.00	16.13	19.10	22.07	25.05	28.02
14904	1.00	23.17	26.66	30.16	33.65	37.15
Max	1.00	37.31	42.90	48.49	54.08	59.67
Min	1.00	16.13	19.10	22.07	25.05	28.02
Promedio	1.00	26.64	30.99	35.33	39.68	44.02
Desviacion	0.00	5.80	6.61	7.44	8.29	9.15



Geofono D(9) Tramo 1 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10098	1.00	99.83	112.62	125.41	138.20	150.99
10301	1.00	153.14	173.87	194.59	215.32	236.05
10504	1.00	137.53	157.12	176.71	196.30	215.89
10702	1.00	142.23	164.43	186.63	208.83	231.03
10901	1.00	121.73	139.29	156.85	174.40	191.96
11103	1.00	124.34	142.50	160.66	178.82	196.98
11298	1.00	147.69	169.42	191.16	212.89	234.63
11500	1.00	132.03	151.89	171.76	191.62	211.49
11723	1.00	116.65	134.05	151.44	168.84	186.24
11915	1.00	110.91	126.89	142.88	158.87	174.86
12100	1.00	133.93	152.82	171.71	190.60	209.49
12303	1.00	174.63	199.62	224.60	249.59	274.57
12498	1.00	137.03	156.54	176.05	195.55	215.06
12701	1.00	149.08	170.03	190.97	211.92	232.87
12899	1.00	154.17	175.21	196.25	217.30	238.34
13102	1.00	139.25	159.78	180.32	200.85	221.39
13305	1.00	147.36	167.33	187.30	207.27	227.24
13499	1.00	145.57	165.87	186.18	206.48	226.78
13699	1.00	144.95	164.73	184.50	204.28	224.06
13910	1.00	151.00	172.53	194.07	215.61	237.14
14104	1.00	138.78	159.86	180.95	202.04	223.13
14299	1.00	158.54	181.27	203.99	226.72	249.44
14505	1.00	130.77	149.20	167.64	186.08	204.52
14693	1.00	126.35	144.07	161.78	179.49	197.21
14904	1.00	175.40	198.85	222.29	245.73	269.17
Max	1.00	175.40	199.62	224.60	249.59	274.57
Min	1.00	99.83	112.62	125.41	138.20	150.99
Promedio	1.00	139.72	159.59	179.47	199.34	219.22
Desviacion	0.00	17.70	20.09	22.50	24.94	27.39



Geofono D(1) Tramo 1 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10000	1.00	42.03	49.82	57.60	65.39	73.17
10199	1.00	42.49	50.22	57.95	65.68	73.41
10402	1.00	38.06	45.09	52.12	59.15	66.18
10596	1.00	42.44	50.78	59.11	67.45	75.79
10799	1.00	47.18	56.53	65.89	75.25	84.61
11007	1.00	48.62	57.85	67.08	76.31	85.54
11216	1.00	44.33	52.51	60.69	68.87	77.05
11400	1.00	43.02	50.70	58.38	66.06	73.74
11569	1.00	52.76	63.19	73.62	84.05	94.48
11792	1.00	50.48	60.34	70.19	80.05	89.91
11975	1.00	30.84	37.31	43.77	50.24	56.71
12200	1.00	33.10	39.66	46.21	52.77	59.32
12403	1.00	48.80	58.31	67.81	77.32	86.83
12607	1.00	37.36	45.10	52.83	60.57	68.30
12802	1.00	47.16	54.38	61.59	68.81	76.02
13004	1.00	34.98	42.50	50.01	57.53	65.05
13186	1.00	33.27	39.98	46.68	53.39	60.09
13398	1.00	38.81	46.83	54.85	62.87	70.89
13574	1.00	42.68	50.71	58.75	66.78	74.81
13804	1.00	32.58	38.93	45.28	51.63	57.98
14003	1.00	54.66	63.86	73.06	82.26	91.46
14206	1.00	41.45	49.03	56.61	64.20	71.78
14409	1.00	48.46	57.47	66.48	75.48	84.49
14595	1.00	33.04	39.09	45.14	51.19	57.24
14808	1.00	51.64	59.26	66.87	74.48	82.09
15006	1.00	41.34	49.24	57.14	65.04	72.94
Max	1.00	54.66	63.86	73.62	84.05	94.48
Min	1.00	30.84	37.31	43.77	50.24	56.71
Promedio	1.00	42.37	50.33	58.30	66.26	74.23
Desviacion	0.00	6.86	7.84	8.87	9.92	10.98



Geofono D(2) Tramo 1 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10000	1.00	39.40	46.15	52.89	59.64	66.38
10199	1.00	40.32	47.06	53.79	60.53	67.26
10402	1.00	36.99	43.11	49.23	55.35	61.47
10596	1.00	41.14	48.49	55.85	63.21	70.56
10799	1.00	45.67	54.11	62.54	70.98	79.42
11007	1.00	46.07	54.19	62.31	70.43	78.55
11216	1.00	43.58	50.79	57.99	65.20	72.41
11400	1.00	41.18	47.86	54.55	61.24	67.92
11569	1.00	52.09	61.50	70.91	80.32	89.74
11792	1.00	50.04	58.93	67.82	76.72	85.61
11975	1.00	30.69	36.17	41.64	47.11	52.58
12200	1.00	31.78	37.21	42.64	48.07	53.50
12403	1.00	48.31	56.88	65.45	74.02	82.59
12607	1.00	36.86	43.59	50.32	57.05	63.78
12802	1.00	46.00	52.28	58.55	64.83	71.10
13004	1.00	34.80	41.37	47.94	54.51	61.07
13186	1.00	32.20	37.82	43.45	49.07	54.70
13398	1.00	38.48	45.57	52.67	59.76	66.86
13574	1.00	43.03	50.06	57.09	64.13	71.16
13804	1.00	32.09	37.45	42.80	48.16	53.51
14003	1.00	53.37	61.41	69.46	77.50	85.55
14206	1.00	40.75	47.30	53.84	60.38	66.93
14409	1.00	48.70	56.52	64.33	72.15	79.96
14595	1.00	33.14	38.23	43.32	48.40	53.49
14808	1.00	51.10	57.80	64.50	71.20	77.90
15006	1.00	41.77	48.56	55.35	62.14	68.93
Max	1.00	53.37	61.50	70.91	80.32	89.74
Min	1.00	30.69	36.17	41.64	47.11	52.58
Promedio	1.00	41.52	48.48	55.43	62.39	69.34
Desviacion	0.00	6.75	7.73	8.75	9.79	10.85



Geofono D(3) Tramo 1 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10000	1.00	36.35	42.45	48.55	54.65	60.75
10199	1.00	37.11	43.18	49.24	55.30	61.36
10402	1.00	34.38	40.02	45.66	51.30	56.95
10596	1.00	38.46	45.17	51.87	58.57	65.27
10799	1.00	43.46	51.25	59.03	66.82	74.61
11007	1.00	42.71	50.17	57.62	65.07	72.53
11216	1.00	41.14	47.78	54.41	61.05	67.68
11400	1.00	38.43	44.54	50.65	56.76	62.87
11569	1.00	49.72	58.60	67.47	76.35	85.22
11792	1.00	47.86	56.14	64.42	72.70	80.98
11975	1.00	28.51	33.42	38.34	43.26	48.17
12200	1.00	29.31	34.23	39.16	44.09	49.01
12403	1.00	46.11	54.09	62.07	70.05	78.03
12607	1.00	34.18	40.31	46.43	52.56	58.68
12802	1.00	43.27	48.91	54.56	60.20	65.85
13004	1.00	32.89	38.86	44.82	50.79	56.75
13186	1.00	30.32	35.30	40.29	45.27	50.25
13398	1.00	36.01	42.33	48.66	54.98	61.31
13574	1.00	40.96	47.42	53.87	60.33	66.79
13804	1.00	30.35	35.11	39.87	44.63	49.39
14003	1.00	49.96	57.32	64.68	72.05	79.41
14206	1.00	38.36	44.32	50.28	56.23	62.19
14409	1.00	46.57	53.70	60.84	67.97	75.11
14595	1.00	31.38	35.90	40.42	44.94	49.46
14808	1.00	48.35	54.43	60.51	66.58	72.66
15006	1.00	40.12	46.31	52.50	58.69	64.88
Max	1.00	49.96	58.60	67.47	76.35	85.22
Min	1.00	28.51	33.42	38.34	43.26	48.17
Promedio	1.00	39.09	45.43	51.78	58.12	64.47
Desviacion	0.00	6.59	7.55	8.56	9.59	10.63



Geofono D(4) Tramo 1 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10000	1.00	26.10	30.39	34.68	38.97	43.26
10199	1.00	26.55	30.90	35.24	39.59	43.93
10402	1.00	25.94	30.08	34.23	38.37	42.51
10596	0.99	29.88	35.03	40.18	45.33	50.49
10799	0.99	35.24	41.41	47.57	53.74	59.90
11007	1.00	32.55	38.14	43.72	49.31	54.90
11216	1.00	31.80	36.78	41.75	46.73	51.71
11400	1.00	29.31	33.89	38.47	43.06	47.64
11569	1.00	40.77	47.87	54.98	62.08	69.19
11792	1.00	38.86	45.47	52.08	58.70	65.31
11975	1.00	20.63	24.10	27.57	31.04	34.51
12200	1.00	20.56	23.93	27.30	30.67	34.05
12403	1.00	37.59	43.98	50.38	56.77	63.16
12607	1.00	25.73	30.23	34.73	39.23	43.74
12802	1.00	32.71	36.90	41.09	45.28	49.48
13004	1.00	24.92	29.43	33.94	38.44	42.95
13186	1.00	21.57	25.01	28.45	31.89	35.33
13398	1.00	26.98	31.60	36.22	40.84	45.46
13574	1.00	31.54	36.32	41.11	45.90	50.69
13804	1.00	22.51	25.88	29.25	32.62	35.98
14003	1.00	36.65	42.19	47.72	53.26	58.79
14206	1.00	28.41	32.63	36.85	41.07	45.29
14409	1.00	36.16	41.65	47.15	52.65	58.14
14595	1.00	23.86	27.21	30.56	33.91	37.26
14808	1.00	37.41	42.06	46.72	51.38	56.03
15006	1.00	31.58	36.39	41.20	46.01	50.83
Max	1.00	40.77	47.87	54.98	62.08	69.19
Min	0.99	20.56	23.93	27.30	30.67	34.05
Promedio	1.00	29.84	34.60	39.35	44.11	48.87
Desviacion	0.00	5.93	6.87	7.82	8.80	9.78



Geofono D(5) Tramo 1 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10000	1.00	12.75	16.16	19.57	22.98	26.39
10199	1.00	13.45	17.06	20.68	24.30	27.92
10402	1.00	13.38	16.92	20.45	23.99	27.53
10596	0.99	17.14	21.68	26.23	30.78	35.32
10799	1.00	21.80	27.37	32.95	38.53	44.10
11007	1.00	18.52	23.35	28.18	33.01	37.85
11216	1.00	16.91	21.15	25.40	29.65	33.90
11400	1.00	15.86	19.88	23.90	27.92	31.94
11569	1.00	25.65	32.07	38.48	44.90	51.31
11792	1.00	23.74	29.76	35.78	41.80	47.82
11975	1.00	8.11	11.06	14.02	16.97	19.92
12200	1.00	7.47	10.30	13.14	15.97	18.81
12403	1.00	22.83	28.59	34.35	40.12	45.88
12607	1.00	11.95	15.87	19.79	23.71	27.64
12802	1.00	16.92	20.60	24.29	27.97	31.65
13004	1.00	12.08	15.98	19.88	23.78	27.67
13186	1.00	7.85	10.94	14.03	17.12	20.21
13398	1.00	12.65	16.63	20.61	24.58	28.56
13574	1.00	15.55	19.59	23.64	27.69	31.74
13804	1.00	9.12	12.16	15.20	18.25	21.29
14003	1.00	18.53	23.12	27.71	32.30	36.89
14206	1.00	12.97	16.61	20.25	23.89	27.52
14409	1.00	18.81	23.62	28.43	33.25	38.06
14595	1.00	10.12	13.10	16.08	19.05	22.03
14808	1.00	19.78	24.29	28.79	33.30	37.81
15006	1.00	16.51	20.95	25.39	29.82	34.26
Max	1.00	25.65	32.07	38.48	44.90	51.31
Min	0.99	7.47	10.30	13.14	15.97	18.81
Promedio	1.00	15.40	19.57	23.74	27.91	32.08
Desviacion	0.00	4.99	5.92	6.86	7.81	8.77



Geofono D(6) Tramo 1 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10000	1.00	9.09	11.26	13.43	15.61	17.78
10199	1.00	10.62	13.05	15.48	17.90	20.33
10402	1.00	10.74	13.06	15.37	17.68	19.99
10596	0.99	15.20	18.51	21.82	25.14	28.45
10799	1.00	19.19	23.32	27.45	31.58	35.71
11007	1.00	16.35	19.85	23.36	26.87	30.37
11216	1.00	13.34	16.07	18.79	21.51	24.23
11400	1.00	13.46	16.27	19.07	21.88	24.69
11569	1.00	22.30	27.08	31.86	36.64	41.42
11792	1.00	20.64	24.94	29.24	33.54	37.84
11975	1.00	6.54	8.21	9.88	11.55	13.22
12200	1.00	5.54	7.07	8.60	10.12	11.65
12403	1.00	19.47	23.50	27.52	31.54	35.56
12607	1.00	10.93	13.36	15.79	18.22	20.65
12802	1.00	13.18	15.50	17.82	20.14	22.46
13004	1.00	10.89	13.50	16.10	18.70	21.31
13186	1.00	6.98	8.68	10.37	12.07	13.77
13398	1.00	11.18	13.77	16.37	18.96	21.55
13574	1.00	12.49	14.97	17.45	19.94	22.42
13804	1.00	7.74	9.55	11.37	13.18	15.00
14003	1.00	14.20	17.10	20.01	22.92	25.82
14206	1.00	10.22	12.36	14.50	16.64	18.78
14409	1.00	15.49	18.66	21.83	25.00	28.16
14595	1.00	8.86	10.73	12.59	14.46	16.32
14808	1.00	16.89	20.00	23.12	26.23	29.34
15006	1.00	14.01	16.88	19.74	22.60	25.47
Max	1.00	22.30	27.08	31.86	36.64	41.42
Min	0.99	5.54	7.07	8.60	10.12	11.65
Promedio	1.00	12.91	15.66	18.42	21.18	23.93
Desviacion	0.00	4.42	5.26	6.10	6.94	7.79



Geofono D(7) Tramo 1 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10000	1.00	4.41	5.87	7.32	8.78	10.24
10199	1.00	5.57	7.53	9.49	11.45	13.41
10402	1.00	5.86	7.65	9.43	11.21	13.00
10596	0.99	9.96	12.73	15.51	18.29	21.06
10799	1.00	13.27	16.69	20.11	23.53	26.95
11007	1.00	10.94	13.81	16.67	19.54	22.40
11216	1.00	6.88	8.89	10.90	12.91	14.92
11400	0.99	8.08	10.44	12.80	15.15	17.51
11569	1.00	15.35	19.35	23.36	27.36	31.37
11792	1.00	13.51	17.06	20.60	24.15	27.69
11975	0.99	1.80	3.02	4.24	5.47	6.69
12200	1.00	0.72	1.87	3.02	4.16	5.31
12403	1.00	11.92	15.18	18.44	21.69	24.95
12607	1.00	5.67	7.59	9.52	11.44	13.36
12802	1.00	6.25	8.17	10.10	12.02	13.94
13004	1.00	5.81	7.90	9.99	12.08	14.17
13186	0.99	1.96	3.36	4.76	6.15	7.55
13398	1.00	5.69	7.82	9.94	12.07	14.19
13574	1.00	5.39	7.33	9.27	11.21	13.15
13804	0.99	2.55	4.02	5.48	6.94	8.40
14003	1.00	6.49	8.69	10.90	13.10	15.30
14206	0.99	3.47	5.15	6.83	8.51	10.20
14409	0.82	20.23	25.28	30.33	35.37	40.42
14595	1.00	3.45	4.94	6.43	7.92	9.41
14808	1.00	9.69	12.39	15.09	17.78	20.48
15006	1.00	6.71	9.05	11.38	13.72	16.06
Max	1.00	20.23	25.28	30.33	35.37	40.42
Min	0.82	0.72	1.87	3.02	4.16	5.31
Promedio	0.99	7.37	9.68	12.00	14.31	16.62
Desviacion	0.04	4.63	5.55	6.47	7.40	8.32



