

UCUENCA

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería en Vialidad y Transporte, Tercera Cohorte

***“Evaluación Estructural del Pavimento de la Vía Cuenca - Azogues,
Tramo El Salado - Guangarcucho (20 km), con el Método no Destructivo
FWD (Falling Weight Deflectometer) y Diseño de su Rehabilitación”.***

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
Magíster en Ingeniería en Vialidad y Transporte

Autor:

Ing. Cesar Mauricio Balarezo Durán

CI: 0102434545

Correo electrónico: hormacon@hotmail.com

Director:

Ing. Juan Sebastián López Zhindón Msc.

CI: 0104445382

Cuenca - Ecuador

19 de septiembre de 2022

RESUMEN

El presente trabajo consiste en evaluar la estructura de pavimento del tramo El Salado – Guangarcucho de la vía Cuenca – Azogues E35, con una longitud de 20 kilómetros aproximadamente.

Se realiza la cuantificación de la capacidad estructural según el método no destructivo (Non-Destructive Test, NDT) y se obtiene las deformaciones con el deflectómetro de impacto de carga dinámica FWD (Falling Weight Deflectometer) de propiedad del MTOP; seguido se realizó la corrección por normalización por carga y se determinan 4 secciones homogéneas por calzada. En cada una de ellas se realizó el cálculo inverso (retrocálculo) para la obtención del módulo resiliente de la subrasante con los métodos YONAPAVE, AASHTO y el software EVERCALC. También se utilizó el software ELLEA1 para el cálculo de los módulos elásticos de la estructura del pavimento, los resultados de los módulos para la subrasante están entre 40 y 79 MPa, para la capa de mejoramiento con valores entre 82 y 271 MPa, para la capa de subbase con valores entre 360 y 549 MPa; y para valores de los módulos de la carpeta asfáltica entre 3900 y 4900 MPa. Existe una muy buena correlación entre métodos y programas mencionados, con valores de R^2 entre 0.93 y 1.00. Se determinó el número estructural SN_{ef} con el método YONAPAVE con valores entre 5 y 6, y con el método AASHTO con valores entre 7 y 8.

El MTOP proporcionó todos los datos necesarios de tráfico para el análisis de rehabilitación, en este sentido se obtuvieron cuatro subtramos, dos por sentido de circulación vehicular, los cuales tienen diferentes cualidades estructurales y diferentes volúmenes de camiones. La propuesta de rehabilitación se analizó con la ayuda del programa *Empírico – Mecanicista de la AASHTO, MEPDG 2008*. Este software es una potente herramienta, versátil y dinámica, que acepta las cualidades mecánicas de los materiales y que pronostica deterioros del pavimento. Es de gran importancia para la gestión de pavimentos, ayuda para un mantenimiento oportuno y garantiza la comodidad de los usuarios viales. El periodo de vida de diseño para la rehabilitación se estableció en 20 años, resultando un refuerzo de 7 pulgadas (17.78 cm) para los tres subtramos y de 8 pulgadas (20.32 cm) para el último. Se considera que antes de colocar el refuerzo se tendrá que escarificar 2 pulgadas de asfalto, para ganar adherencia y retirar material que se encuentre con deterioros.

Palabras Clave: Deflexión. Resiliente. Correlación. Mecanicista. Deterioro.

ABSTRACT

The present work consists of evaluating the pavement structure of the El Salado - Guangarcucho section of the Cuenca - Azogues E35 road, with a length of approximately 20 kilometers.

The quantification of the structural capacity is carried out according to the non-destructive method (Non-Destructive Test, NDT) and the deformations are obtained with the dynamic load impact deflectometer FWD (Falling Weight Deflectometer) owned by the MTOP; Then, the correction was made by normalization by load and 4 homogeneous sections per roadway were determined. In each of them, the inverse calculation (backcalculation) was carried out to obtain the resilient modulus of the subgrade with the YONAPAVE, AASHTO methods and the EVERCALC software. The ELLEA1 software was also used to calculate the elastic modules of the pavement structure, the results of the modules for the subgrade are between 40 and 79 MPa, for the improvement layer with values between 82 and 271 MPa, for the layer subbase with values between 360 and 549 MPa; and for values of the modules of the asphalt binder between 3900 and 4900 MPa. There is a very good correlation between methods and programs mentioned, with R^2 values between 0.93 and 1.00. The structural number SN_{ef} was determined with the YONAPAVE method with values between 5 and 6, and with the AASHTO method with values between 7 and 8.