Geofono D(8) Tramo 1 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10000	1.00	2.72	3.63	4.53	5.44	6.35
10199	1.00	4.89	6.19	7.50	8.81	10.12
10402	0.97	4.78	5.90	7.03	8.15	9.27
10596	0.98	8.65	10.67	12.68	14.70	16.71
10799	0.99	11.45	14.03	16.62	19.20	21.79
11007	1.00	9.82	12.09	14.35	16.61	18.88
11216	1.00	4.87	6.07	7.28	8.48	9.68
11400	0.98	7.27	9.09	10.91	12.72	14.54
11569	1.00	13.52	16.53	19.55	22.57	25.59
11792	1.00	11.70	14.25	16.81	19.37	21.92
11975	0.99	1.23	1.86	2.50	3.13	3.76
12200	0.99	0.81	1.34	1.88	2.42	2.96
12403	1.00	9.77	11.97	14.18	16.38	18.59
12607	0.99	5.14	6.47	7.79	9.11	10.44
12802	1.00	5.25	6.47	7.69	8.91	10.13
13004	1.00	5.43	6.84	8.25	9.66	11.07
13186	0.99	2.15	2.93	3.72	4.50	5.29
13398	1.00	5.81	7.23	8.65	10.07	11.49
13574	1.00	4.16	5.36	6.55	7.75	8.94
13804	0.99	2.56	3.41	4.26	5.11	5.96
14003	0.99	5.42	6.77	8.13	9.48	10.83
14206	0.99	2.81	3.74	4.67	5.59	6.52
14409	1.00	7.14	8.77	10.41	12.04	13.68
14595	0.99	3.37	4.37	5.37	6.37	7.38
14808	1.00	9.06	11.10	13.14	15.18	17.22
15006	1.00	5.64	7.04	8.44	9.84	11.24
Max	1.00	13.52	16.53	19.55	22.57	25.59
Min	0.97	0.81	1.34	1.88	2.42	2.96
Promedio	0.99	5.98	7.47	8.96	10.45	11.94
Desviacion	0.01	3.35	3.99	4.64	5.28	5.92



Geofono D(9) Tramo 1 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
10000	1.00	38.78	44.55	50.33	56.11	61.88
10199	1.00	39.16	44.90	50.63	56.37	62.11
10402	1.00	35.13	40.29	45.45	50.62	55.78
10596	1.00	40.27	46.63	52.98	59.33	65.69
10799	1.00	45.84	53.22	60.60	67.98	75.35
11007	1.00	45.62	52.81	60.00	67.20	74.39
11216	1.00	41.69	47.77	53.85	59.93	66.01
11400	1.00	40.99	46.65	52.32	57.98	63.65
11569	1.00	52.04	60.47	68.90	77.33	85.76
11792	1.00	49.87	57.76	65.65	73.54	81.43
11975	1.00	29.79	34.22	38.66	43.09	47.52
12200	1.00	31.79	36.43	41.08	45.72	50.37
12403	1.00	47.39	54.82	62.26	69.69	77.12
12607	1.00	36.84	42.56	48.29	54.02	59.74
12802	1.00	43.85	49.00	54.16	59.32	64.48
13004	1.00	34.59	40.13	45.68	51.22	56.77
13186	1.00	31.15	35.70	40.25	44.80	49.35
13398	1.00	37.69	43.51	49.32	55.14	60.95
13574	1.00	39.44	45.10	50.77	56.43	62.10
13804	1.00	32.15	36.47	40.79	45.12	49.44
14003	1.00	51.48	58.45	65.41	72.37	79.33
14206	1.00	40.16	45.58	51.00	56.43	61.85
14409	1.00	47.90	54.75	61.60	68.45	75.30
14595	1.00	33.67	37.92	42.17	46.41	50.66
14808	0.99	50.08	55.46	60.85	66.23	71.62
15006	1.00	40.20	45.95	51.71	57.46	63.21
Max	1.00	52.04	60.47	68.90	77.33	85.76
Min	0.99	29.79	34.22	38.66	43.09	47.52
Promedio	1.00	40.68	46.58	52.49	58.40	64.30
Desviacion	0.00	6.60	7.57	8.57	9.60	10.66



Geofono D(1) Tramo 2 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16103	1.00	120.45	139.28	158.11	176.94	195.76
16301	1.00	135.19	156.00	176.81	197.62	218.42
16491	1.00	134.14	154.51	174.88	195.24	215.61
16702	1.00	120.71	139.33	157.95	176.57	195.19
16902	1.00	162.42	187.07	211.72	236.37	261.02
17095	1.00	132.44	152.83	173.21	193.60	213.98
17299	1.00	98.88	114.61	130.35	146.08	161.82
17506	1.00	45.50	53.55	61.60	69.66	77.71
17700	1.00	141.68	162.02	182.36	202.69	223.03
17903	1.00	100.95	116.56	132.16	147.77	163.37
18105	1.00	117.61	136.38	155.15	173.92	192.69
18304	1.00	154.23	177.24	200.24	223.25	246.25
18547	1.00	130.53	150.00	169.48	188.96	208.44
18700	1.00	125.30	143.74	162.19	180.63	199.08
18900	1.00	123.50	142.88	162.25	181.63	201.01
19103	1.00	104.42	120.49	136.57	152.64	168.71
19301	1.00	101.90	117.34	132.77	148.20	163.64
19504	1.00	107.18	124.30	141.42	158.55	175.67
19697	1.00	95.99	111.29	126.59	141.89	157.19
19900	1.00	119.83	137.92	156.02	174.11	192.20
20099	1.00	101.29	119.52	137.74	155.97	174.20
20301	1.00	86.25	99.65	113.05	126.45	139.85
20500	1.00	100.39	116.34	132.28	148.23	164.18
20701	1.00	54.31	64.53	74.74	84.96	95.17
20904	1.00	49.12	57.78	66.45	75.12	83.78
Max	1.00	162.42	187.07	211.72	236.37	261.02
Min	1.00	45.50	53.55	61.60	69.66	77.71
Promedio	1.00	110.57	127.81	145.04	162.28	179.52
Desviacion	0.00	29.47	33.44	37.42	41.40	45.39



Geofono D(2) Tramo 2 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16103	1.00	119.08	136.94	154.80	172.66	190.52
16301	1.00	132.79	152.27	171.76	191.24	210.73
16491	1.00	132.05	151.07	170.09	189.11	208.12
16702	1.00	116.91	134.24	151.57	168.91	186.24
16902	1.00	159.21	182.62	206.03	229.44	252.86
17095	1.00	129.95	148.84	167.74	186.63	205.53
17299	1.00	97.41	112.16	126.91	141.67	156.42
17506	1.00	44.88	51.80	58.73	65.65	72.58
17700	1.00	136.77	156.35	175.93	195.52	215.10
17903	1.00	98.93	113.41	127.89	142.37	156.84
18105	1.00	114.57	132.07	149.56	167.06	184.55
18304	1.00	151.19	173.09	194.99	216.89	238.79
18547	1.00	127.96	146.49	165.01	183.54	202.07
18700	1.00	122.11	139.32	156.52	173.73	190.94
18900	1.00	120.69	138.92	157.15	175.38	193.61
19103	1.00	100.88	115.86	130.84	145.82	160.80
19301	1.00	98.08	112.19	126.31	140.42	154.54
19504	1.00	104.64	120.52	136.39	152.26	168.13
19697	1.00	91.83	105.78	119.73	133.69	147.64
19900	1.00	116.63	133.58	150.53	167.48	184.43
20099	1.00	95.00	111.69	128.38	145.07	161.76
20301	1.00	82.56	94.91	107.26	119.62	131.97
20500	1.00	96.18	111.08	125.98	140.87	155.77
20701	1.00	54.10	63.14	72.19	81.23	90.27
20904	1.00	47.87	55.18	62.49	69.80	77.12
Max	1.00	159.21	182.62	206.03	229.44	252.86
Min	1.00	44.88	51.80	58.73	65.65	72.58
Promedio	1.00	107.69	123.74	139.79	155.84	171.89
Desviacion	0.00	28.97	32.95	36.93	40.92	44.92



Geofono D(3) Tramo 2 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16103	1.00	115.80	132.77	149.75	166.72	183.69
16301	1.00	129.11	147.47	165.83	184.19	202.55
16491	1.00	128.33	146.40	164.47	182.54	200.60
16702	1.00	112.19	128.56	144.94	161.31	177.68
16902	1.00	154.50	176.82	199.14	221.45	243.77
17095	1.00	125.80	143.82	161.84	179.85	197.87
17299	1.00	94.35	108.34	122.33	136.32	150.31
17506	1.00	42.47	48.75	55.04	61.32	67.60
17700	1.00	131.46	150.26	169.07	187.87	206.67
17903	1.00	95.52	109.08	122.63	136.19	149.75
18105	1.00	110.29	126.77	143.25	159.73	176.21
18304	1.00	146.24	167.12	187.99	208.87	229.74
18547	1.00	122.91	140.34	157.76	175.19	192.61
18700	1.00	117.19	133.61	150.03	166.45	182.87
18900	1.00	116.80	134.19	151.59	168.98	186.38
19103	1.00	96.33	110.47	124.61	138.75	152.89
19301	1.00	93.44	106.68	119.92	133.16	146.40
19504	1.00	100.25	115.29	130.34	145.38	160.43
19697	1.00	87.04	100.10	113.16	126.22	139.28
19900	1.00	112.10	128.22	144.34	160.46	176.58
20099	1.00	89.09	104.48	119.88	135.27	150.66
20301	1.00	78.09	89.64	101.18	112.72	124.26
20500	1.00	91.12	105.16	119.19	133.23	147.26
20701	1.00	51.76	60.00	68.23	76.47	84.71
20904	1.00	45.59	52.05	58.50	64.95	71.41
Max	1.00	154.50	176.82	199.14	221.45	243.77
Min	1.00	42.47	48.75	55.04	61.32	67.60
Promedio	1.00	103.51	118.66	133.80	148.94	164.09
Desviacion	0.00	28.44	32.34	36.26	40.18	44.10



Geofono D(4) Tramo 2 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16103	1.00	98.25	112.38	126.51	140.65	154.78
16301	1.00	110.06	125.49	140.92	156.35	171.78
16491	1.00	109.74	124.94	140.13	155.33	170.53
16702	1.00	91.47	104.78	118.09	131.40	144.71
16902	1.00	133.63	152.81	171.98	191.16	210.34
17095	1.00	106.39	121.48	136.57	151.66	166.75
17299	1.00	80.45	92.18	103.90	115.63	127.36
17506	1.00	31.43	36.03	40.62	45.21	49.81
17700	1.00	109.48	125.13	140.78	156.43	172.08
17903	1.00	79.13	90.36	101.59	112.82	124.05
18105	1.00	90.95	104.48	118.00	131.52	145.04
18304	1.00	125.35	143.11	160.87	178.64	196.40
18547	1.00	103.70	118.23	132.76	147.29	161.81
18700	1.00	97.70	111.14	124.57	138.00	151.44
18900	1.00	99.55	114.39	129.24	144.08	158.92
19103	1.00	78.28	89.62	100.97	112.31	123.66
19301	1.00	75.41	85.92	96.44	106.95	117.47
19504	1.00	83.09	95.40	107.71	120.02	132.33
19697	1.00	68.62	78.71	88.81	98.90	108.99
19900	1.00	93.99	107.32	120.65	133.98	147.31
20099	1.00	67.51	79.63	91.75	103.87	115.99
20301	1.00	61.63	70.67	79.71	88.75	97.79
20500	1.00	73.15	84.32	95.49	106.65	117.82
20701	1.00	40.66	47.11	53.55	60.00	66.44
20904	1.00	32.52	37.17	41.82	46.46	51.11
Max	1.00	133.63	152.81	171.98	191.16	210.34
Min	1.00	31.43	36.03	40.62	45.21	49.81
Promedio	1.00	85.69	98.11	110.54	122.96	135.39
Desviacion	0.00	26.13	29.67	33.23	36.79	40.35



Geofono D(5) Tramo 2 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16103	1.00	71.85	83.89	95.93	107.97	120.01
16301	1.00	82.41	95.52	108.64	121.76	134.87
16491	1.00	81.43	94.51	107.58	120.66	133.73
16702	1.00	63.42	74.28	85.15	96.01	106.88
16902	1.00	103.98	120.55	137.12	153.69	170.25
17095	1.00	78.74	91.49	104.23	116.98	129.72
17299	1.00	59.07	69.08	79.09	89.11	99.12
17506	1.00	14.52	18.16	21.79	25.43	29.07
17700	1.00	81.99	93.81	105.64	117.46	129.28
17903	1.00	55.86	65.27	74.67	84.07	93.47
18105	1.00	64.94	76.11	87.28	98.45	109.62
18304	1.00	96.01	110.95	125.89	140.84	155.78
18547	1.00	76.12	88.43	100.73	113.04	125.35
18700	1.00	70.07	81.23	92.38	103.54	114.70
18900	1.00	75.34	88.01	100.68	113.35	126.02
19103	1.00	54.10	63.24	72.38	81.52	90.66
19301	1.00	51.93	60.50	69.06	77.62	86.19
19504	1.00	59.89	70.23	80.58	90.93	101.27
19697	1.00	44.69	52.58	60.47	68.36	76.25
19900	1.00	69.01	80.02	91.02	102.03	113.04
20099	1.00	42.65	52.16	61.67	71.18	80.69
20301	1.00	40.62	47.85	55.07	62.30	69.53
20500	1.00	50.32	59.30	68.27	77.25	86.23
20701	1.00	23.12	28.81	34.50	40.19	45.88
20904	1.00	14.56	18.40	22.24	26.08	29.92
Max	1.00	103.98	120.55	137.12	153.69	170.25
Min	1.00	14.52	18.16	21.79	25.43	29.07
Promedio	1.00	61.07	71.37	81.68	91.99	102.30
Desviacion	0.00	22.79	25.85	28.92	31.99	35.06



Geofono D(6) Tramo 2 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16103.00	1.00	55.88	64.52	73.16	81.80	90.44
16301.00	1.00	64.38	73.93	83.48	93.03	102.58
16491.00	1.00	64.35	73.86	83.38	92.90	102.42
16702.00	1.00	46.90	54.37	61.85	69.32	76.79
16902.00	1.00	82.74	95.23	107.72	120.21	132.70
17095.00	1.00	61.34	70.60	79.86	89.11	98.37
17299.00	1.00	46.87	54.14	61.40	68.67	75.94
17506.00	1.00	11.03	13.15	15.27	17.39	19.51
17700.00	1.00	60.58	69.27	77.96	86.65	95.34
17903.00	1.00	42.24	48.83	55.42	62.01	68.60
18105.00	1.00	48.97	56.91	64.85	72.79	80.73
18304.00	1.00	73.95	84.85	95.75	106.65	117.54
18547.00	1.00	59.07	67.79	76.51	85.23	93.96
18700.00	1.00	52.50	60.31	68.12	75.93	83.73
18900.00	1.00	58.88	68.13	77.38	86.63	95.88
19103.00	1.00	39.92	46.15	52.39	58.62	64.85
19301.00	1.00	38.90	44.75	50.60	56.45	62.30
19504.00	1.00	46.19	53.56	60.92	68.29	75.66
19697.00	1.00	32.17	37.31	42.45	47.59	52.73
19900.00	1.00	51.84	59.64	67.44	75.23	83.03
20099.00	1.00	30.71	37.15	43.59	50.03	56.47
20301.00	1.00	29.08	33.96	38.85	43.74	48.62
20500.00	1.00	36.19	42.50	48.82	55.13	61.44
20701.00	1.00	19.38	23.13	26.88	30.64	34.39
20904.00	1.00	11.54	13.70	15.85	18.00	20.15
Max	1.00	82.74	95.23	107.72	120.21	132.70
Min	1.00	11.03	13.15	15.27	17.39	19.51
Promedio	1.00	46.62	53.91	61.20	68.48	75.77
Desviacion	0.00	18.02	20.46	22.91	25.36	27.82



Geofono D(7) Tramo 2 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16103	1.00	36.33	42.50	48.67	54.84	61.02
16301	1.00	43.05	49.89	56.73	63.57	70.41
16491	1.00	42.81	49.72	56.64	63.56	70.48
16702	1.00	28.05	33.41	38.76	44.11	49.46
16902	1.00	57.85	67.17	76.49	85.81	95.13
17095	1.00	40.75	47.49	54.24	60.98	67.73
17299	1.00	30.77	36.16	41.54	46.92	52.30
17506	1.00	4.12	5.75	7.38	9.02	10.65
17700	1.00	38.94	44.57	50.19	55.82	61.45
17903	1.00	26.05	30.73	35.41	40.09	44.77
18105	1.00	31.01	36.78	42.56	48.33	54.11
18304	1.00	49.34	57.19	65.04	72.89	80.74
18547	1.00	39.15	45.44	51.72	58.01	64.29
18700	1.00	32.89	38.28	43.67	49.05	54.44
18900	1.00	39.85	46.61	53.36	60.12	66.87
19103	1.00	23.92	28.13	32.35	36.56	40.78
19301	1.00	24.50	28.59	32.68	36.77	40.87
19504	1.00	30.64	36.09	41.53	46.97	52.42
19697	0.99	18.83	22.19	25.56	28.93	32.30
19900	1.00	33.37	38.75	44.14	49.52	54.91
20099	1.00	19.33	23.77	28.21	32.65	37.09
20301	1.00	17.00	20.48	23.95	27.43	30.91
20500	1.00	22.85	27.33	31.82	36.30	40.78
20701	1.00	10.62	13.61	16.61	19.61	22.60
20904	0.99	4.10	5.72	7.35	8.97	10.60
Max	1.00	57.85	67.17	76.49	85.81	95.13
Min	0.99	4.10	5.72	7.35	8.97	10.60
Promedio	1.00	29.84	35.05	40.26	45.47	50.68
Desviacion	0.00	13.20	14.98	16.75	18.54	20.32



Geofono D(8) Tramo 2 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16103	1.00	22.87	26.59	30.31	34.02	37.74
16301	1.00	27.00	31.10	35.20	39.30	43.40
16491	1.00	27.50	32.01	36.52	41.03	45.54
16702	1.00	17.62	20.94	24.26	27.58	30.90
16902	1.00	38.79	44.94	51.09	57.25	63.40
17095	1.00	25.63	29.84	34.05	38.27	42.48
17299	1.00	19.89	23.25	26.60	29.96	33.31
17506	1.00	2.70	3.63	4.56	5.50	6.43
17700	1.00	22.43	25.68	28.92	32.16	35.40
17903	1.00	15.60	18.31	21.01	23.71	26.42
18105	1.00	20.15	23.79	27.43	31.07	34.70
18304	1.00	30.19	34.98	39.77	44.55	49.34
18547	1.00	24.32	28.28	32.23	36.19	40.15
18700	1.00	19.10	22.24	25.38	28.52	31.66
18900	1.00	25.42	29.75	34.07	38.39	42.71
19103	1.00	13.12	15.44	17.76	20.08	22.40
19301	1.00	15.21	17.70	20.20	22.69	25.18
19504	1.00	20.35	24.01	27.67	31.33	34.99
19697	1.00	10.34	12.19	14.05	15.90	17.75
19900	1.00	19.51	22.64	25.78	28.92	32.05
20099	1.00	12.89	15.87	18.85	21.83	24.81
20301	1.00	10.53	12.65	14.76	16.88	18.99
20500	1.00	14.61	17.50	20.39	23.28	26.17
20701	1.00	8.85	10.75	12.64	14.53	16.42
20904	0.99	3.45	4.28	5.10	5.92	6.74
Max	1.00	38.79	44.94	51.09	57.25	63.40
Min	0.99	2.70	3.63	4.56	5.50	6.43
Promedio	1.00	18.72	21.93	25.14	28.35	31.56
Desviacion	0.00	8.35	9.53	10.71	11.90	13.09



Geofono D(9) Tramo 2 Carril Izquierdo

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16103	1.00	113.23	129.16	145.08	161.01	176.94
16301	1.00	128.58	146.63	164.68	182.73	200.78
16491	1.00	129.40	147.04	164.68	182.32	199.95
16702	1.00	115.81	132.07	148.33	164.59	180.85
16902	1.00	157.53	179.61	201.70	223.78	245.86
17095	1.00	128.28	146.41	164.53	182.66	200.79
17299	1.00	95.36	108.97	122.59	136.21	149.82
17506	1.00	43.22	49.08	54.94	60.81	66.67
17700	1.00	131.19	149.93	168.67	187.41	206.15
17903	1.00	96.00	109.23	122.45	135.68	148.91
18105	1.00	112.77	129.23	145.69	162.15	178.61
18304	1.00	145.02	165.23	185.44	205.66	225.87
18547	1.00	121.00	137.69	154.38	171.07	187.77
18700	1.00	117.50	133.29	149.08	164.86	180.65
18900	1.00	117.58	134.51	151.44	168.37	185.30
19103	1.00	98.14	111.95	125.77	139.59	153.41
19301	1.00	94.61	107.59	120.57	133.56	146.54
19504	1.00	100.63	115.10	129.58	144.05	158.52
19697	1.00	88.82	101.63	114.45	127.26	140.08
19900	1.00	111.86	127.48	143.11	158.73	174.35
20099	1.00	95.05	110.46	125.87	141.28	156.69
20301	1.00	78.81	89.82	100.83	111.84	122.85
20500	1.00	91.43	104.91	118.39	131.88	145.36
20701	1.00	52.70	60.41	68.13	75.84	83.56
20904	1.00	45.99	52.27	58.55	64.83	71.11
Max	1.00	157.53	179.61	201.70	223.78	245.86
Min	1.00	43.22	49.08	54.94	60.81	66.67
Promedio	1.00	104.42	119.19	133.96	148.73	163.50
Desviacion	0.00	28.29	32.21	36.14	40.07	44.01



Geofono D(1) Tramo 2 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16000	1.00	61.60	72.14	82.69	93.23	103.77
16204	1.00	40.37	47.37	54.37	61.38	68.38
16397	1.00	93.57	110.58	127.60	144.61	161.62
16605	1.00	74.47	86.73	98.99	111.26	123.52
16799	1.00	58.02	68.85	79.68	90.51	101.33
16996	1.00	75.08	87.74	100.40	113.06	125.73
17209	1.00	70.36	82.96	95.55	108.14	120.74
17398	1.00	58.55	69.67	80.79	91.91	103.04
17605	1.00	52.51	62.31	72.11	81.92	91.72
17813	1.00	35.66	41.69	47.73	53.76	59.79
17999	1.00	62.35	73.04	83.73	94.41	105.10
18203	1.00	65.67	76.15	86.62	97.10	107.58
18397	1.00	71.45	83.82	96.19	108.56	120.93
18604	1.00	62.80	73.20	83.61	94.01	104.41
18797	1.00	78.36	91.74	105.11	118.48	131.86
19005	1.00	83.92	97.62	111.32	125.02	138.72
19199	1.00	111.48	128.57	145.65	162.73	179.82
19406	1.00	57.10	67.35	77.60	87.85	98.10
19610	1.00	106.96	122.96	138.96	154.96	170.96
19803	1.00	72.35	84.06	95.77	107.48	119.19
20002	1.00	73.23	86.33	99.44	112.54	125.65
20201	1.00	103.19	120.56	137.93	155.30	172.67
20399	1.00	71.55	83.90	96.26	108.61	120.96
20606	1.00	81.95	96.88	111.80	126.72	141.65
20805	1.00	94.91	111.59	128.26	144.94	161.62
20998	1.00	63.68	74.13	84.59	95.05	105.50
Max	1.00	111.48	128.57	145.65	162.73	179.82
Min	1.00	35.66	41.69	47.73	53.76	59.79
Promedio	1.00	72.35	84.69	97.03	109.37	121.71
Desviacion	0.00	18.69	21.53	24.38	27.24	30.12



Geofono D(2) Tramo 2 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16000	1.00	60.10	69.48	78.85	88.23	97.60
16204	1.00	39.47	45.34	51.21	57.08	62.95
16397	1.00	93.94	109.84	125.74	141.64	157.53
16605	1.00	72.53	83.56	94.59	105.62	116.66
16799	1.00	57.77	67.42	77.08	86.73	96.39
16996	1.00	74.36	85.97	97.57	109.18	120.79
17209	1.00	69.33	80.83	92.33	103.84	115.34
17398	1.00	58.06	68.10	78.14	88.19	98.23
17605	1.00	52.26	61.03	69.79	78.56	87.33
17813	1.00	35.54	40.48	45.42	50.36	55.30
17999	1.00	62.33	71.76	81.20	90.64	100.08
18203	1.00	64.83	74.16	83.48	92.81	102.13
18397	1.00	70.50	81.70	92.89	104.08	115.27
18604	1.00	62.45	71.85	81.25	90.65	100.05
18797	1.00	78.16	90.35	102.54	114.73	126.92
19005	1.00	81.93	94.42	106.92	119.42	131.91
19199	1.00	108.83	124.41	139.99	155.57	171.14
19406	1.00	57.28	66.39	75.50	84.61	93.72
19610	1.00	104.38	119.35	134.33	149.30	164.27
19803	1.00	71.07	81.59	92.11	102.63	113.14
20002	1.00	73.38	85.12	96.86	108.60	120.33
20201	1.00	101.99	117.88	133.76	149.64	165.53
20399	1.00	71.95	83.19	94.42	105.66	116.89
20606	1.00	82.70	96.48	110.25	124.03	137.81
20805	1.00	96.15	111.51	126.87	142.23	157.59
20998	1.00	63.30	72.58	81.85	91.13	100.40
Max	1.00	108.83	124.41	139.99	155.57	171.14
Min	1.00	35.54	40.48	45.42	50.36	55.30
Promedio	1.00	71.71	82.88	94.04	105.20	116.36
Desviacion	0.00	18.42	21.21	24.01	26.83	29.65



Geofono D(3) Tramo 2 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16000	1.00	56.99	65.62	74.25	82.88	91.51
16204	1.00	37.14	42.35	47.56	52.77	57.98
16397	1.00	90.99	106.08	121.18	136.27	151.36
16605	1.00	69.32	79.33	89.34	99.35	109.36
16799	1.00	55.34	64.23	73.11	82.00	90.88
16996	1.00	71.81	82.70	93.58	104.46	115.35
17209	1.00	66.75	77.48	88.21	98.94	109.66
17398	1.00	55.99	65.25	74.52	83.78	93.05
17605	1.00	50.24	58.36	66.48	74.60	82.72
17813	1.00	33.77	38.18	42.59	46.99	51.40
17999	1.00	59.34	68.17	77.00	85.83	94.66
18203	1.00	61.76	70.38	79.00	87.62	96.25
18397	1.00	67.72	78.17	88.62	99.06	109.51
18604	1.00	60.20	68.97	77.73	86.50	95.27
18797	1.00	75.68	87.14	98.59	110.04	121.49
19005	1.00	78.51	90.33	102.16	113.98	125.80
19199	1.00	104.76	119.25	133.73	148.22	162.70
19406	1.00	55.39	63.93	72.47	81.01	89.55
19610	1.00	101.00	115.02	129.03	143.05	157.07
19803	1.00	68.19	77.91	87.64	97.36	107.08
20002	1.00	70.84	81.87	92.89	103.92	114.95
20201	1.00	98.07	112.94	127.82	142.70	157.58
20399	1.00	69.50	80.01	90.52	101.03	111.54
20606	1.00	80.54	93.43	106.33	119.22	132.11
20805	1.00	94.18	108.68	123.18	137.68	152.18
20998	1.00	60.79	69.44	78.10	86.75	95.41
Max	1.00	104.76	119.25	133.73	148.22	162.70
Min	1.00	33.77	38.18	42.59	46.99	51.40
Promedio	1.00	69.03	79.43	89.83	100.23	110.63
Desviacion	0.00	18.04	20.73	23.43	26.14	28.86



Geofono D(4) Tramo 2 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16000	1.00	44.58	51.35	58.12	64.89	71.67
16204	1.00	26.23	29.79	33.36	36.93	40.49
16397	1.00	78.88	91.71	104.55	117.39	130.23
16605	1.00	53.10	60.90	68.71	76.51	84.31
16799	1.00	43.80	50.80	57.81	64.81	71.81
16996	0.99	59.87	68.82	77.76	86.70	95.64
17209	1.00	54.55	63.30	72.06	80.81	89.57
17398	1.00	44.44	51.82	59.20	66.59	73.97
17605	1.00	39.44	45.75	52.06	58.37	64.68
17813	1.00	24.77	27.76	30.75	33.75	36.74
17999	1.00	46.64	53.52	60.39	67.27	74.14
18203	1.00	48.87	55.53	62.20	68.86	75.53
18397	1.00	54.45	62.92	71.39	79.86	88.33
18604	1.00	48.20	55.20	62.21	69.21	76.21
18797	1.00	62.61	72.09	81.56	91.04	100.52
19005	1.00	63.02	72.41	81.79	91.17	100.56
19199	1.00	85.47	97.16	108.86	120.56	132.26
19406	1.00	44.80	51.51	58.21	64.92	71.63
19610	1.00	83.25	94.65	106.05	117.44	128.84
19803	1.00	54.04	61.69	69.33	76.98	84.63
20002	1.00	58.72	67.83	76.94	86.05	95.16
20201	1.00	79.90	91.94	103.98	116.02	128.07
20399	1.00	57.06	65.60	74.14	82.68	91.21
20606	1.00	68.17	79.06	89.96	100.86	111.76
20805	1.00	82.29	94.80	107.31	119.83	132.34
20998	1.00	47.65	54.57	61.49	68.42	75.34
Max	1.00	85.47	97.16	108.86	120.56	132.34
Min	0.99	24.77	27.76	30.75	33.75	36.74
Promedio	1.00	55.95	64.33	72.70	81.07	89.45
Desviacion	0.00	16.27	18.72	21.17	23.63	26.09



Geofono D(5) Tramo 2 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16000	1.00	25.80	31.74	37.68	43.62	49.56
16204	1.00	10.67	13.52	16.38	19.23	22.08
16397	1.00	57.40	69.06	80.72	92.39	104.05
16605	1.00	30.61	37.05	43.49	49.93	56.37
16799	1.00	24.55	30.87	37.18	43.49	49.81
16996	0.99	39.97	47.81	55.65	63.48	71.32
17209	1.00	34.97	42.63	50.30	57.97	65.64
17398	1.00	26.08	32.53	38.99	45.44	51.89
17605	1.00	21.91	27.45	32.99	38.54	44.08
17813	1.00	9.73	12.48	15.24	17.99	20.75
17999	1.00	27.04	33.02	39.00	44.98	50.96
18203	1.00	28.68	34.33	39.99	45.64	51.30
18397	1.00	33.87	41.08	48.29	55.50	62.71
18604	1.00	29.11	35.15	41.19	47.23	53.27
18797	1.00	40.87	49.18	57.49	65.80	74.11
19005	1.00	40.22	48.06	55.90	63.73	71.57
19199	1.00	58.01	67.70	77.38	87.06	96.75
19406	1.00	26.31	32.24	38.16	44.09	50.02
19610	1.00	57.83	67.33	76.82	86.31	95.80
19803	1.00	33.15	39.51	45.88	52.25	58.61
20002	1.00	38.62	46.69	54.77	62.85	70.93
20201	1.00	53.41	63.81	74.20	84.59	94.99
20399	1.00	36.42	43.89	51.36	58.83	66.30
20606	1.00	45.69	55.60	65.51	75.42	85.33
20805	1.00	60.41	72.04	83.68	95.31	106.95
20998	1.00	27.69	33.76	39.83	45.90	51.98
Max	1.00	60.41	72.04	83.68	95.31	106.95
Min	0.99	9.73	12.48	15.24	17.99	20.75
Promedio	1.00	35.35	42.64	49.93	57.22	64.50
Desviacion	0.00	13.74	15.91	18.10	20.30	22.51



Geofono D(6) Tramo 2 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16000	1.00	21.67	25.85	30.04	34.22	38.40
16204	1.00	7.41	8.95	10.49	12.02	13.56
16397	1.00	49.58	58.42	67.25	76.08	84.92
16605	1.00	23.16	27.53	31.89	36.26	40.63
16799	1.00	21.37	25.88	30.39	34.91	39.42
16996	0.99	33.71	39.38	45.04	50.71	56.38
17209	1.00	29.77	35.36	40.95	46.55	52.14
17398	1.00	21.97	26.44	30.92	35.39	39.87
17605	1.00	18.42	22.30	26.18	30.06	33.94
17813	1.00	7.62	9.15	10.69	12.23	13.76
17999	1.00	21.33	25.29	29.25	33.22	37.18
18203	1.00	23.37	27.29	31.21	35.14	39.06
18397	1.00	26.64	31.61	36.58	41.54	46.51
18604	1.00	22.88	26.94	31.00	35.06	39.11
18797	1.00	33.45	39.37	45.29	51.20	57.12
19005	1.00	30.98	36.31	41.65	46.98	52.32
19199	1.00	43.00	49.40	55.81	62.22	68.62
19406	1.00	21.71	25.73	29.76	33.78	37.81
19610	1.00	43.64	50.17	56.70	63.23	69.76
19803	1.00	24.97	29.13	33.29	37.45	41.61
20002	1.00	32.90	38.64	44.37	50.11	55.85
20201	1.00	44.41	52.10	59.79	67.48	75.17
20399	1.00	29.82	35.11	40.39	45.68	50.96
20606	1.00	39.19	46.35	53.51	60.67	67.82
20805	1.00	54.42	63.37	72.31	81.26	90.20
20998	1.00	22.03	26.21	30.39	34.57	38.75
Max	1.00	54.42	63.37	72.31	81.26	90.20
Min	0.99	7.41	8.95	10.49	12.02	13.56
Promedio	1.00	28.82	33.93	39.04	44.15	49.26
Desviacion	0.00	11.60	13.37	15.14	16.92	18.70



Geofono D(7) Tramo 2 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16000	1.00	13.27	16.80	20.33	23.86	27.39
16204	0.99	1.29	2.37	3.45	4.53	5.61
16397	1.00	35.79	43.08	50.38	57.67	64.97
16605	1.00	12.45	15.78	19.12	22.45	25.79
16799	1.00	13.50	17.11	20.71	24.31	27.92
16996	0.99	21.96	26.41	30.86	35.31	39.76
17209	1.00	19.93	24.42	28.91	33.41	37.90
17398	1.00	12.92	16.52	20.12	23.72	27.32
17605	0.99	10.95	13.82	16.70	19.58	22.46
17813	1.00	1.48	2.66	3.84	5.01	6.19
17999	1.00	11.51	14.55	17.59	20.63	23.67
18203	0.99	13.56	16.74	19.92	23.11	26.29
18397	1.00	15.36	19.13	22.89	26.65	30.42
18604	1.00	12.32	15.48	18.63	21.79	24.94
18797	1.00	20.69	25.14	29.60	34.06	38.52
19005	1.00	17.58	21.49	25.40	29.31	33.21
19199	0.99	24.70	29.14	33.59	38.03	42.47
19406	1.00	12.08	15.24	18.39	21.54	24.69
19610	1.00	26.30	30.98	35.65	40.33	45.00
19803	1.00	13.21	16.24	19.27	22.29	25.32
20002	1.00	20.85	25.55	30.24	34.93	39.62
20201	1.00	30.47	36.56	42.66	48.75	54.85
20399	0.99	18.69	22.83	26.97	31.11	35.25
20606	1.00	26.18	32.11	38.04	43.97	49.91
20805	1.00	41.76	49.38	56.99	64.61	72.23
20998	1.00	12.58	16.06	19.53	23.00	26.47
Max	1.00	41.76	49.38	56.99	64.61	72.23
Min	0.99	1.29	2.37	3.45	4.53	5.61
Promedio	1.00	17.75	21.75	25.76	29.77	33.78
Desviacion	0.00	9.25	10.74	12.22	13.72	15.21