The MTOP provided all the necessary traffic data for the rehabilitation analysis, in this sense, four subsections were obtained, two per direction of vehicular traffic, which have different structural qualities and different volumes of trucks. The rehabilitation proposal was analyzed with the help of the *AASHTO Empirical – Mechanistic program, MEPDG 2008*. This software is a powerful, versatile and dynamic tool that accepts the mechanical qualities of materials and predicts pavement deterioration. It is of great importance for the management of pavements, it helps for timely maintenance and guarantees the comfort of road users. The design life period for the rehabilitation was established at 20 years, resulting in a reinforcement of 7 inches (17.78 cm) for the three subsections and 8 inches (20.32 cm) for the last. It is considered that before coloring the reinforcement, 2 inches of asphalt will have to be scarified, to gain adherence and remove material that is damaged.

Keywords: Deflection. Resistant. Correlation. Mechanistic. Deterioration.

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL	4
INDICE DE FIGURAS	9
INDICE DE TABLAS	13
Capítulo 1	20
Generalidades.....	20
1.1 Introducción	20
1.2 Problemática.	21
1.3 Objetivos.....	22
1.3.1 Objetivo general.	22
1.3.2 Objetivos Específicos	22
1.4 Alcance	22
Capítulo 2	24
Marco Referencial	24
2.1 Introducción	24
2.2 Sistemas de Gestión de pavimentos	25
2.3 Deflectometría.....	26
2.3.1 Introducción	26
2.3.2 Pruebas Deflectometricas.....	26
2.3.3 Equipos de Medición de deflexión en pavimentos	28
2.4 Retrocálculo	31
2.4.1 Proceso general de Retrocálculo.	32
2.5 Mantenimiento.	34
2.6 Rehabilitación.	34
2.7 Diseño de Pavimentos.....	35
2.7.1 Diseño Empírico de Pavimentos	35
2.7.2 Diseño Empírico – Mecanicista de Pavimentos	36
Capítulo 3	38
Marco Teórico	38
3.1 Gestión de Pavimentos	38
3.2 Evaluación Superficial	39
3.2.1 Índice de rugosidad internacional (IRI)	39
3.2.2 Índice Internacional de Fricción (IFI).....	42

3.2.3	Índice de Condición del Pavimento (PCI).	43
3.3	Evaluación Estructural	44
3.4	Deflexiones en la Estructura del Pavimento	45
3.4.1	Índices característicos, a partir de datos de deflexión.	46
3.4.2	Factores que afectan las deflexiones.	50
3.5	Ubicación de prueba.	51
3.6	Intervalos de prueba.	52
3.7	Valores de deflexión atípicos.	52
3.8	Deflectómetro de Impacto FWD.	53
3.9	Cuenca de deflexiones	54
3.10	Secciones Homogéneas.	54
3.11	Comportamiento mecánico de los materiales.	56
3.11.1	Elasticidad.	57
3.11.2	Plasticidad.	62
3.11.3	Viscosidad.	62
3.12	Esfuerzos, Deformaciones y Deflexiones en Pavimento Flexible.	63
3.12.1	Esfuerzos y deformaciones verticales.	64
3.12.2	Esfuerzos y deformaciones cortantes.	64
3.12.3	Esfuerzos y deformaciones cortantes tangenciales y radiales.	64
3.12.4	Deflexiones.	64
3.12.5	Fenómenos de bajas y altas temperaturas de los materiales.	65
3.13	Respuestas en Tipos de Pavimentos Flexibles.	65
3.13.1	Pavimentos de tipo convencionales.	65
3.13.2	Pavimentos de tipo Full Depth.	66
3.13.3	Pavimentos de tipo Semirrígidos.	67
3.14	Superposición en estructura de pavimentos flexibles.	68
3.15	Análisis lineal, no lineal y viscoelástico en pavimentos flexibles.	70
3.15.1	Análisis lineal.	70
3.15.2	Análisis no lineal.	70
3.15.3	Análisis viscoelástico.	71
3.16	Módulo Resiliente.	71
3.17	Calculo Inverso de Módulos del Pavimento	73
3.17.1	Método AASHTO 1993	75