Geofono D(8) Tramo 2 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16000	0.99	12.09	14.72	17.36	19.99	22.62
16204	0.99	1.15	1.64	2.13	2.61	3.10
16397	1.00	29.60	35.00	40.40	45.80	51.20
16605	1.00	9.59	11.79	13.99	16.19	18.38
16799	1.00	11.82	14.64	17.46	20.28	23.10
16996	0.98	17.53	20.51	23.49	26.47	29.44
17209	1.00	16.96	20.36	23.76	27.16	30.56
17398	1.00	11.09	13.60	16.11	18.61	21.12
17605	1.00	9.08	11.26	13.44	15.63	17.81
17813	0.99	1.52	2.08	2.64	3.19	3.75
17999	1.00	9.01	10.91	12.82	14.72	16.62
18203	0.99	11.64	13.79	15.95	18.11	20.26
18397	1.00	11.16	13.64	16.13	18.61	21.09
18604	1.00	9.19	11.14	13.09	15.04	16.99
18797	1.00	14.43	17.35	20.26	23.18	26.10
19005	1.00	12.01	14.48	16.95	19.42	21.89
19199	1.00	13.95	16.27	18.59	20.91	23.23
19406	1.00	9.90	11.97	14.04	16.11	18.18
19610	1.00	17.04	20.14	23.23	26.33	29.43
19803	1.00	8.73	10.49	12.26	14.02	15.78
20002	1.00	16.34	19.35	22.36	25.36	28.37
20201	1.00	25.02	29.75	34.49	39.23	43.97
20399	1.00	14.70	17.45	20.21	22.97	25.72
20606	1.00	21.13	25.30	29.47	33.65	37.82
20805	1.00	36.91	43.06	49.21	55.36	61.51
20998	1.00	11.50	13.94	16.39	18.83	21.28
Max	1.00	36.91	43.06	49.21	55.36	61.51
Min	0.98	1.15	1.64	2.13	2.61	3.10
Promedio	1.00	13.96	16.72	19.47	22.22	24.97
Desviacion	0.00	7.68	8.92	10.17	11.41	12.66



Geofono D(9) Tramo 2 Carril Derecho

Abscisa	r ²	35	40	45	50	55
16000	1.00	59.52	68.03	76.54	85.05	93.56
16204	1.00	38.47	43.40	48.33	53.25	58.18
16397	1.00	91.86	106.46	121.05	135.65	150.24
16605	1.00	70.33	80.14	89.95	99.76	109.57
16799	1.00	57.38	65.81	74.25	82.69	91.13
16996	0.99	73.39	83.41	93.43	103.45	113.47
17209	1.00	68.30	78.65	89.00	99.35	109.70
17398	1.00	56.63	65.42	74.20	82.98	91.77
17605	1.00	50.30	57.72	65.14	72.56	79.98
17813	1.00	33.68	37.61	41.53	45.46	49.39
17999	1.00	59.72	67.96	76.21	84.46	92.70
18203	1.00	62.58	70.69	78.81	86.92	95.03
18397	1.00	68.18	78.25	88.32	98.38	108.45
18604	1.00	60.66	68.85	77.05	85.24	93.44
18797	1.00	76.68	87.58	98.49	109.39	120.30
19005	1.00	80.43	91.90	103.36	114.83	126.30
19199	1.00	106.80	121.11	135.42	149.73	164.04
19406	1.00	55.89	63.90	71.90	79.91	87.92
19610	1.00	102.49	115.80	129.11	142.43	155.74
19803	1.00	70.02	79.41	88.81	98.20	107.60
20002	1.00	72.11	82.82	93.53	104.24	114.95
20201	1.00	97.70	111.92	126.13	140.35	154.56
20399	1.00	68.74	78.47	88.20	97.93	107.66
20606	1.00	82.11	94.53	106.96	119.38	131.80
20805	1.00	95.61	109.77	123.93	138.09	152.26
20998	1.00	60.97	69.24	77.51	85.78	94.05
Max	1.00	106.80	121.11	135.42	149.73	164.04
Min	0.99	33.68	37.61	41.53	45.46	49.39
Promedio	1.00	70.02	79.96	89.89	99.83	109.76
Desviacion	0.00	18.24	20.91	23.61	26.31	29.02



7.2 Normalización de deflexiones

Carril	Abscisa	D(1)					
		Est carga 40KN	μm				
			AASHTO				
		40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)	
1/L	10098	119.54	119.00	119.94	119.91	120.59	120.95
1/L	10301	184.39	184.20	184.28	184.13	185.33	185.80
1/L	10504	165.39	163.83	165.82	167.12	168.39	169.59
1/L	10702	172.43	169.11	174.12	176.29	179.31	180.61
1/L	10901	144.74	143.42	144.77	146.45	148.43	149.42
1/L	11103	145.72	142.84	145.46	148.35	149.97	150.76
1/L	11298	177.35	175.39	177.68	180.00	181.74	182.23
1/L	11500	160.20	157.72	159.48	162.53	164.79	166.31
1/L	11723	142.09	139.87	141.04	143.79	146.47	147.60
1/L	11915	131.29	130.11	131.09	133.39	135.01	135.83
1/L	12100	162.18	161.00	162.40	163.83	165.19	165.98
1/L	12303	208.67	207.35	208.55	210.25	211.67	212.56
1/L	12498	167.48	165.21	167.82	168.69	170.80	172.26
1/L	12701	179.04	178.45	178.75	179.76	180.92	182.12
1/L	12899	186.72	186.32	186.63	187.36	187.34	188.42
1/L	13102	167.32	165.16	167.83	169.34	170.95	172.50
1/L	13305	177.12	176.91	176.94	177.24	178.26	178.81
1/L	13499	177.89	177.23	177.29	178.57	179.87	181.17
1/L	13699	175.69	175.56	175.23	175.46	176.68	177.61
1/L	13910	182.78	182.41	182.51	183.42	184.91	186.75
1/L	14104	166.39	164.00	166.34	169.17	171.03	171.56
1/L	14299	190.95	188.89	191.67	191.98	193.60	194.32
1/L	14505	157.69	156.37	158.06	158.86	160.21	160.79
1/L	14693	149.56	148.06	150.30	149.62	151.48	152.42
1/L	14904	230.97	230.04	230.91	232.18	231.31	231.24
1/L	16103	139.28	137.83	138.88	139.93	140.84	142.83
1/L	16301	156.00	154.38	155.66	156.72	158.26	158.84
1/L	16491	154.51	153.29	154.63	155.51	155.87	157.06
1/L	16702	139.33	137.94	139.51	140.14	141.30	141.80
1/L	16902	187.07	186.05	186.95	187.37	188.80	190.20
1/L	17095	152.83	151.34	152.50	153.71	154.60	155.66
1/L	17299	114.61	112.75	114.21	115.65	116.68	117.48
1/L	17506	53.55	51.82	52.90	54.35	55.65	56.62
1/L	17700	162.02	159.95	160.96	162.28	163.67	
1/L	17903	116.56	115.39	116.47	117.01	118.11	118.91
1/L	18105	136.38	134.73	136.60	137.59	138.68	140.23
1/L	18304	177.24	176.25	176.93	177.48	179.00	178.97
1/L	18547	150.00	149.15	150.09	150.41	151.14	151.69
1/L	18700	143.74	143.74	143.33	143.86	144.33	145.13
1/L	18900	142.88	140.84	142.67	143.55	145.44	146.17
1/L	19103	120.49	119.97	119.99	121.12	121.90	122.90
1/L	19301	117.34	116.95	117.28	117.44	118.58	119.15
1/L	19504	124.30	122.97	124.17	125.69	126.75	127.87
1/L	19697	111.29	109.90	111.41	112.42	113.01	114.77
1/L	19900	137.92	137.64	137.78	138.28	139.46	140.02
1/L	20099	119.52	117.37	119.22	122.06	125.43	127.15
1/L	20301	99.65	99.24	99.43	100.09	101.04	101.90
1/L	20500	116.34	114.92	116.03	117.25	118.49	119.25
1/L	20701	64.53	60.75	63.89	65.92	67.49	68.52
1/L	20904	57.78	55.04	56.99	58.89	60.05	60.31



Carril	Abscisa	D(1) μm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/R	10000	49.82	49.81	48.29	51.01	52.15	52.84
1/R	10199	50.22	48.55	49.94	51.28	52.45	53.24
1/R	10402	45.09	43.64	44.64	46.24	46.99	47.94
1/R	10596	50.78	48.25	50.16	51.85	54.24	54.45
1/R	10799	56.53	54.06	55.79	58.21	60.04	61.42
1/R	11007	57.85	56.01	57.70	59.28	60.63	61.96
1/R	11216	52.51	50.13	51.95	53.74	54.98	56.00
1/R	11400	50.70	48.71	50.65	51.56	52.64	53.61
1/R	11569	63.19	61.02	63.00	64.99	66.79	68.45
1/R	11792	60.34	57.09	60.05	62.03	63.74	65.19
1/R	11975	37.31	34.83	37.32	38.61	39.88	40.80
1/R	12200	39.66	38.13	39.44	40.73	42.10	42.79
1/R	12403	58.31	56.14	58.21	59.82	61.62	62.75
1/R	12607	45.10	42.62	44.24	46.61	47.86	49.09
1/R	12802	54.38	53.65	54.13	54.79	54.99	55.07
1/R	13004	42.50	39.43	41.86	43.66	45.64	46.96
1/R	13186	39.98	37.27	40.42	41.52	42.17	43.59
1/R	13398	46.83	43.26	46.55	47.92	49.96	51.18
1/R	13574	50.71	48.00	50.09	51.86	52.81	54.34
1/R	13804	38.93	36.42	38.70	40.27	41.02	41.78
1/R	14003	63.86	62.78	63.99	64.88	65.89	66.33
1/R	14206	49.03	46.51	49.16	50.01	51.10	51.93
1/R	14409	57.47	54.84	57.53	59.21	60.28	61.38
1/R	14595	39.09	37.03	39.08	40.02	40.71	41.32
1/R	14808	59.26	58.67	59.24	60.28	58.85	59.70
1/R	15006	49.24	46.39	49.12	50.33	51.69	52.82
1/R	16000	72.14	70.75	71.69	72.90	74.14	75.41
1/R	16204	47.37	45.66	47.01	48.22	48.80	49.44
1/R	16397	110.58	107.48	109.40	112.17	115.08	118.25
1/R	16605	86.73	85.03	86.65	87.64	88.77	89.84
1/R	16799	68.85	66.09	68.34	70.57	71.84	73.04
1/R	16996	87.74	87.62	86.25	88.58	90.01	91.78
1/R	17209	82.96	80.69	81.96	84.11	86.36	87.58
1/R	17398	69.67	67.89	69.94	71.55	73.29	75.05
1/R	17605	62.31	60.14	62.60	63.97	65.06	66.65
1/R	17813	41.69	40.52	41.19	42.47	42.80	43.27
1/R	17999	73.04	70.72	72.89	73.94	75.28	76.16
1/R	18203	76.15	74.75	75.74	77.09	77.69	77.91
1/R	18397	83.82	81.84	83.13	85.11	86.49	87.74
1/R	18604	73.20	71.81	72.98	74.56	75.12	75.55
1/R	18797	91.74	89.95	91.97	93.70	94.46	95.90
1/R	19005	97.62	96.20	97.78	98.55	100.04	100.79
1/R	19199	128.57	126.66	129.01	129.93	130.35	130.49
1/R	19406	67.35	65.70	66.79	68.32	69.98	71.17
1/R	19610	122.96	122.25	123.09	123.51	124.15	124.15
1/R	19803	84.06	82.83	83.76	85.03	85.93	86.61
1/R	20002	86.33	83.15	86.19	87.60	89.67	91.23
1/R	20201	120.56	117.72	120.01	122.00	124.01	125.33
1/R	20399	83.90	80.73	83.41	84.62	86.47	87.63
1/R	20606	96.88	92.85	96.51	98.78	101.05	102.43
1/R	20805	111.59	106.95	110.53	113.46	115.63	117.01
1/R	20998	74.13	72.71	73.95	75.20	75.98	76.53



Carril	Abscisa	D(2)					
		Est carga 40KN	μm				
			AASHTO				
		40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)	
1/L	10098	117.30	117.91	117.30	116.34	116.40	116.66
1/L	10301	179.76	180.18	179.90	178.96	179.74	179.87
1/L	10504	162.62	162.25	162.86	162.95	163.66	164.67
1/L	10702	168.57	166.57	169.65	170.81	173.52	174.47
1/L	10901	140.46	139.96	140.61	141.06	142.29	143.69
1/L	11103	141.07	139.23	141.02	142.62	143.73	144.41
1/L	11298	174.76	173.53	175.01	176.38	177.40	177.88
1/L	11500	156.97	155.80	156.25	158.29	159.75	161.11
1/L	11723	138.43	137.23	137.79	139.20	141.09	142.10
1/L	11915	128.64	128.37	128.53	129.17	130.37	130.82
1/L	12100	158.58	158.44	158.37	158.89	159.95	159.80
1/L	12303	201.79	201.38	201.61	202.43	202.98	203.46
1/L	12498	163.16	162.13	163.68	163.26	164.59	165.79
1/L	12701	173.96	174.63	173.42	173.54	174.39	175.44
1/L	12899	183.41	183.77	182.95	183.66	182.91	183.42
1/L	13102	164.66	163.58	165.10	165.40	166.57	167.85
1/L	13305	172.24	173.07	171.78	171.61	172.08	172.37
1/L	13499	172.04	172.50	171.44	171.89	172.41	173.00
1/L	13699	171.87	172.89	171.53	170.99	171.59	172.30
1/L	13910	178.55	178.65	178.47	178.64	179.12	180.72
1/L	14104	161.65	160.11	161.49	163.69	164.54	165.05
1/L	14299	186.97	186.49	187.26	186.90	187.95	188.64
1/L	14505	153.59	153.47	153.45	153.75	154.51	154.73
1/L	14693	141.97	141.75	142.32	141.27	142.86	143.45
1/L	14904	208.38	208.24	208.59	208.70	207.73	206.89
1/L	16103	136.94	136.55	136.68	137.05	137.32	139.18
1/L	16301	152.27	152.15	151.85	152.25	153.07	153.41
1/L	16491	151.07	151.31	150.78	151.10	150.84	151.83
1/L	16702	134.24	133.60	134.36	134.54	135.21	135.36
1/L	16902	182.62	182.52	182.54	182.34	183.26	184.31
1/L	17095	148.84	148.81	148.77	148.69	149.06	149.73
1/L	17299	112.16	111.46	111.89	112.38	113.28	113.75
1/L	17506	51.80	51.82	51.15	51.79	52.43	53.05
1/L	17700	156.35	155.75	155.56	156.36	157.23	
1/L	17903	113.41	113.31	113.49	113.12	113.63	114.41
1/L	18105	132.07	131.56	131.85	132.68	133.14	134.54
1/L	18304	173.09	172.99	172.98	172.89	173.62	173.75
1/L	18547	146.49	145.96	146.68	146.79	146.83	146.89
1/L	18700	139.32	140.58	138.61	138.51	138.86	139.39
1/L	18900	138.92	138.26	138.41	139.05	140.42	140.92
1/L	19103	115.86	115.92	115.38	116.00	116.54	117.15
1/L	19301	112.19	112.63	111.94	111.78	112.28	112.68
1/L	19504	120.52	120.06	120.23	121.15	121.80	122.37
1/L	19697	105.78	105.39	105.72	106.07	106.58	107.84
1/L	19900	133.58	134.38	132.75	133.25	134.11	134.52
1/L	20099	111.69	110.10	111.16	113.83	116.62	118.07
1/L	20301	94.91	94.97	94.69	94.83	95.66	96.20
1/L	20500	111.08	110.11	110.98	111.45	112.72	113.21
1/L	20701	63.14	61.23	62.74	63.76	64.81	65.29
1/L	20904	55.18	54.55	54.76	55.42	55.98	55.88



Carril	Abscisa	D(2) µm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/R	10000	46.15	46.15	45.30	46.82	47.43	48.19
1/R	10199	47.06	46.20	46.95	47.43	48.28	48.99
1/R	10402	43.11	42.39	42.99	43.61	43.88	44.79
1/R	10596	48.49	46.97	47.98	48.94	51.09	50.78
1/R	10799	54.11	52.65	53.19	55.27	56.63	57.82
1/R	11007	54.19	52.95	54.02	55.29	55.96	56.98
1/R	11216	50.79	49.90	50.31	51.18	52.01	52.84
1/R	11400	47.86	47.18	47.59	48.10	48.86	49.54
1/R	11569	61.50	60.24	61.17	62.66	63.90	65.16
1/R	11792	58.93	56.97	58.66	59.86	61.21	62.20
1/R	11975	36.17	35.07	36.02	36.70	37.58	38.07
1/R	12200	37.21	36.55	37.04	37.72	38.34	38.79
1/R	12403	56.88	55.69	56.82	57.52	59.03	59.95
1/R	12607	43.59	42.27	42.98	44.33	45.28	46.12
1/R	12802	52.28	52.82	52.15	52.24	51.90	51.81
1/R	13004	41.37	39.54	40.93	42.06	43.19	44.34
1/R	13186	37.82	36.68	37.77	38.57	38.95	39.84
1/R	13398	45.57	43.50	45.24	46.05	47.73	48.41
1/R	13574	50.06	49.21	49.57	50.30	50.97	51.90
1/R	13804	37.45	36.42	37.07	38.27	38.31	38.77
1/R	14003	61.41	61.32	61.15	61.76	61.96	62.25
1/R	14206	47.30	46.15	47.37	47.77	48.20	48.53
1/R	14409	56.52	55.90	56.13	57.11	57.59	58.33
1/R	14595	38.23	37.62	38.36	38.39	38.65	38.84
1/R	14808	57.80	58.21	57.91	58.18	56.51	56.93
1/R	15006	48.56	47.84	48.22	48.69	49.52	50.29
1/R	16000	69.48	69.15	69.03	69.75	70.24	71.11
1/R	16204	45.34	44.96	45.31	45.51	45.62	45.71
1/R	16397	109.84	108.31	108.68	110.40	112.96	115.31
1/R	16605	83.56	83.38	83.20	83.66	84.21	85.15
1/R	16799	67.42	66.09	67.01	68.31	69.00	69.85
1/R	16996	85.97	86.73	84.61	85.91	87.16	88.27
1/R	17209	80.83	79.54	80.21	81.35	83.01	83.79
1/R	17398	68.10	67.33	68.09	68.95	70.41	71.66
1/R	17605	61.03	59.91	61.02	62.01	62.60	63.49
1/R	17813	40.48	40.88	40.25	40.47	40.20	40.33
1/R	17999	71.76	71.56	71.39	71.56	72.62	72.86
1/R	18203	74.16	74.17	73.85	74.46	74.27	74.18
1/R	18397	81.70	80.92	81.17	82.30	82.93	83.87
1/R	18604	71.85	71.36	71.65	72.52	72.47	72.57
1/R	18797	90.35	89.83	90.23	90.98	91.70	92.44
1/R	19005	94.42	93.84	94.49	94.72	95.60	95.92
1/R	19199	124.41	124.34	124.35	124.57	124.48	124.40
1/R	19406	66.39	65.93	65.97	66.57	67.65	68.14
1/R	19610	119.35	119.44	119.39	119.08	119.57	119.51
1/R	19803	81.59	81.36	81.41	81.88	81.98	82.34
1/R	20002	85.12	83.98	85.07	85.22	86.57	87.73
1/R	20201	117.88	116.43	117.60	118.51	119.82	120.15
1/R	20399	83.19	82.07	82.89	83.23	84.15	85.13
1/R	20606	96.48	94.38	95.89	97.51	99.07	99.96
1/R	20805	111.51	109.66	110.32	112.27	113.80	114.47
1/R	20998	72.58	72.71	72.14	72.61	73.03	73.04



Carril	Abscisa	D(3) µm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/L	10098	112.96	113.99	112.79	111.32	111.33	111.00
1/L	10301	173.52	174.89	173.19	172.36	172.85	172.84
1/L	10504	157.81	157.75	157.90	157.74	158.20	158.39
1/L	10702	163.18	161.37	164.05	165.50	167.26	168.54
1/L	10901	134.80	135.27	134.04	134.90	136.23	137.08
1/L	11103	135.92	134.95	135.86	136.80	137.26	137.76
1/L	11298	170.26	169.50	170.37	171.38	171.96	172.30
1/L	11500	152.63	152.19	151.91	153.42	154.31	155.19
1/L	11723	133.40	132.42	132.72	134.17	135.71	136.24
1/L	11915	125.05	124.89	124.97	125.48	125.89	126.39
1/L	12100	152.87	153.09	152.53	152.92	153.23	153.26
1/L	12303	193.86	193.97	193.41	194.24	194.53	195.16
1/L	12498	157.28	157.21	157.31	156.95	157.98	158.88
1/L	12701	168.60	169.68	168.08	167.85	168.09	168.90
1/L	12899	177.80	178.23	177.68	177.71	176.74	177.34
1/L	13102	159.78	159.53	159.82	159.96	160.68	161.87
1/L	13305	166.02	166.98	166.03	164.99	164.88	165.20
1/L	13499	164.74	165.93	164.01	164.05	164.41	164.83
1/L	13699	165.98	167.55	165.67	164.87	164.96	165.67
1/L	13910	173.00	173.78	172.55	172.78	172.86	174.55
1/L	14104	155.61	154.33	155.45	157.24	158.21	158.24
1/L	14299	180.71	180.56	180.79	180.47	181.51	181.64
1/L	14505	148.40	148.79	148.16	148.03	148.67	148.82
1/L	14693	135.22	135.44	135.53	134.26	135.59	135.86
1/L	14904	194.43	194.92	194.34	194.56	193.17	192.31
1/L	16103	132.77	132.71	132.50	132.82	132.98	133.92
1/L	16301	147.47	148.27	147.33	146.52	147.39	147.69
1/L	16491	146.40	147.12	145.97	146.16	145.64	146.31
1/L	16702	128.56	128.46	128.31	128.66	129.27	129.14
1/L	16902	176.82	177.06	177.02	176.12	176.92	177.71
1/L	17095	143.82	144.10	143.80	143.58	143.53	144.23
1/L	17299	108.34	108.07	108.04	108.45	108.91	109.42
1/L	17506	48.75	49.19	48.26	48.41	48.97	49.47
1/L	17700	150.26	150.06	149.85	149.83	151.03	
1/L	17903	109.08	109.49	109.29	108.33	108.84	109.25
1/L	18105	126.77	126.58	126.60	127.05	127.37	128.48
1/L	18304	167.12	167.40	167.07	166.78	167.09	167.22
1/L	18547	140.34	140.61	140.49	139.92	139.96	140.33
1/L	18700	133.61	134.74	133.01	132.89	133.14	133.36
1/L	18900	134.19	133.92	133.74	134.19	135.15	135.75
1/L	19103	110.47	110.64	110.06	110.53	110.86	111.40
1/L	19301	106.68	107.41	106.32	106.04	106.62	106.73
1/L	19504	115.29	115.02	115.18	115.48	116.28	116.88
1/L	19697	100.10	100.06	99.83	100.24	100.62	101.77
1/L	19900	128.22	128.88	127.72	127.69	128.51	128.72
1/L	20099	104.48	103.41	103.77	106.11	108.85	109.99
1/L	20301	89.64	89.91	89.36	89.39	90.12	90.64
1/L	20500	105.16	104.27	105.11	105.57	106.46	107.09
1/L	20701	60.00	58.96	59.61	60.38	60.88	61.52
1/L	20904	52.05	52.24	51.99	51.94	52.00	51.97



Carril	Abscisa	D(3) µm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/R	10000	42.45	42.49	41.74	42.90	43.63	44.06
1/R	10199	43.18	42.69	42.87	43.49	44.11	44.74
1/R	10402	40.02	39.56	39.78	40.34	40.78	41.50
1/R	10596	45.17	43.84	44.88	45.49	47.27	47.03
1/R	10799	51.25	50.29	50.29	51.98	53.47	54.37
1/R	11007	50.17	49.09	50.14	50.95	51.70	52.69
1/R	11216	47.78	47.27	47.23	48.07	48.64	49.46
1/R	11400	44.54	43.98	44.43	44.64	45.33	45.83
1/R	11569	58.60	57.57	58.23	59.63	60.69	61.95
1/R	11792	56.14	54.71	55.86	56.69	57.96	59.00
1/R	11975	33.42	32.61	33.31	33.80	34.46	34.96
1/R	12200	34.23	33.72	34.13	34.52	35.23	35.56
1/R	12403	54.09	53.31	53.84	54.59	55.80	56.78
1/R	12607	40.31	39.19	39.70	41.14	41.61	42.46
1/R	12802	48.91	49.85	48.71	48.73	48.47	47.94
1/R	13004	38.86	37.55	38.35	39.43	40.25	41.27
1/R	13186	35.30	34.66	35.21	35.80	35.89	36.67
1/R	13398	42.33	41.08	41.81	42.58	43.94	44.52
1/R	13574	47.42	47.04	46.88	47.54	48.05	48.73
1/R	13804	35.11	34.74	34.84	35.36	35.52	35.99
1/R	14003	57.32	57.30	57.13	57.49	57.70	57.73
1/R	14206	44.32	43.87	44.19	44.50	44.73	45.35
1/R	14409	53.70	53.55	53.43	53.77	54.32	54.84
1/R	14595	35.90	36.07	35.78	35.67	36.01	36.06
1/R	14808	54.43	55.33	54.31	54.61	52.91	53.24
1/R	15006	46.31	46.14	46.02	46.24	46.69	47.46
1/R	16000	65.62	65.62	65.05	65.77	66.25	66.58
1/R	16204	42.35	42.75	42.14	42.25	42.18	42.27
1/R	16397	106.08	105.11	104.93	106.33	108.63	110.91
1/R	16605	79.33	79.98	78.66	78.97	79.57	79.79
1/R	16799	64.23	63.55	63.62	64.87	65.31	65.97
1/R	16996	82.70	83.71	81.52	82.35	83.27	84.47
1/R	17209	77.48	76.66	76.80	77.93	79.08	79.70
1/R	17398	65.25	64.89	65.08	65.81	66.89	67.92
1/R	17605	58.36	57.76	58.36	58.70	59.55	60.26
1/R	17813	38.18	38.86	38.17	38.02	37.52	37.55
1/R	17999	68.17	68.09	67.88	68.09	68.63	68.96
1/R	18203	70.38	70.70	70.27	70.28	70.28	69.93
1/R	18397	78.17	77.70	77.88	78.31	79.12	79.70
1/R	18604	68.97	68.79	68.90	69.23	69.16	69.22
1/R	18797	87.14	87.00	86.95	87.38	87.97	88.55
1/R	19005	90.33	90.35	90.00	90.17	91.56	91.48
1/R	19199	119.25	119.80	119.20	118.86	118.54	118.32
1/R	19406	63.93	64.00	63.52	63.73	64.66	65.32
1/R	19610	115.02	115.72	114.61	114.56	114.49	114.36
1/R	19803	77.91	78.30	77.63	77.73	77.87	78.00
1/R	20002	81.87	81.15	81.61	82.01	82.98	83.72
1/R	20201	112.94	112.44	112.48	113.00	114.31	114.59
1/R	20399	80.01	79.88	79.23	79.98	80.60	81.34
1/R	20606	93.43	92.14	92.94	93.97	95.27	96.00
1/R	20805	108.68	108.06	107.19	109.17	110.22	110.72
1/R	20998	69.44	69.93	68.94	69.30	69.52	69.47



Carril	Abscisa	D(4) µm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/L	10098	93.05	94.07	92.80	91.66	91.53	91.39
1/L	10301	147.84	148.81	148.26	146.68	146.68	146.27
1/L	10504	135.38	135.47	135.30	135.42	135.50	135.90
1/L	10702	138.13	136.50	138.97	140.18	141.60	142.87
1/L	10901	110.81	111.05	110.46	110.66	112.00	112.26
1/L	11103	111.86	111.16	111.70	112.52	113.09	113.31
1/L	11298	147.77	147.34	147.85	148.28	148.77	148.73
1/L	11500	129.55	129.04	128.99	130.15	131.31	131.72
1/L	11723	111.26	110.61	110.62	111.71	113.24	113.74
1/L	11915	105.65	105.65	105.51	105.80	106.48	106.57
1/L	12100	128.87	129.25	128.57	128.52	129.14	128.90
1/L	12303	162.33	162.90	161.86	162.14	162.19	162.47
1/L	12498	130.95	130.82	130.94	130.85	131.53	132.11
1/L	12701	143.01	144.25	142.29	142.23	142.59	143.31
1/L	12899	151.91	152.53	151.83	151.53	150.47	150.71
1/L	13102	136.61	136.11	136.88	136.93	137.45	138.33
1/L	13305	138.25	139.54	138.06	136.91	137.24	137.02
1/L	13499	133.91	135.02	133.27	133.30	133.41	133.60
1/L	13699	140.95	142.47	140.70	139.87	140.07	140.18
1/L	13910	147.80	148.56	147.33	147.45	147.73	148.63
1/L	14104	131.37	130.33	131.49	132.42	133.20	133.09
1/L	14299	154.42	154.46	154.24	154.36	154.94	155.24
1/L	14505	125.28	125.72	125.04	124.88	125.35	125.41
1/L	14693	108.12	108.44	108.17	107.50	108.22	108.59
1/L	14904	150.52	151.33	150.71	150.05	148.97	147.84
1/L	16103	112.38	112.59	112.49	111.96	112.18	112.95
1/L	16301	125.49	126.40	125.31	124.68	125.18	125.17
1/L	16491	124.94	126.15	124.51	124.04	123.91	124.60
1/L	16702	104.78	104.71	104.83	104.61	105.20	105.29
1/L	16902	152.81	153.15	152.96	152.15	152.76	153.30
1/L	17095	121.48	121.80	121.63	121.05	121.16	121.51
1/L	17299	92.18	92.16	92.06	92.01	92.50	92.70
1/L	17506	36.03	36.42	35.78	35.62	36.11	36.48
1/L	17700	125.13	125.26	124.72	124.86	125.57	
1/L	17903	90.36	90.63	90.51	89.86	90.20	90.42
1/L	18105	104.48	104.50	104.21	104.60	104.90	105.78
1/L	18304	143.11	143.54	143.12	142.59	143.04	142.93
1/L	18547	118.23	118.66	118.30	117.79	117.76	117.81
1/L	18700	111.14	112.51	110.58	110.18	110.37	110.54
1/L	18900	114.39	113.98	114.05	114.46	115.38	115.64
1/L	19103	89.62	90.09	89.17	89.52	89.58	90.26
1/L	19301	85.92	86.52	85.88	85.21	85.57	85.68
1/L	19504	95.40	95.33	95.28	95.42	96.06	96.37
1/L	19697	78.71	78.87	78.53	78.62	78.91	79.60
1/L	19900	107.32	108.09	106.72	106.79	107.35	107.35
1/L	20099	79.63	78.66	79.00	80.97	83.78	84.75
1/L	20301	70.67	71.03	70.30	70.59	70.81	71.40
1/L	20500	84.32	83.87	84.17	84.47	85.25	85.75
1/L	20701	47.11	46.14	47.00	47.42	47.81	48.19
1/L	20904	37.17	37.38	37.00	37.04	37.18	37.25



Carril	Abscisa	D(4) µm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/R	10000	30.39	30.29	29.98	30.86	31.04	31.38
1/R	10199	30.90	30.61	30.64	31.05	31.59	32.07
1/R	10402	30.08	29.81	29.97	30.25	30.48	31.01
1/R	10596	35.03	34.21	34.64	35.11	36.82	36.32
1/R	10799	41.41	40.99	40.49	41.74	43.08	43.72
1/R	11007	38.14	37.41	37.90	38.91	39.25	39.80
1/R	11216	36.78	36.65	36.55	36.65	37.16	37.92
1/R	11400	33.89	33.58	33.73	34.07	34.24	34.80
1/R	11569	47.87	47.22	47.48	48.56	49.56	50.23
1/R	11792	45.47	44.58	45.17	45.75	46.81	47.66
1/R	11975	24.10	23.61	23.98	24.35	24.78	25.03
1/R	12200	23.93	23.76	23.72	24.11	24.44	24.78
1/R	12403	43.98	43.35	43.80	44.40	45.31	45.89
1/R	12607	30.23	29.48	29.88	30.74	31.04	31.71
1/R	12802	36.90	37.74	36.71	36.81	36.36	36.11
1/R	13004	29.43	28.51	29.04	29.73	30.54	31.23
1/R	13186	25.01	24.69	24.88	25.36	25.30	25.77
1/R	13398	31.60	30.78	31.34	31.73	32.56	33.07
1/R	13574	36.32	36.28	36.09	36.23	36.52	37.06
1/R	13804	25.88	25.84	25.60	26.09	26.00	26.20
1/R	14003	42.19	42.22	41.94	42.34	42.62	42.81
1/R	14206	32.63	32.48	32.57	32.72	32.74	32.99
1/R	14409	41.65	41.69	41.25	41.73	42.15	42.42
1/R	14595	27.21	27.35	27.22	27.07	27.11	27.17
1/R	14808	42.06	42.88	42.09	41.98	40.69	41.24
1/R	15006	36.39	36.31	36.29	36.16	36.68	37.18
1/R	16000	51.35	51.27	51.06	51.41	51.81	52.18
1/R	16204	29.79	30.09	29.75	29.75	29.55	29.50
1/R	16397	91.71	91.04	91.01	91.63	93.53	95.48
1/R	16605	60.90	61.19	60.50	60.74	61.17	61.53
1/R	16799	50.80	50.29	50.38	51.21	51.66	52.14
1/R	16996	68.82	69.85	67.75	68.46	69.13	70.05
1/R	17209	63.30	62.71	62.84	63.36	64.79	65.07
1/R	17398	51.82	51.67	51.56	52.19	53.21	54.02
1/R	17605	45.75	45.28	45.72	46.01	46.72	47.03
1/R	17813	27.76	28.84	27.56	27.40	27.05	26.94
1/R	17999	53.52	53.58	53.27	53.35	53.84	54.02
1/R	18203	55.53	55.89	55.62	55.39	55.05	55.00
1/R	18397	62.92	62.55	62.53	63.09	63.89	64.22
1/R	18604	55.20	55.15	55.12	55.28	55.43	55.38
1/R	18797	72.09	71.93	71.99	72.27	72.79	73.25
1/R	19005	72.41	72.35	72.24	72.42	73.05	73.16
1/R	19199	97.16	97.70	97.10	96.79	96.51	96.09
1/R	19406	51.51	51.52	51.39	51.35	51.84	52.21
1/R	19610	94.65	95.32	94.51	93.94	93.96	93.89
1/R	19803	61.69	61.98	61.47	61.59	61.61	61.59
1/R	20002	67.83	67.39	67.46	68.01	68.64	69.37
1/R	20201	91.94	91.55	91.59	91.96	93.09	93.04
1/R	20399	65.60	65.39	65.31	65.43	66.03	66.46
1/R	20606	79.06	78.14	78.45	79.46	80.73	81.18
1/R	20805	94.80	94.60	93.83	94.63	95.90	96.50
1/R	20998	54.57	54.88	54.21	54.30	54.96	54.85