3.17.2	Método de YONAPAVE.....	77
3.17.3	Programa de retrocálculo EVERCALC	78
3.17.4	Programa de retrocálculo ELLEA1.....	81
3.17.5	Corrección por temperatura.....	84
3.18	Pruebas Destructivas	84
3.19	Módulos de laboratorio vs los retrocalculados.	85
3.20	Tráfico.....	87
3.20.1	Tasas de Crecimiento	87
3.20.2	Conteos Vehiculares.	88
3.20.3	Cálculo del Tráfico Promedio Diaria Anual (TPDA).....	88
3.21	Método Empírico Mecanicista para el Diseño de Pavimentos (EMPDG)...	89
3.21.1	Enfoque general de diseño del MEPDG.....	91
3.21.2	Indicadores de desempeño previstos por el MEPDG para HMA	93
3.21.3	Niveles jerárquicos de ingreso	93
3.21.4	Términos de tráfico de camiones	95
3.21.5	Suavidad (Regularidad IRI)	96
3.21.6	Indicadores de deterioro o desempeño: pavimentos HMA	97
3.21.7	Vida de diseño	98
3.21.8	Criterios recomendados de rendimiento.....	99
3.21.9	Confiabilidad.....	100
3.21.10	Clima	102
3.21.11	Absorción de onda corta superficial.....	103
3.21.12	Fricción de interfaz entre capas unidas	103
Capítulo 4	.....	105
Diseño Metodológico	.....	105
4.1	Aspectos Geomorfológicos.....	105
4.1.1	Ubicación.....	105
4.1.2	Clima.	106
4.1.3	Suelo.	107
4.1.4	Geológicos.	107
4.1.5	Aspectos Topográficos.....	108
4.2	Deflectometría.....	109
4.3	Secciones Homogéneas.....	112

4.4	Proceso de Retrocálculo.....	113
4.4.1	Estructura Vial	114
4.4.2	Método de la AASHTO	116
4.4.3	Método YONAPAVE.....	116
4.4.4	Método EVERCALC.....	117
4.4.5	Método ELLEA1	120
4.5	Correlación entre datos con deflectómetro y laboratorio.....	122
4.6	Método Empírico – Mecanicista AASHTO MEPDG	124
4.6.1	Datos Generales	124
4.6.2	Identificación del Proyecto	125
4.6.3	Análisis de parámetros para deterioros.....	125
4.6.4	Tráfico	126
4.6.5	Ingreso de datos de estructura del pavimento	133
Capítulo 5	.....	138
Análisis de Resultados	.....	138
5.1	Deflectometría.....	138
5.2	Secciones Homogéneas.....	138
5.3	Tráfico.....	143
5.4	Retrocálculo.....	147
5.5	Número estructural <i>S_{Nef}</i>	151
5.6	Correlación pruebas no destructivas vs destructivas.....	152
5.7	Diseño Empírico Mecanicista ASSHTO MEPDG.....	154
5.7.1	Diseño Sub Tramo TCD1	154
5.7.2	Diseño Sub Tramo TCD2.....	158
5.7.3	Diseño Sub Tramo TCI1	162
5.7.4	Diseño Sub Tramo TCI2	165
Capítulo 6	.....	170
Conclusiones y Recomendaciones	.....	170
Referencias Bibliográficas	.....	174
ANEXOS	.....	176
ANEXO A	.....	176
Deflexiones Medidas FWD, Normalizadas	.....	176
ANEXO B	.....	180
Deflexiones Características	.....	180

ANEXO C.....	181
Retrocálculo.....	181
Método YONAPAVE.....	181
Método AASHTO 93.....	181
Programa EVERCALC.....	182
Programa ELLEA1.....	183
ANEXO D.....	192
Predicción de Deterioros Subtramo TCD1 Calzada Derecha.....	192
Predicción de Deterioros Subtramo TCD2 Calzada Derecha.....	196
Predicción de Deterioros Subtramo TCI1 Calzada Izquierda.....	200
Predicción de Deterioros Subtramo TCI2 Calzada Izquierda.....	204

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Cuenco de Deflexiones.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2 Estructura de Pavimento con Mediciones Deflectometricas.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3 Salida típica de un generador de fuerza vibrante en estado estable</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4 Esquema de prueba del FWD.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 5 Rolling Wheel Deflectometer RWD.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 6 Ilustración de Retrocálculo para Estimar Módulos de Capa</i>	<i>32</i>
<i>Figura 7. Viga simplemente apoyada con carga puntual.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 8 Diagrama, Gestión de Pavimentos.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 9 Algoritmo Computarizado para medición de IRI.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 10 Rangos IRI vs Tipos de Carretera.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 11 Avance del deterioro de una carretera respecto al tiempo.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 12 Fricción vs Textura.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 13 Clasificación PCI, ASTM 6233-11.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 14 Clasificación de Métodos para la Evaluación estructural de un Pavimento.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 15 Zonas de curvatura de un cuenco de deflexión</i>	<i>49</i>
<i>Figura 16 Referencia de Parámetros de Horak.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 17 Pruebas en Pavimento flexible.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 18 Deflectometro de Impacto, FWD.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 19 Tipos de Cuenco de Deflexiones.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 20 Estructura de Pavimentos Flexibles.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 21 Elemento sometido a Compresión.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 22 Relación Esfuerzo Aplicado σ vs la Deformación Unitaria ϵ.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 23 Concepto de Módulo Elástico de los Materiales.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 24 Esfuerzos Normales y Cortantes en un sistema de Coordenadas Rectangulares.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 25 Comportamiento Elasto - Plástico de los Materiales.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 26 Respuestas críticas en un pavimento flexible convencional.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 27 Respuestas críticas en pavimento tipo full depth.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 28 Respuestas críticas en pavimento Semirigido.convencional.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 29 Superposición de Esfuerzos para Cargas Múltiples.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 30 Superposición de Esfuerzos para Cargas Múltiples.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 31 Superposición para la mitad de un eje tridem.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 32 Superposición para la Mitad de un Eje Tridem.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 33 Resiliencia de materiales granulares y suelos</i>	<i>72</i>
<i>Figura 34 Equipo Triaxial Cíclico, Obtención M_R en Materiales Granulares.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 35 Flujo típico de cálculo inverso iterativo.</i>	<i>73</i>

<i>Figura 36 Cuenca de Deflexiones Calculadas vs Medidas</i>	75
<i>Figura 37 Flujograma para la Determinación de Módulos, EVERCALC</i>	79
<i>Figura 38 Zona de Tensión y Capa Rígida</i>	80
<i>Figura 39 Programa LET Isotrópico ELLEA1</i>	82
<i>Figura 40 Teoría Elástica vs La Realidad</i>	83
<i>Figura 41 Diagrama de Flujo del Proceso de Diseño/Análisis en Etapas para el MEPDG</i>	90
<i>Figura 42 Clasificación de Camiones FHWA 2001</i>	96
<i>Figura 43 Concepto de Confiabilidad de Diseño para el IRI</i>	101
<i>Figura 44 Descripción de Datos del Archivo Climático</i>	102
<i>Figura 45 Ubicación, Tramo Cuenca-Guangarcucho</i>	106
<i>Figura 46 Temperatura, Precipitaciones y Humedad en la Provincia del Azuay</i>	106
<i>Figura 47 Mapa Geológico Cuenca – Azogues</i>	108
<i>Figura 48 Mapa Topográfico, Cordillera de los Andes</i>	109
<i>Figura 49 Recolección de datos con el FWD</i>	111
<i>Figura 50 Valores Atípicos Calzada Derecha</i>	112
<i>Figura 51 Valores Atípicos Calzada Izquierda</i>	113
<i>Figura 52 Estratigrafía de perforación El Salado – Guangarcucho</i>	114
<i>Figura 53 Datos Generales, Programa Evercalc</i>	117
<i>Figura 54 Profundidad de Capa Rígida (cm)</i>	119
<i>Figura 55 Ingreso de Datos Deflectometricos</i>	119
<i>Figura 56 Variación de Deflexiones</i>	120
<i>Figura 57 Ingreso de Datos ELLEA1</i>	121
<i>Figura 58 Calicatas Realizadas en Redondeles, Cuenca – Azogues</i>	122
<i>Figura 59 Información General MEPDG</i>	124
<i>Figura 60 Identificación del Proyecto</i>	125
<i>Figura 61 Parámetros Para Niveles de Deterioro, Pavimento Flexible</i>	125
<i>Figura 62 Sección Transversal Autopista El Salado - Guangarcucho</i>	126
<i>Figura 63 Ingreso de Datos de Tráfico</i>	127
<i>Figura 64 Factores Mensuales de Camiones</i>	127
<i>Figura 65 Tipos de Camiones, MTOP</i>	128
<i>Figura 66 Ingreso de Porcentajes de Distribución</i>	129
<i>Figura 67 Distribución Horaria de Camiones</i>	130
<i>Figura 68 Factor Horario de Crecimiento</i>	130
<i>Figura 69 Factores de Distribución de Ejes de Carga</i>	131
<i>Figura 70 Número de Ejes por Camión</i>	131
<i>Figura 71 Configuración de Ejes y Espacio entre Ejes</i>	132