Carril	Abscisa	D(5) µm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/L	10098	66.17	65.54	66.54	66.98	67.38	68.28
1/L	10301	112.07	110.77	112.54	112.53	113.29	113.40
1/L	10504	102.71	100.70	103.65	104.58	105.58	106.78
1/L	10702	103.92	100.36	105.82	107.98	110.31	111.70
1/L	10901	79.20	77.34	79.63	81.30	82.98	84.03
1/L	11103	79.29	76.89	78.95	81.52	83.08	83.81
1/L	11298	114.02	111.76	113.98	117.93	117.61	118.13
1/L	11500	96.91	94.16	96.39	99.48	101.30	102.40
1/L	11723	80.96	77.91	80.51	83.04	85.47	86.41
1/L	11915	78.21	76.85	78.44	79.96	81.81	82.54
1/L	12100	95.61	94.04	96.29	97.19	98.55	98.87
1/L	12303	120.89	119.44	121.12	122.39	123.25	124.14
1/L	12498	96.60	94.03	96.99	98.27	99.82	101.31
1/L	12701	108.47	107.34	108.40	109.58	110.88	111.92
1/L	12899	117.11	115.87	117.23	118.50	118.51	119.44
1/L	13102	104.21	101.89	104.86	106.26	107.84	108.95
1/L	13305	102.21	101.61	102.06	102.84	103.50	104.23
1/L	13499	95.67	94.32	95.39	96.86	97.90	98.94
1/L	13699	107.86	106.94	107.81	107.94	109.27	109.83
1/L	13910	114.45	113.83	114.22	115.37	116.42	117.90
1/L	14104	98.92	96.67	99.01	101.24	103.52	103.79
1/L	14299	119.16	117.18	119.55	120.37	122.01	122.49
1/L	14505	93.74	92.73	93.78	94.87	96.11	96.66
1/L	14693	75.26	72.92	76.08	76.07	77.81	78.76
1/L	14904	107.15	105.59	107.47	108.52	107.96	107.45
1/L	16103	83.89	81.65	83.69	85.25	85.65	87.45
1/L	16301	95.52	93.94	95.27	96.31	97.54	98.02
1/L	16491	94.51	92.95	94.59	95.91	96.20	97.44
1/L	16702	74.28	72.51	74.41	75.41	76.87	77.53
1/L	16902	120.55	118.99	120.50	121.23	122.74	124.04
1/L	17095	91.49	89.86	91.17	92.41	93.49	94.25
1/L	17299	69.08	67.13	68.99	69.97	70.99	71.95
1/L	17506	18.16	16.00	18.05	19.00	20.02	21.31
1/L	17700	93.81	91.24	92.99	94.24	95.45	
1/L	17903	65.27	63.43	65.47	65.97	67.33	67.84
1/L	18105	76.11	74.27	76.37	77.43	78.62	79.54
1/L	18304	110.95	109.43	110.66	111.85	112.70	113.20
1/L	18547	88.43	86.92	88.36	89.49	90.38	91.22
1/L	18700	81.23	80.12	81.06	82.19	82.69	83.50
1/L	18900	88.01	85.61	87.77	89.03	90.76	91.58
1/L	19103	63.24	62.12	62.86	64.38	65.03	65.94
1/L	19301	60.50	59.49	60.81	60.88	62.20	62.63
1/L	19504	70.23	68.92	69.92	71.87	72.65	73.67
1/L	19697	52.58	50.96	52.81	53.92	54.29	55.69
1/L	19900	80.02	79.10	80.31	80.76	81.87	82.22
1/L	20099	52.16	49.72	52.41	54.70	57.35	59.00
1/L	20301	47.85	46.75	47.89	48.75	49.79	50.55
1/L	20500	59.30	57.40	59.38	60.30	61.60	62.54
1/L	20701	28.81	25.04	28.24	30.23	31.65	32.68
1/L	20904	18.40	15.46	17.65	19.75	20.41	21.25



Carril	Abscisa	D(5) µm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/R	10000	16.16	16.16	14.65	17.57	18.05	18.84
1/R	10199	17.06	14.89	17.31	18.26	19.23	20.06
1/R	10402	16.92	15.30	16.64	18.08	18.79	19.85
1/R	10596	21.68	19.02	21.30	22.83	25.05	24.86
1/R	10799	27.37	24.85	26.99	28.84	30.67	31.95
1/R	11007	23.35	21.20	23.48	24.89	26.14	27.06
1/R	11216	21.15	18.62	20.74	22.39	23.76	24.47
1/R	11400	19.88	17.26	19.97	21.13	22.26	22.95
1/R	11569	32.07	29.84	31.85	34.10	35.46	36.95
1/R	11792	29.76	26.22	29.78	31.46	33.29	34.38
1/R	11975	11.06	8.88	11.04	12.26	13.37	14.03
1/R	12200	10.30	8.60	10.31	11.42	12.67	13.26
1/R	12403	28.59	26.26	28.71	30.09	31.90	32.89
1/R	12607	15.87	13.48	15.10	17.33	18.56	19.44
1/R	12802	20.60	19.11	20.13	20.91	22.15	22.76
1/R	13004	15.98	13.14	15.61	17.03	18.70	19.77
1/R	13186	10.94	8.43	10.82	12.77	13.31	14.51
1/R	13398	16.63	13.21	16.52	17.88	19.29	20.35
1/R	13574	19.59	16.81	19.19	20.69	21.73	22.89
1/R	13804	12.16	9.50	12.09	13.45	14.36	15.06
1/R	14003	23.12	21.56	23.42	24.51	25.84	26.64
1/R	14206	16.61	13.78	16.88	17.67	18.85	19.68
1/R	14409	23.62	20.90	23.67	25.57	26.38	27.60
1/R	14595	13.10	10.99	12.79	14.12	15.00	15.73
1/R	14808	24.29	22.25	24.02	25.79	25.87	27.01
1/R	15006	20.95	17.85	21.05	21.99	23.51	24.66
1/R	16000	31.74	29.62	31.35	32.98	34.21	35.93
1/R	16204	13.52	11.85	13.02	14.36	14.98	15.83
1/R	16397	69.06	65.50	68.46	70.92	73.21	76.17
1/R	16605	37.05	34.53	37.31	38.36	39.54	40.92
1/R	16799	30.87	28.03	30.07	32.84	34.08	35.57
1/R	16996	47.81	47.28	46.26	49.14	50.53	51.90
1/R	17209	42.63	39.65	42.07	44.18	46.08	47.39
1/R	17398	32.53	30.67	32.98	34.34	36.09	37.85
1/R	17605	27.45	24.85	27.94	29.39	30.43	31.82
1/R	17813	12.48	10.49	12.17	13.52	14.07	14.75
1/R	17999	33.02	29.97	33.04	34.32	35.65	36.62
1/R	18203	34.33	32.17	33.92	35.78	36.40	36.87
1/R	18397	41.08	38.57	40.59	42.78	43.87	45.32
1/R	18604	35.15	33.33	34.80	37.06	37.56	38.26
1/R	18797	49.18	46.79	49.89	51.37	52.34	53.76
1/R	19005	48.06	46.02	48.29	49.59	51.07	51.73
1/R	19199	67.70	65.48	68.07	69.54	69.65	70.09
1/R	19406	32.24	30.18	31.91	33.38	35.03	36.07
1/R	19610	67.33	66.14	67.69	68.17	69.16	69.51
1/R	19803	39.51	37.85	39.38	40.67	41.80	42.46
1/R	20002	46.69	43.40	46.50	48.24	50.05	51.23
1/R	20201	63.81	60.33	63.57	65.59	67.52	68.59
1/R	20399	43.89	40.18	43.54	45.04	46.42	47.80
1/R	20606	55.60	51.07	55.29	57.96	59.99	61.28
1/R	20805	72.04	67.43	71.15	73.87	76.00	77.19
1/R	20998	33.76	31.49	33.67	35.28	36.56	37.56



Carril	Abscisa	D(6) µm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/L	10098	50.92	51.06	50.86	50.81	50.71	50.81
1/L	10301	85.99	85.95	86.39	85.69	85.74	85.72
1/L	10504	80.81	80.23	80.95	81.56	81.59	81.94
1/L	10702	80.63	78.59	81.79	82.92	84.02	85.00
1/L	10901	61.05	60.49	60.98	61.93	62.65	63.28
1/L	11103	59.03	57.61	59.03	60.29	60.81	61.11
1/L	11298	90.89	89.93	91.06	92.16	92.61	92.60
1/L	11500	75.46	73.72	75.50	76.84	77.75	78.14
1/L	11723	62.35	60.70	62.05	63.45	64.93	65.45
1/L	11915	60.76	60.22	60.85	61.51	62.16	62.58
1/L	12100	72.75	72.31	72.81	73.30	73.84	73.86
1/L	12303	89.19	89.13	88.69	89.75	90.19	90.58
1/L	12498	72.44	71.41	72.64	73.05	73.77	74.55
1/L	12701	84.13	84.05	83.99	84.23	84.75	85.03
1/L	12899	91.53	91.39	91.47	92.06	90.98	91.64
1/L	13102	80.66	79.59	80.94	81.73	82.05	82.82
1/L	13305	76.20	76.66	75.97	75.83	76.10	76.19
1/L	13499	68.23	68.49	67.82	68.17	68.57	68.81
1/L	13699	84.27	84.41	84.17	83.94	84.54	84.71
1/L	13910	90.25	90.15	90.27	90.40	90.73	91.62
1/L	14104	75.21	74.00	75.25	76.50	77.64	77.68
1/L	14299	91.80	91.08	92.01	92.09	92.98	93.29
1/L	14505	71.82	71.55	71.83	72.08	72.55	72.73
1/L	14693	53.71	52.94	53.94	53.97	54.67	55.13
1/L	14904	77.08	76.68	77.37	77.43	76.86	76.47
1/L	16103	64.52	63.62	64.62	64.93	65.10	65.90
1/L	16301	73.93	73.72	73.77	73.93	74.46	74.69
1/L	16491	73.86	73.62	73.90	74.07	74.08	74.70
1/L	16702	54.37	53.67	54.40	54.79	55.53	55.76
1/L	16902	95.23	94.73	95.11	95.52	96.01	96.66
1/L	17095	70.60	70.21	70.55	70.70	71.11	71.67
1/L	17299	54.14	53.45	54.12	54.37	54.90	55.16
1/L	17506	13.15	12.54	12.99	13.34	13.91	14.23
1/L	17700	69.27	68.60	68.87	69.18	70.00	
1/L	17903	48.83	48.26	48.74	49.14	49.58	49.90
1/L	18105	56.91	56.27	56.76	57.58	58.03	58.77
1/L	18304	84.85	84.52	84.73	85.05	85.30	85.50
1/L	18547	67.79	67.46	67.82	67.97	68.18	68.34
1/L	18700	60.31	60.23	60.11	60.44	60.65	61.05
1/L	18900	68.13	67.19	67.99	68.47	69.34	69.74
1/L	19103	46.15	45.83	45.97	46.51	46.79	47.23
1/L	19301	44.75	44.51	44.82	44.89	45.06	45.37
1/L	19504	53.56	53.26	53.25	53.99	54.75	55.07
1/L	19697	37.31	36.94	37.30	37.59	37.88	38.57
1/L	19900	59.64	59.55	59.60	59.68	60.30	60.49
1/L	20099	37.15	35.75	37.25	38.58	40.37	41.25
1/L	20301	33.96	33.49	33.97	34.31	34.96	35.41
1/L	20500	42.50	41.48	42.39	43.01	44.13	44.55
1/L	20701	23.13	21.69	22.82	23.66	24.28	24.77
1/L	20904	13.70	12.66	13.82	13.99	14.14	14.57



Carril	Abscisa	D(6) µm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/R	10000	11.26	11.18	10.55	11.95	12.33	12.76
1/R	10199	13.05	12.08	12.93	13.69	14.24	14.69
1/R	10402	13.06	12.24	12.92	13.72	13.89	14.46
1/R	10596	18.51	16.93	18.51	19.01	20.40	20.22
1/R	10799	23.32	22.14	22.89	23.94	25.31	25.95
1/R	11007	19.85	18.82	19.70	20.72	21.47	21.78
1/R	11216	16.07	15.04	15.81	16.54	17.26	17.56
1/R	11400	16.27	14.90	16.31	17.03	17.36	17.85
1/R	11569	27.08	25.72	27.09	28.21	29.02	29.93
1/R	11792	24.94	23.24	24.78	25.86	26.70	27.37
1/R	11975	8.21	7.25	8.23	8.81	9.11	9.40
1/R	12200	7.07	6.34	7.11	7.58	7.93	8.36
1/R	12403	23.50	22.41	23.54	24.13	25.20	25.63
1/R	12607	13.36	12.45	12.99	14.05	14.32	14.79
1/R	12802	15.50	14.84	15.33	15.80	16.05	16.16
1/R	13004	13.50	12.20	13.23	14.02	14.78	15.35
1/R	13186	8.68	7.72	8.75	9.29	9.51	9.94
1/R	13398	13.77	12.24	13.70	14.32	15.00	15.49
1/R	13574	14.97	14.15	14.52	15.36	15.88	16.24
1/R	13804	9.55	8.53	9.34	10.18	10.50	10.69
1/R	14003	17.10	16.42	17.15	17.83	18.30	18.70
1/R	14206	12.36	11.15	12.51	12.90	13.23	13.46
1/R	14409	18.66	17.50	18.68	19.42	19.93	20.48
1/R	14595	10.73	9.91	10.62	11.14	11.37	11.82
1/R	14808	20.00	19.14	19.92	20.67	20.59	21.16
1/R	15006	16.88	15.66	16.84	17.35	17.84	18.48
1/R	16000	25.85	24.84	25.53	26.49	27.23	27.76
1/R	16204	8.95	8.25	8.79	9.33	9.54	9.71
1/R	16397	58.42	57.11	58.00	58.61	60.64	62.28
1/R	16605	27.53	26.31	27.54	28.16	28.93	29.48
1/R	16799	25.88	24.11	25.76	27.05	27.46	28.27
1/R	16996	39.38	39.79	38.14	39.80	40.45	41.15
1/R	17209	35.36	34.01	35.04	35.97	37.09	37.81
1/R	17398	26.44	25.56	26.65	27.26	28.25	29.03
1/R	17605	22.30	21.11	22.41	23.14	24.02	24.55
1/R	17813	9.15	8.46	9.05	9.53	9.72	9.86
1/R	17999	25.29	23.97	25.33	25.81	26.42	26.86
1/R	18203	27.29	26.38	27.07	27.97	28.26	28.06
1/R	18397	31.61	30.42	31.42	32.27	33.02	33.71
1/R	18604	26.94	26.17	26.84	27.73	27.88	28.28
1/R	18797	39.37	38.18	39.66	40.57	40.82	41.40
1/R	19005	36.31	35.67	36.22	36.83	37.66	37.98
1/R	19199	49.40	48.74	49.54	50.02	49.84	49.67
1/R	19406	25.73	25.08	25.39	26.13	26.96	27.40
1/R	19610	50.17	49.92	49.94	50.64	50.81	50.52
1/R	19803	29.13	28.56	28.94	29.67	29.96	30.17
1/R	20002	38.64	37.40	38.57	39.08	40.02	40.52
1/R	20201	52.10	50.47	52.12	52.73	53.87	54.52
1/R	20399	35.11	33.61	34.85	35.40	36.41	36.87
1/R	20606	46.35	44.13	46.42	47.35	48.42	48.93
1/R	20805	63.37	61.87	62.55	64.09	65.10	65.36
1/R	20998	26.21	25.24	25.95	26.97	27.64	28.06