<i>Figura 72 Ingreso del Archivo Climático de Cuenca.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 73 Ingreso de Datos Nivel 1 y 2.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 74 Ingreso de Datos Para el Nivel 3.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 75 Ingreso de Datos en Capa de Subrasante</i>	<i>135</i>
<i>Figura 76 Cualidades de Materiales</i>	<i>136</i>
<i>Figura 77 Datos de Capa Existente de Asfalto</i>	<i>137</i>
<i>Figura 78 Datos Generales del Asfalto</i>	<i>137</i>
<i>Figura 79 Diferencias Acumuladas Calzada Derecha.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 80 Secciones Homogéneas Calzada Derecha</i>	<i>139</i>
<i>Figura 81 Diferencias Acumuladas Calzada Izquierda.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 82 Secciones Homogéneas Calzada Izquierda.....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 83 Deformaciones Características, Calzada Derecha e Izquierda</i>	<i>142</i>
<i>Figura 84 Cuenco de deflexiones Calzada Derecha.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 85 Cuenco de deflexiones Calzada Izquierda</i>	<i>142</i>
<i>Figura 86 Redondel 12 de Octubre.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 87 Redondel 12 de Turi.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 88 Redondel Gapal</i>	<i>146</i>
<i>Figura 89 Redondel IESS</i>	<i>147</i>
<i>Figura 90 Correlación YONAPAVE vs AASHTO, C. Der.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 91 Correlación YONAPAVE vs AASHTO, C. Izq.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 92 Correlación EVERCALC vs AASHTO, C. Izq.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 93 Correlación EVERCALC vs AASHTO, C. Der.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 94 Correlación ELLEA1 vs AASHTO, C. Der.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 95 Correlación ELLEA1 vs AASHTO, C. Izq.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 96 Correlación ELLEA1 vs EVERCALC, C. Der.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 97 Correlación ELLEA1 vs EVERCALC, C. Izq.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 98 Deflexiones Medidas FWD vs Calculadas con ELLEA1</i>	<i>151</i>
<i>Figura 99 Correlación Carril Derecho</i>	<i>153</i>
<i>Figura 100 Correlación Carril Izquierdo.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 101 Estructura Diseñada, Tramo TCD1</i>	<i>155</i>
<i>Figura 102 Índice de Regularidad Internacional</i>	<i>156</i>
<i>Figura 103 Agrietamiento de Arriba hacia Abajo</i>	<i>156</i>
<i>Figura 104 Agrietamiento de Abajo hacia Arriba</i>	<i>157</i>
<i>Figura 105 Agrietamiento Térmico</i>	<i>157</i>
<i>Figura 106 Deformación Permanente, Ahuellamiento.</i>	<i>158</i>
<i>Figura 107 Estructura Diseñada, Tramo TCD2.....</i>	<i>158</i>

<i>Figura 108 Índice de Regularidad Internacional</i>	<i>159</i>
<i>Figura 109 Agrietamiento de Arriba hacia Abajo</i>	<i>160</i>
<i>Figura 110 Agrietamiento de Abajo hacia Arriba</i>	<i>160</i>
<i>Figura 111 Agrietamiento Térmico</i>	<i>161</i>
<i>Figura 112 Deformación Permanente, Ahuellamiento</i>	<i>161</i>
<i>Figura 113 Estructura Diseñada, Tramo TCII.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 114 Índice de Regularidad Internacional</i>	<i>163</i>
<i>Figura 115 Agrietamiento de Arriba hacia Abajo</i>	<i>163</i>
<i>Figura 116 Agrietamiento de Abajo hacia Arriba</i>	<i>164</i>
<i>Figura 117 Agrietamiento Térmico</i>	<i>164</i>
<i>Figura 118 Deformación Permanente, Ahuellamiento</i>	<i>165</i>
<i>Figura 119 Estructura Diseñada, Tramo TCI2.....</i>	<i>165</i>
<i>Figura 120 Índice de Regularidad Internacional</i>	<i>166</i>
<i>Figura 121 Agrietamientos desde Arriba hacia Abajo</i>	<i>167</i>
<i>Figura 122 Agrietamientos desde Abajo hacia Arriba</i>	<i>167</i>
<i>Figura 123 Agrietamientos Térmicos</i>	<i>168</i>
<i>Figura 124 Deformación Permanente, Ahuellamientos.....</i>	<i>168</i>
<i>Figura 125 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 1, Calzada Derecha ..</i>	<i>184</i>
<i>Figura 126 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 2, Calzada Derecha ..</i>	<i>185</i>
<i>Figura 127 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 3, Calzada Derecha ..</i>	<i>186</i>
<i>Figura 128 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 4, Calzada Derecha ..</i>	<i>187</i>
<i>Figura 129 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 1, Calzada Izquierda. </i>	<i>188</i>
<i>Figura 130 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 2, Calzada Izquierda. </i>	<i>189</i>
<i>Figura 131 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 3, Calzada Izquierda. </i>	<i>190</i>
<i>Figura 132 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 4, Calzada Izquierda. </i>	<i>191</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Calidad de Infraestructura Vial, América del Sur 2018.</i>	24
<i>Tabla 2 Calidad de Infraestructura Vial, América del Sur 2019.</i>	24
<i>Tabla 3 Tipos de Deterioro, en Pavimento Flexible.</i>	44
<i>Tabla 4 Tendencias Do y Valores de Área.</i>	47
<i>Tabla 5 Módulos Elásticos (E) típicos, en Materiales para Pavimentos.</i>	61
<i>Tabla 6 Relación de Poisson (ν) típicos, en Materiales para Pavimentos</i>	61
<i>Tabla 7 Coeficientes de ajuste de curva para lo y Mrr</i>	77
<i>Tabla 8 Ubicación muestras de laboratorio.</i>	85
<i>Tabla 9 Ubicación muestras de Redondeles.</i>	85
<i>Tabla 10 Relaciones de módulos retrocalculados con respecto al laboratorio.</i>	87
<i>Tabla 11 Tasas de Crecimiento de Vehículos</i>	88
<i>Tabla 12 Niveles de Entrada Para la Calibración del MEPDG</i>	94
<i>Tabla 13 Tipos de Deterioro y Niveles Recomendados para Evaluar la Situación Estructural Actual del Pavimento Flexible.</i>	98
<i>Tabla 14 Criterios de Diseño o Valores Límites recomendados.</i>	100
<i>Tabla 15 Valores de Confiabilidad de Diseño.</i>	102
<i>Tabla 16 Datos de generales de cada muestra</i>	110
<i>Tabla 17 Deflexiones medidas.</i>	110
<i>Tabla 18 Espesores de Reforzamiento para el Tramo El Salado – Guangarcucho.</i>	115
<i>Tabla 19 Espesores de Estructura de Pavimento, Tramo El Salado – Guangarcucho.</i>	116
<i>Tabla 20 Ingreso de Datos Generales, para EVERCALC.</i>	118
<i>Tabla 21 Ingreso de Datos Generales ELLEAI</i>	121
<i>Tabla 22 Datos de Laboratorio Calzada Derecha.</i>	123
<i>Tabla 23 Datos de Laboratorio Calzada Izquierda</i>	123
<i>Tabla 24 Datos, Sección Transversal Autopista</i>	126
<i>Tabla 25 Clases de Camiones, MTOP vs FHWA</i>	128
<i>Tabla 26 Porcentaje de Camiones por su Clase</i>	129
<i>Tabla 27 Propiedades de la Subrasante</i>	135
<i>Tabla 28 Normalización de la Carga a 40KN o 566 KPa.</i>	138
<i>Tabla 29 Datos de Secciones Homogéneas Calzada Derecha</i>	140
<i>Tabla 30 Datos de Secciones Homogéneas Calzada Izquierda</i>	141
<i>Tabla 31 Datos de Tráfico Redondel 12 de Octubre</i>	143
<i>Tabla 32 Datos de Tráfico Redondel Turi</i>	144
<i>Tabla 33 Datos de Tráfico Redondel Gapal</i>	145
<i>Tabla 34 Datos de Trafico Redondel Gapal</i>	146