Carril	Abscisa	D(7)					
		μm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
		40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)	
1/L	10098	31.89	31.36	32.14	32.60	33.00	33.57
1/L	10301	56.51	56.19	56.58	56.53	56.97	57.39
1/L	10504	53.93	52.66	54.45	55.24	55.52	56.10
1/L	10702	54.23	52.39	54.90	56.65	57.97	58.30
1/L	10901	39.91	38.73	39.91	41.61	42.49	43.11
1/L	11103	36.66	34.95	36.80	37.98	38.85	39.13
1/L	11298	62.59	61.45	62.81	64.31	64.29	64.90
1/L	11500	50.39	47.76	50.87	52.22	53.25	53.29
1/L	11723	41.24	39.01	40.96	42.60	44.70	44.85
1/L	11915	40.43	39.46	40.80	41.48	42.28	42.90
1/L	12100	47.20	46.24	47.62	48.20	48.89	49.15
1/L	12303	55.40	54.30	55.58	56.47	56.96	57.02
1/L	12498	47.15	45.59	47.39	48.26	48.99	50.08
1/L	12701	56.52	55.92	56.52	57.19	57.29	57.63
1/L	12899	62.83	62.25	62.84	63.63	63.29	63.99
1/L	13102	53.48	52.46	53.40	54.84	55.23	56.03
1/L	13305	47.34	47.08	47.61	47.31	47.59	47.94
1/L	13499	40.94	40.13	40.85	41.61	42.17	42.69
1/L	13699	57.61	57.24	57.45	57.76	58.19	58.71
1/L	13910	63.60	63.38	63.46	64.08	64.23	65.19
1/L	14104	48.64	47.00	48.81	50.53	50.73	50.68
1/L	14299	62.06	60.76	62.52	63.09	62.84	63.94
1/L	14505	47.74	47.37	47.62	48.23	48.92	49.10
1/L	14693	32.39	31.20	32.68	32.96	33.68	34.57
1/L	14904	47.73	46.53	48.18	48.50	48.37	48.33
1/L	16103	42.50	41.06	42.52	43.26	43.64	44.35
1/L	16301	49.89	49.03	49.79	50.30	50.97	51.14
1/L	16491	49.72	48.81	49.94	50.34	50.78	51.30
1/L	16702	33.41	32.09	33.49	34.27	35.31	35.84
1/L	16902	67.17	66.15	67.16	67.61	68.55	69.28
1/L	17095	47.49	46.42	47.35	48.16	48.58	49.25
1/L	17299	36.16	34.85	36.12	36.81	37.36	37.92
1/L	17506	5.75	4.06	5.77	6.49	7.16	7.66
1/L	17700	44.57	43.12	44.04	44.74	45.59	
1/L	17903	30.73	29.63	30.68	31.31	31.99	32.55
1/L	18105	36.78	35.78	36.95	37.37	38.41	39.48
1/L	18304	57.19	56.23	56.94	57.72	58.47	58.59
1/L	18547	45.44	44.60	45.63	45.85	46.31	46.85
1/L	18700	38.28	37.54	38.37	38.77	39.10	39.68
1/L	18900	46.61	45.27	46.58	47.09	48.10	48.63
1/L	19103	28.13	27.18	28.26	28.82	29.11	29.62
1/L	19301	28.59	27.93	28.83	29.09	29.11	29.83
1/L	19504	36.09	34.91	36.27	37.16	37.56	38.01
1/L	19697	22.19	21.77	22.28	22.50	22.68	23.91
1/L	19900	38.75	38.31	38.90	39.12	39.70	39.99
1/L	20099	23.77	22.47	24.19	25.05	25.87	27.34
1/L	20301	20.48	19.56	20.64	21.21	21.84	22.46
1/L	20500	27.33	26.12	27.31	27.98	28.93	29.55
1/L	20701	13.61	11.26	13.44	14.27	15.41	16.04
1/L	20904	5.72	3.77	5.53	6.49	6.94	7.36



Carril	Abscisa	D(7) µm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/R	10000	5.87	5.79	5.11	6.60	6.95	7.21
1/R	10199	7.53	6.10	7.56	8.41	9.08	9.55
1/R	10402	7.65	6.69	7.44	8.45	8.66	9.36
1/R	10596	12.73	10.90	12.62	13.46	14.93	14.75
1/R	10799	16.69	15.19	16.40	17.53	18.82	19.50
1/R	11007	13.81	12.59	13.93	14.57	15.49	16.05
1/R	11216	8.89	7.40	8.73	9.60	10.35	10.73
1/R	11400	10.44	8.51	10.50	11.57	11.98	12.51
1/R	11569	19.35	17.82	19.27	20.71	21.60	22.54
1/R	11792	17.06	14.78	17.09	18.35	19.05	19.91
1/R	11975	3.02	1.75	3.01	3.82	4.27	4.55
1/R	12200	1.87	0.91	1.80	2.56	3.27	3.62
1/R	12403	15.18	13.58	15.40	16.15	17.28	17.77
1/R	12607	7.59	6.28	7.29	8.39	8.91	9.38
1/R	12802	8.17	6.65	8.03	8.61	9.36	9.86
1/R	13004	7.90	6.22	7.65	8.56	9.55	10.04
1/R	13186	3.36	1.66	3.64	4.38	4.71	5.30
1/R	13398	7.82	5.70	7.86	8.52	9.48	10.03
1/R	13574	7.33	5.44	7.16	8.00	8.77	9.38
1/R	13804	4.02	2.28	3.86	5.09	5.33	5.80
1/R	14003	8.69	7.48	8.92	9.80	10.59	10.83
1/R	14206	5.15	3.24	5.26	5.98	6.61	7.18
1/R	14409	25.28	20.08	24.27	32.95	27.77	27.17
1/R	14595	4.94	3.46	4.85	5.61	6.18	6.62
1/R	14808	12.39	10.84	12.22	13.35	13.81	14.46
1/R	15006	9.05	6.80	9.32	9.81	10.67	11.47
1/R	16000	16.80	15.15	16.54	17.79	18.68	19.74
1/R	16204	2.37	1.16	2.12	2.89	3.43	3.88
1/R	16397	43.08	40.79	42.76	44.18	45.79	47.52
1/R	16605	15.78	13.86	15.89	16.88	17.74	18.63
1/R	16799	17.11	14.88	17.34	18.28	18.84	19.91
1/R	16996	26.41	26.38	25.29	26.98	28.11	29.05
1/R	17209	24.42	22.36	24.39	25.36	26.39	27.41
1/R	17398	16.52	15.11	16.93	17.75	18.96	19.77
1/R	17605	13.82	11.91	14.42	15.28	15.38	16.02
1/R	17813	2.66	1.31	2.39	3.36	3.77	4.29
1/R	17999	14.55	12.47	14.62	15.47	16.29	16.88
1/R	18203	16.74	14.81	16.54	17.89	18.65	18.58
1/R	18397	19.13	17.45	18.75	20.30	21.02	21.88
1/R	18604	15.48	14.09	15.31	16.80	17.29	17.79
1/R	18797	25.14	23.56	25.48	26.70	27.27	27.73
1/R	19005	21.49	20.14	21.65	22.56	23.35	24.02
1/R	19199	29.14	27.45	29.53	30.59	30.35	30.63
1/R	19406	15.24	13.73	15.09	16.14	17.06	17.70
1/R	19610	30.98	30.08	31.11	31.78	32.37	32.55
1/R	19803	16.24	14.96	16.16	17.22	17.80	18.25
1/R	20002	25.55	23.17	25.54	26.73	27.72	28.55
1/R	20201	36.56	33.57	37.36	37.85	38.65	39.48
1/R	20399	22.83	20.21	23.13	23.26	24.33	25.49
1/R	20606	32.11	28.83	32.24	33.56	35.28	35.54
1/R	20805	49.38	46.43	48.89	51.57	50.70	52.26
1/R	20998	16.06	14.12	16.03	17.41	18.24	19.00



Carril	Abscisa	D(8) µm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/L	10098	20.50	20.47	20.38	20.77	20.85	21.04
1/L	10301	34.20	34.01	34.39	34.15	34.28	34.26
1/L	10504	33.94	33.64	33.85	34.57	34.34	34.69
1/L	10702	35.69	34.48	36.19	37.24	37.94	38.33
1/L	10901	26.98	26.45	27.06	27.62	28.22	28.59
1/L	11103	21.72	20.97	21.73	22.31	22.82	23.07
1/L	11298	40.34	39.95	40.40	40.86	41.10	41.12
1/L	11500	37.51	35.90	37.04	39.23	40.02	40.87
1/L	11723	28.36	27.19	28.09	29.03	30.50	30.63
1/L	11915	27.10	26.85	26.97	27.59	28.21	28.24
1/L	12100	29.39	28.97	29.32	30.12	30.27	30.25
1/L	12303	28.33	27.87	28.52	28.69	28.96	29.16
1/L	12498	29.43	28.56	29.60	29.95	30.51	30.87
1/L	12701	35.71	35.78	35.57	35.67	36.12	36.34
1/L	12899	41.48	41.32	41.36	41.97	41.38	41.77
1/L	13102	32.79	32.31	33.00	33.11	33.51	33.59
1/L	13305	25.21	25.40	25.09	25.13	25.10	25.40
1/L	13499	23.10	22.83	22.91	23.44	23.70	23.79
1/L	13699	36.79	36.92	36.69	36.59	36.94	37.05
1/L	13910	42.90	42.81	43.06	42.99	42.87	43.65
1/L	14104	28.74	27.89	28.91	29.59	29.92	29.89
1/L	14299	38.65	38.19	38.61	38.98	39.61	39.60
1/L	14505	30.06	30.09	29.89	30.10	30.59	30.49
1/L	14693	19.10	18.23	19.49	19.49	19.71	20.57
1/L	14904	26.66	25.97	26.97	27.11	26.93	26.83
1/L	16103	26.59	26.05	26.50	26.89	27.10	27.47
1/L	16301	31.10	30.92	30.97	31.24	31.40	31.62
1/L	16491	32.01	31.33	32.23	32.45	32.59	33.27
1/L	16702	20.94	20.10	21.01	21.52	22.07	22.36
1/L	16902	44.94	44.41	44.84	45.20	45.84	46.11
1/L	17095	29.84	29.30	29.73	30.10	30.51	30.93
1/L	17299	23.25	22.57	23.27	23.54	23.85	24.18
1/L	17506	3.63	2.75	3.61	4.02	4.42	4.60
1/L	17700	25.68	24.80	25.43	25.77	26.26	
1/L	17903	18.31	17.82	18.16	18.64	18.95	19.19
1/L	18105	23.79	23.10	23.77	24.50	24.66	25.21
1/L	18304	34.98	34.34	34.85	35.33	35.80	35.75
1/L	18547	28.28	27.76	28.08	28.83	29.06	29.07
1/L	18700	22.24	21.87	22.04	22.63	22.94	22.97
1/L	18900	29.75	28.85	29.83	30.01	30.64	31.10
1/L	19103	15.44	15.05	15.25	15.89	16.08	16.21
1/L	19301	17.70	17.49	17.67	17.87	18.18	18.30
1/L	19504	24.01	23.50	23.95	24.60	24.94	25.56
1/L	19697	12.19	11.93	12.07	12.53	12.63	13.00
1/L	19900	22.64	22.36	22.74	22.90	23.16	23.32
1/L	20099	15.87	14.98	15.93	16.91	17.54	18.10
1/L	20301	12.65	12.14	12.54	13.28	13.44	13.75
1/L	20500	17.50	16.61	17.40	18.20	18.53	18.88
1/L	20701	10.75	9.83	10.63	10.99	11.47	11.82
1/L	20904	4.28	3.65	4.15	4.57	4.74	4.73



Carril	Abscisa	D(8) µm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/R	10000	3.63	3.56	3.22	4.01	4.30	4.50
1/R	10199	6.19	5.51	6.17	6.62	6.96	7.31
1/R	10402	5.90	5.33	5.99	6.36	6.13	6.82
1/R	10596	10.67	9.51	10.65	11.01	12.19	11.68
1/R	10799	14.03	13.19	14.00	14.15	15.42	15.90
1/R	11007	12.09	11.22	12.14	12.67	13.27	13.49
1/R	11216	6.07	5.49	5.85	6.40	6.74	7.05
1/R	11400	9.09	7.69	9.07	10.11	10.13	10.29
1/R	11569	16.53	15.70	16.43	17.32	17.81	18.51
1/R	11792	14.25	13.11	14.19	14.92	15.30	15.89
1/R	11975	1.86	1.29	1.81	2.27	2.46	2.58
1/R	12200	1.34	0.91	1.40	1.64	1.80	2.11
1/R	12403	11.97	11.21	12.02	12.48	13.00	13.38
1/R	12607	6.47	5.83	6.12	7.02	7.24	7.32
1/R	12802	6.47	5.82	6.36	6.62	7.10	7.21
1/R	13004	6.84	6.10	6.61	7.15	7.68	7.94
1/R	13186	2.93	2.14	3.15	3.39	3.47	3.76
1/R	13398	7.23	6.54	6.95	7.49	8.00	8.31
1/R	13574	5.36	4.47	5.29	5.61	6.02	6.50
1/R	13804	3.41	2.52	3.45	3.91	4.02	4.14
1/R	14003	6.77	6.14	6.86	7.40	7.70	7.64
1/R	14206	3.74	2.88	3.77	4.11	4.46	4.59
1/R	14409	8.77	8.10	8.69	9.22	9.64	9.95
1/R	14595	4.37	3.70	4.12	4.80	5.11	5.19
1/R	14808	11.10	10.14	11.09	11.62	11.97	12.23
1/R	15006	7.04	6.19	7.02	7.36	7.75	8.12
1/R	16000	14.72	13.90	14.19	15.47	16.02	16.18
1/R	16204	1.64	1.28	1.48	1.77	2.09	2.17
1/R	16397	35.00	34.05	34.74	35.33	36.32	37.61
1/R	16605	11.79	10.69	11.94	12.36	12.85	13.27
1/R	16799	14.64	13.26	14.47	15.56	15.99	16.42
1/R	16996	20.51	21.12	19.53	20.57	21.04	21.66
1/R	17209	20.36	19.37	20.16	20.75	21.65	22.14
1/R	17398	13.60	12.89	13.81	14.17	14.96	15.29
1/R	17605	11.26	10.33	11.45	11.88	12.42	12.86
1/R	17813	2.08	1.67	1.87	2.36	2.51	2.63
1/R	17999	10.91	10.07	10.91	11.26	11.63	12.01
1/R	18203	13.79	13.07	13.59	14.26	14.74	14.40
1/R	18397	13.64	12.63	13.49	14.32	14.73	15.18
1/R	18604	11.14	10.51	11.02	11.82	11.91	12.21
1/R	18797	17.35	16.65	17.27	18.27	18.50	18.90
1/R	19005	14.48	13.84	14.47	14.98	15.60	15.81
1/R	19199	16.27	15.82	16.25	16.70	16.80	16.80
1/R	19406	11.97	11.35	11.83	12.38	12.81	13.11
1/R	19610	20.14	19.72	20.09	20.63	21.01	21.43
1/R	19803	10.49	9.86	10.43	11.09	11.11	11.41
1/R	20002	19.35	18.47	19.33	19.77	20.13	20.59
1/R	20201	29.75	28.17	29.83	30.41	31.41	31.70
1/R	20399	17.45	16.56	17.16	17.79	18.12	18.66
1/R	20606	25.30	23.89	25.20	25.85	26.85	27.31
1/R	20805	43.06	41.86	42.51	43.70	44.29	44.54
1/R	20998	13.94	12.97	13.93	14.65	15.05	15.29



Carril	Abscisa	D(9) µm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/L	10098	112.62	113.77	112.49	110.81	110.28	110.00
1/L	10301	173.87	175.58	173.90	172.27	172.45	171.96
1/L	10504	157.12	157.75	156.85	156.61	156.84	157.39
1/L	10702	164.43	163.14	165.38	165.59	167.34	168.11
1/L	10901	139.29	140.07	138.78	138.46	139.90	139.91
1/L	11103	142.50	142.16	142.23	143.07	143.10	143.16
1/L	11298	169.42	169.28	169.28	169.83	170.46	170.70
1/L	11500	151.89	151.62	151.20	152.51	153.29	154.04
1/L	11723	134.05	134.48	133.13	133.81	135.15	135.80
1/L	11915	126.89	127.39	126.45	126.71	127.15	127.33
1/L	12100	152.82	153.76	151.95	152.32	152.68	152.47
1/L	12303	199.62	199.83	199.07	199.91	199.76	199.64
1/L	12498	156.54	157.21	156.61	155.46	156.38	156.86
1/L	12701	170.03	171.36	169.37	169.18	169.11	169.99
1/L	12899	175.21	176.35	174.79	174.73	173.18	173.72
1/L	13102	159.78	159.98	159.53	159.79	160.21	161.65
1/L	13305	167.33	168.90	166.92	166.15	165.59	165.64
1/L	13499	165.87	167.43	165.10	164.94	165.04	165.41
1/L	13699	164.73	166.73	164.54	163.32	163.27	163.54
1/L	13910	172.53	173.23	172.26	172.24	171.90	172.97
1/L	14104	159.86	158.89	159.70	161.13	161.93	161.94
1/L	14299	181.27	181.36	181.38	181.01	181.19	181.64
1/L	14505	149.20	149.79	148.95	148.65	148.90	148.90
1/L	14693	144.07	145.14	143.90	142.88	143.74	143.74
1/L	14904	198.85	199.77	199.19	198.19	196.93	195.52
1/L	16103	129.16	129.81	129.35	128.51	128.47	129.10
1/L	16301	146.63	147.68	146.19	145.98	146.28	146.22
1/L	16491	147.04	148.75	146.26	146.16	145.33	146.09
1/L	16702	132.07	132.80	131.88	131.37	131.76	131.73
1/L	16902	179.61	181.04	179.37	178.59	178.53	179.45
1/L	17095	146.41	146.97	146.28	146.13	145.89	146.28
1/L	17299	108.97	109.24	108.85	108.73	109.00	109.05
1/L	17506	49.08	50.27	48.67	48.41	48.57	48.81
1/L	17700	149.93	150.40	149.45	149.57	150.30	
1/L	17903	109.23	110.19	109.29	108.42	108.28	108.73
1/L	18105	129.23	129.18	129.27	129.19	129.40	130.18
1/L	18304	165.23	166.24	165.21	164.35	164.73	164.39
1/L	18547	137.69	138.34	137.81	137.09	136.85	136.61
1/L	18700	133.29	135.32	132.51	132.11	131.76	131.83
1/L	18900	134.51	134.74	134.25	134.19	134.90	134.82
1/L	19103	111.95	113.11	111.29	111.43	111.34	112.06
1/L	19301	107.59	108.54	107.40	106.67	106.86	106.88
1/L	19504	115.10	115.47	114.78	114.96	115.16	115.49
1/L	19697	101.63	102.14	101.30	101.39	101.43	102.35
1/L	19900	127.48	128.76	126.66	126.39	127.24	127.13
1/L	20099	110.46	110.10	109.62	111.14	113.90	114.24
1/L	20301	89.82	90.70	89.46	89.13	89.39	89.69
1/L	20500	104.91	104.84	104.70	104.84	105.49	105.82
1/L	20701	60.41	60.52	60.03	60.38	60.62	60.84
1/L	20904	52.27	52.97	52.21	51.85	52.09	51.82