<i>Tabla 35 Resultado de Módulos de la Subrasante</i>	<i>148</i>
<i>Tabla 36 ELLEA1, Deflexiones y Errores.....</i>	<i>151</i>
<i>Tabla 37 Número Estructural SNeF.....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 38 Valores de Mr Calzada Derecha</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 39 Valores de Mr Calzada Izquierda.....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 40 TPDA Para Diseño de Rehabilitación.....</i>	<i>154</i>
<i>Tabla 41 Espesores y Módulos para el Diseño de rehabilitación.....</i>	<i>154</i>
<i>Tabla 42 Resumen de Confiabilidad y Deterioros</i>	<i>155</i>
<i>Tabla 43 Resumen de Confiabilidad y Deterioros</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 44 Resumen de Confiabilidad y Deterioros</i>	<i>162</i>
<i>Tabla 45 Resumen de Confiabilidad y Deterioros</i>	<i>166</i>
<i>Tabla 46 Deflectometría, Normalización de Carga, Carril Derecho.....</i>	<i>176</i>
<i>Tabla 47 Deflectometría, Normalización de Carga, Carril Izquierdo</i>	<i>178</i>
<i>Tabla 48 Deflexiones Características Calzada Derecha</i>	<i>180</i>
<i>Tabla 49 Deflexiones Características Calzada Izquierda.....</i>	<i>180</i>
<i>Tabla 50 Retrocálculo Método YONAPAVE, Calzada Derecha</i>	<i>181</i>
<i>Tabla 51 Retrocálculo Método YONAPAVE, Calzada Izquierda.....</i>	<i>181</i>
<i>Tabla 52 Retrocálculo Método AASHTO, Calzada Derecha</i>	<i>181</i>
<i>Tabla 53 Retrocálculo Método AASHTO, Calzada Izquierda.....</i>	<i>182</i>
<i>Tabla 54 Retrocálculo Método EVERCALC, Calzada Derecha</i>	<i>182</i>
<i>Tabla 55 Retrocálculo Método EVERCALC, Calzada Izquierda.....</i>	<i>182</i>
<i>Tabla 56 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 1, Calzada Derecha.....</i>	<i>183</i>
<i>Tabla 57 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 2, Calzada Derecha.....</i>	<i>184</i>
<i>Tabla 58 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 3, Calzada Derecha.....</i>	<i>185</i>
<i>Tabla 59 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 4, Calzada Derecha.....</i>	<i>186</i>
<i>Tabla 60 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 1, Calzada Izquierda</i>	<i>187</i>
<i>Tabla 61 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 2, Calzada Izquierda</i>	<i>188</i>
<i>Tabla 62 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 3, Calzada Izquierda</i>	<i>189</i>
<i>Tabla 63 Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 4, Calzada Izquierda</i>	<i>190</i>