Carril	Abscisa	D(9) µm					
		Est carga 40KN	AASHTO				
			40 KN(35KN)	40 KN(40KN)	40 KN(45KN)	40 KN(50KN)	40 KN(55KN)
1/R	10000	44.55	44.42	44.52	44.68	44.78	45.04
1/R	10199	44.90	45.15	44.57	44.74	45.09	45.34
1/R	10402	40.29	40.24	40.30	40.34	40.20	40.75
1/R	10596	46.63	46.16	46.33	46.40	48.19	47.41
1/R	10799	53.22	53.24	52.39	53.23	54.28	55.19
1/R	11007	52.81	52.49	52.52	53.21	53.58	54.12
1/R	11216	47.77	48.11	47.54	47.43	47.83	48.28
1/R	11400	46.65	47.30	46.57	46.09	46.29	46.58
1/R	11569	60.47	60.13	60.16	60.97	61.43	62.55
1/R	11792	57.76	57.33	57.36	57.87	58.69	59.44
1/R	11975	34.22	34.37	34.01	34.07	34.38	34.74
1/R	12200	36.43	36.66	36.24	36.26	36.54	36.76
1/R	12403	54.82	54.78	54.63	54.68	55.56	56.32
1/R	12607	42.56	42.39	42.24	42.69	42.95	43.53
1/R	12802	49.00	50.56	49.13	48.73	47.64	47.18
1/R	13004	40.13	39.66	39.90	40.18	40.82	41.34
1/R	13186	35.70	35.96	35.41	35.71	35.56	36.16
1/R	13398	43.51	43.38	43.12	43.33	44.11	44.44
1/R	13574	45.10	45.47	44.91	44.87	44.96	45.40
1/R	13804	36.47	37.14	36.16	36.36	36.01	36.14
1/R	14003	58.45	59.09	58.21	57.93	57.78	57.95
1/R	14206	45.58	46.27	45.38	45.34	45.14	45.13
1/R	14409	54.75	55.20	54.43	54.47	54.73	54.98
1/R	14595	37.92	38.94	37.84	37.39	37.25	37.03
1/R	14808	55.46	57.41	55.65	54.97	52.66	52.93
1/R	15006	45.95	46.51	45.71	45.42	45.85	46.34
1/R	16000	68.03	68.47	67.81	67.81	67.83	68.29
1/R	16204	43.40	44.26	43.52	42.99	42.69	42.49
1/R	16397	106.46	106.18	105.54	106.24	108.06	110.17
1/R	16605	80.14	81.15	79.55	79.51	79.98	79.94
1/R	16799	65.81	65.86	65.47	65.96	65.98	66.35
1/R	16996	83.41	85.50	82.14	82.26	82.78	83.12
1/R	17209	78.65	78.50	78.24	78.58	79.49	79.85
1/R	17398	65.42	65.56	65.08	65.55	66.25	67.03
1/R	17605	57.72	58.10	57.37	57.45	57.99	58.42
1/R	17813	37.61	39.09	37.65	36.93	36.43	36.27
1/R	17999	67.96	68.80	67.68	67.44	67.64	67.68
1/R	18203	70.69	71.85	70.79	70.10	69.54	69.33
1/R	18397	78.25	78.28	77.98	78.13	78.71	78.96
1/R	18604	68.85	69.46	68.59	68.52	68.42	67.96
1/R	18797	87.58	88.13	87.14	87.29	87.48	87.74
1/R	19005	91.90	92.15	91.79	91.51	92.12	91.85
1/R	19199	121.11	122.36	120.88	120.26	119.73	119.33
1/R	19406	63.90	64.45	63.42	63.73	63.82	64.14
1/R	19610	115.80	117.52	115.19	114.30	114.09	113.55
1/R	19803	79.41	80.34	79.26	78.81	78.52	78.44
1/R	20002	82.82	83.03	82.32	82.56	83.31	83.87
1/R	20201	111.92	112.21	111.27	111.81	112.50	112.44
1/R	20399	78.47	79.15	78.18	78.04	78.28	78.60
1/R	20606	94.53	94.38	93.85	94.51	95.60	95.92
1/R	20805	109.77	109.91	108.50	109.99	110.55	110.87
1/R	20998	69.24	70.04	68.94	68.77	68.78	68.51



7.3 Transferencia de carga

carril	Abscisa Junta	Abscisa Centro	JUNTA		CENTRO		B	$\Delta u_i/\Delta l_i$	$\Delta L T$	Coef. de transferencia J
			0 cm	30 cm	0 cm	30 cm				
			D(1) μm	D(3) μm	D(1) μm	D(3) μm				
1/L	10095	10098	106.79	60.10	118.94	111.85	1.06	0.56	59.85%	3.5
1/L	10298	10301	120.04	101.79	182.75	171.75	1.06	0.85	90.22%	3.2
1/L	10501	10504	111.33	66.59	164.44	156.59	1.05	0.60	62.81%	3.5
1/L	10700	10702	125.10	108.91	172.67	162.68	1.06	0.87	92.41%	3.2
1/L	10898	10901	99.14	85.42	143.57	132.93	1.08	0.86	93.06%	3.2
1/L	11101	11103	79.52	69.72	144.25	134.73	1.07	0.88	93.88%	3.2
1/L	11295	11298	139.45	66.57	176.20	168.95	1.04	0.48	49.79%	4
1/L	11497	11500	118.65	111.30	158.15	150.64	1.05	0.94	98.47%	3.2
1/L	11721	11723	114.36	60.82	139.87	131.62	1.06	0.53	56.52%	3.5
1/L	11912	11915	65.31	63.31	130.00	123.93	1.05	0.97	101.68%	3.2
1/L	12098	12100	103.97	96.94	161.05	151.26	1.06	0.93	99.27%	3.2
1/L	12301	12303	89.39	48.18	206.81	191.80	1.08	0.54	58.12%	3.5
1/L	12495	12498	152.71	120.58	166.43	156.00	1.07	0.79	84.24%	3.2
1/L	12698	12701	122.19	104.19	177.27	166.69	1.06	0.85	90.69%	3.2
1/L	12897	12899	75.27	63.95	185.08	176.20	1.05	0.85	89.23%	3.2
1/L	13099	13102	76.29	59.06	166.43	158.50	1.05	0.77	81.29%	3.2
1/L	13303	13305	97.51	73.01	175.47	164.65	1.07	0.75	79.79%	3.2
1/L	13496	13499	71.00	61.80	175.82	162.64	1.08	0.87	94.10%	3.2
1/L	13696	13699	150.06	37.54	173.77	164.30	1.06	0.25	26.46%	4
1/L	13908	13910	109.54	103.15	180.99	171.12	1.06	0.94	99.60%	3.2
1/L	14102	14104	76.87	65.69	164.95	154.15	1.07	0.85	91.45%	3.2
1/L	14296	14299	96.83	55.76	190.08	179.29	1.06	0.58	61.05%	3.5
1/L	14503	14505	80.77	69.27	156.75	146.93	1.07	0.86	91.50%	3.2
1/L	14691	14693	68.44	45.59	149.05	134.40	1.11	0.67	73.87%	3.2
1/L	14902	14904	136.46	116.50	228.99	192.73	1.19	0.85	101.43%	3.2
1/L	16100	16103	66.37	44.91	137.73	131.39	1.05	0.68	70.93%	3.2
1/L	16299	16301	137.51	42.62	154.36	146.10	1.06	0.31	32.75%	4
1/L	16488	16491	121.41	105.43	153.35	144.76	1.06	0.87	91.99%	3.2
1/L	16700	16702	108.18	41.47	138.35	127.25	1.09	0.38	41.67%	4
1/L	16899	16902	141.50	119.58	185.39	175.54	1.06	0.85	89.25%	3.2
1/L	17093	17095	101.22	59.68	151.23	142.60	1.06	0.59	62.53%	3.5
1/L	17297	17299	82.80	55.33	113.26	107.14	1.06	0.67	70.65%	3.2
1/L	17504	17506	91.00	29.50	52.46	47.86	1.10	0.32	35.53%	4
1/L	17698	17700	102.77	82.44	159.62	148.60	1.07	0.80	86.16%	3.2
1/L	17901	17903	69.78	59.69	115.50	108.38	1.07	0.86	91.17%	3.2
1/L	18103	18105	94.40	66.40	135.47	125.54	1.08	0.70	75.89%	3.2
1/L	18301	18304	110.83	64.93	175.45	165.68	1.06	0.59	62.04%	3.5
1/L	18545	18547	73.14	50.13	148.84	139.32	1.07	0.69	73.22%	3.2
1/L	18699	18700	90.45	42.03	142.14	131.90	1.08	0.46	50.08%	3.5
1/L	18897	18900	103.74	65.76	141.48	132.63	1.07	0.63	67.62%	3.5
1/L	19100	19103	96.68	71.41	118.99	109.14	1.09	0.74	80.53%	3.2
1/L	19298	19301	107.77	81.28	116.30	105.43	1.10	0.75	83.19%	3.2
1/L	19502	19504	85.57	71.49	123.14	114.22	1.08	0.84	90.07%	3.2
1/L	19695	19697	89.75	54.55	110.48	99.00	1.12	0.61	67.83%	3.5
1/L	19898	19900	117.14	44.63	136.64	126.66	1.08	0.38	41.10%	4
1/L	20096	20099	104.60	78.87	118.23	102.91	1.15	0.75	86.64%	3.2
1/L	20299	20301	84.01	58.94	98.61	88.62	1.11	0.70	78.07%	3.2
1/L	20498	20500	105.48	67.02	115.07	104.23	1.10	0.64	70.14%	3.2
1/L	20699	20701	76.59	57.26	63.36	59.12	1.07	0.75	80.12%	3.2
1/L	20902	20904	76.63	49.54	56.52	51.56	1.10	0.65	70.86%	3.2



carril	Abscisa Junta	Abscisa Centro	JUNTA		CENTRO		B	$\Delta u_i / \Delta l$	ΔLT	Coef. de transferencia J
			0	30	0	30				
			cm	cm	cm	cm				
	D(1)	D(3)	D(1)	D(3)						
	μm	μm	μm	μm						
1/R	10002	10000	89.30	60.47	47.89	41.40	1.16	0.68	78.34%	3.2
1/R	10201	10199	120.00	60.92	49.52	42.52	1.16	0.51	59.13%	3.5
1/R	10403	10402	126.88	90.31	44.27	39.45	1.12	0.71	79.87%	3.2
1/R	10598	10596	88.92	53.99	49.74	44.51	1.12	0.61	67.85%	3.5
1/R	10801	10799	151.55	107.38	55.32	49.87	1.11	0.71	78.60%	3.2
1/R	11009	11007	93.03	72.90	57.22	49.72	1.15	0.78	90.17%	3.2
1/R	11218	11216	94.54	59.59	51.52	46.84	1.10	0.63	69.33%	3.5
1/R	11403	11400	142.58	91.95	50.23	44.06	1.14	0.64	73.51%	3.2
1/R	11571	11569	101.52	70.73	62.47	57.75	1.08	0.70	75.38%	3.2
1/R	11794	11792	110.36	81.51	59.56	55.39	1.08	0.74	79.40%	3.2
1/R	11977	11975	102.13	52.38	37.01	33.03	1.12	0.51	57.47%	3.5
1/R	12203	12200	76.10	36.44	39.11	33.85	1.16	0.48	55.32%	3.5
1/R	12405	12403	93.77	69.57	57.72	53.39	1.08	0.74	80.22%	3.2
1/R	12609	12607	112.79	80.99	43.88	39.37	1.11	0.72	80.02%	3.2
1/R	12804	12802	89.74	37.45	53.68	48.30	1.11	0.42	46.38%	4
1/R	13007	13004	66.98	55.86	41.51	38.03	1.09	0.83	91.03%	3.2
1/R	13188	13186	63.35	42.94	40.09	34.92	1.15	0.68	77.82%	3.2
1/R	13400	13398	73.24	48.52	46.16	41.47	1.11	0.66	73.76%	3.2
1/R	13576	13574	73.97	49.31	49.67	46.49	1.07	0.67	71.24%	3.2
1/R	13806	13804	70.64	47.30	38.38	34.55	1.11	0.67	74.37%	3.2
1/R	14005	14003	77.64	48.85	63.46	56.65	1.12	0.63	70.47%	3.2
1/R	14208	14206	83.76	39.64	48.75	43.82	1.11	0.47	52.65%	3.5
1/R	14411	14409	94.95	54.01	57.05	52.99	1.08	0.57	61.24%	3.5
1/R	14597	14595	66.19	42.96	38.76	35.48	1.09	0.65	70.88%	3.2
1/R	14810	14808	77.81	56.53	58.75	53.86	1.09	0.73	79.25%	3.2
1/R	15008	15006	70.91	43.39	48.71	45.63	1.07	0.61	65.32%	3.5
1/R	16002	16000	104.44	51.14	71.09	64.51	1.10	0.49	53.96%	3.5
1/R	16205	16204	48.00	26.67	46.62	41.79	1.12	0.56	61.98%	3.5
1/R	16400	16397	142.14	99.85	108.49	104.05	1.04	0.70	73.24%	3.2
1/R	16607	16605	80.69	54.50	85.93	78.00	1.10	0.68	74.41%	3.2
1/R	16801	16799	98.22	47.58	67.77	63.09	1.07	0.48	52.03%	3.5
1/R	16999	16996	101.43	69.16	85.53	80.84	1.06	0.68	72.14%	3.2
1/R	17212	17209	90.06	70.87	81.28	76.16	1.07	0.79	83.98%	3.2
1/R	17400	17398	65.69	53.96	69.36	64.54	1.07	0.82	88.29%	3.2
1/R	17607	17605	51.20	46.15	62.08	57.87	1.07	0.90	96.70%	3.2
1/R	17814	17813	64.40	35.25	40.84	37.85	1.08	0.55	59.07%	3.5
1/R	18001	17999	59.76	51.15	72.29	67.32	1.07	0.86	91.91%	3.2
1/R	18205	18203	64.41	54.85	75.11	69.68	1.08	0.85	91.79%	3.2
1/R	18398	18397	66.60	52.07	82.44	77.23	1.07	0.78	83.45%	3.2
1/R	18606	18604	58.66	50.63	72.37	68.32	1.06	0.86	91.42%	3.2
1/R	18800	18797	64.19	57.38	91.20	86.23	1.06	0.89	94.56%	3.2
1/R	19007	19005	60.64	54.97	96.97	89.25	1.09	0.91	98.48%	3.2
1/R	19201	19199	84.78	51.79	127.93	118.21	1.08	0.61	66.11%	3.5
1/R	19409	19406	66.77	56.71	66.23	62.99	1.05	0.85	89.30%	3.2
1/R	19612	19610	91.19	66.84	122.07	113.65	1.07	0.73	78.72%	3.2
1/R	19806	19803	60.38	48.99	83.07	76.98	1.08	0.81	87.54%	3.2
1/R	20004	20002	100.02	84.68	85.47	80.93	1.06	0.85	89.41%	3.2
1/R	20203	20201	94.02	83.77	119.01	111.54	1.07	0.89	95.06%	3.2
1/R	20402	20399	86.04	76.96	82.72	78.57	1.05	0.89	94.17%	3.2
1/R	20608	20606	77.97	70.49	95.70	92.16	1.04	0.90	93.88%	3.2
1/R	20807	20805	116.66	109.66	109.61	106.30	1.03	0.94	96.93%	3.2
1/R	21001	20998	58.15	47.03	73.33	68.36	1.07	0.81	86.75%	3.2



7.4 Reporte grafico de secciones evaluadas



10+000



10+200



10+400



10+600



10+800



11+000



11+200



11+400



11+600



11+800



12+000



12+200



12+400



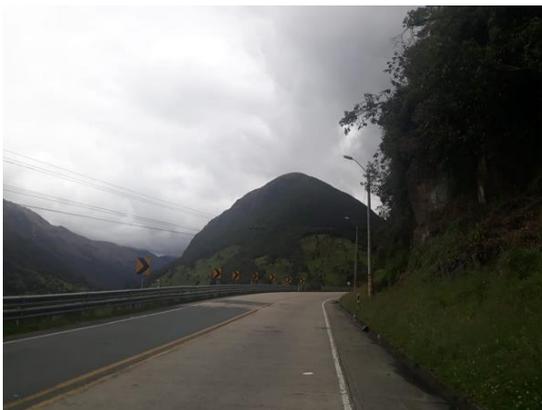
12+600



12+800



13+000



13+200



13+400



13+600



13+800



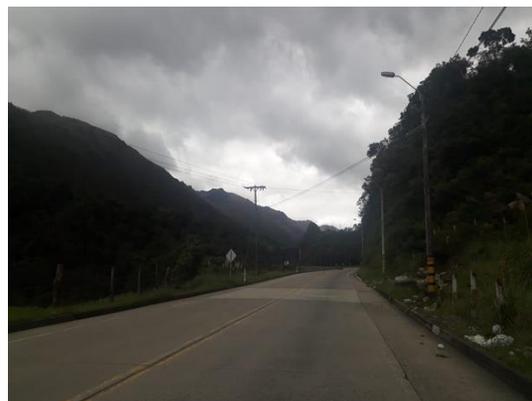
14+000



14+200



14+400



14+600



14+800



15+000



16+000



16+200



16+400



16+600



16+800



17+000



17+200



17+400



17+600



17+800



18+000



18+200



18+400



18+600



18+800



19+000



19+200



19+400



19+600



19+800



20+000



20+200



20+400



20+600



20+800



21+000