NOMENCLATURA O GLOSARIO

<i>AASHTO</i>	<i>Asociación Estadounidense de Oficiales de Autopistas y Transporte Estatales</i>
<i>PMS</i>	<i>Pavement Management Systems</i>
<i>NCHRP</i>	<i>Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras</i>
<i>PIARC</i>	<i>Permanent International Association of Road Congresses</i>
<i>FWD</i>	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
<i>CBR</i>	<i>California Bearing Ratio</i>
<i>Mrr</i>	<i>Módulo Resiliente Retrocalculado</i>
<i>Mr</i>	<i>Módulo Resiliente</i>
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>FHWA</i>	<i>Administración Federal de Carreteras</i>
<i>NDT</i>	<i>Non-Destructive Test</i>
<i>RMSE</i>	<i>Error de la raíz cuadrada media.</i>
<i>HMA</i>	<i>Mezcla de Asfalto en Caliente</i>
<i>LET</i>	<i>layered elastic theory</i>
<i>MEPDG</i>	<i>Mechanistic Empirical Pavement Design Guide</i>

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Cesar Mauricio Balarezo Durán en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo “Evaluación Estructural del Pavimento de la Vía Cuenca - Azogues, Tramo El Salado - Guangarcucho (20 km), con el Método no Destructivo FWD (Falling Weight Deflectometer) y Diseño de su Rehabilitación.”, 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.

Así mismo, 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, 19 de septiembre de 2022



Cesar Mauricio Balarezo Durán

CI: 0102434545

Cláusula de Propiedad Intelectual

Cesar Mauricio Balarezo Durán autor del trabajo de titulación “Evaluación Estructural del Pavimento de la Vía Cuenca - Azogues, Tramo El Salado - Guangarcucho (20 km), con el Método no Destructivo FWD (Falling Weight Deflectometer) y Diseño de su Rehabilitación.”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 19 de septiembre de 2022



Cesar Mauricio Balarezo Durán

CI: 0102434545

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la oportunidad de iniciar este proyecto, guiarme para que lo termine y por todo lo que vendrá.

Al MTOP por ayudar con los datos deflectometricos, en especial a la Ing. Jhanet Lojano.

A la Universidad de Cuenca, por su gestión académica y a todos sus docentes,

A mi hija Alejandra, por todo su aporte.

A mi estimada amiga Cecilia, por ser mi compañera que nunca faltó con su ayuda intelectual en este proyecto.

DEDICATORIA

Con infinito amor a mi Madre, por ser la gestora de mi formación.

A mi Padre, por estar siempre conmigo.

A mis amados hijos Marcela, Alejandra, Josué y en especial a Samuel que nació para ser mi inspiración.

A toda mi familia, que estuvo apoyándome en todo momento.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Introducción

Un pavimento flexible está conformado por varias capas donde cada una tiene cualidades específicas para soportar determinadas exigencias de carga. Este paquete estructural está compuesto por: una capa de rodadura de concreto asfáltico, una capa granular conocida como base y otra capa granular conocida como subbase; además, estas se asientan sobre el terreno natural haciendo la función de cimentación de la estructura. La capacidad de la estructura de un pavimento se puede describir de la mejor manera midiendo los módulos elásticos de cada capa y el módulo resiliente M_R de la subrasante que corresponden al módulo de Young medido después de aplicar cargas repetitivas donde los materiales se comportan de una manera elástica o resiliente.

El valor de M_R obtenido en laboratorio se define como el esfuerzo desviador (Esfuerzo principal mayor – Esfuerzo principal menor), sobre la deformación axial. Estos parámetros son definidos en un ensayo triaxial.

$$M_R = \frac{\rho_1 - \rho_3}{\epsilon_{Axial}} \quad (1)$$

En el sitio de estudio, el módulo M_R depende también de las características soportantes de la capa subyacente. Por tanto, el módulo resiliente in-situ tiene un valor diferente al módulo que se obtiene en laboratorio.

La utilización del valor de CBR como capacidad estructural en las especificaciones técnicas de un proyecto se debe a que la realización de este ensayo es mucho más simple y económico en comparación al ensayo para obtener el M_R . Al determinar el valor relativo de soporte CBR se puede además obtener mediante correlaciones el valor del M_R . Sin embargo, los datos obtenidos de un ensayo CBR son empíricos, por lo que no representan el comportamiento y las condiciones reales de las capas granulares de una estructura de pavimento.

La deflectometría de impacto con el FWD es una técnica que se está aplicando en Ecuador desde hace varios años atrás. Al igual que en todo el mundo, se ha usado principalmente en la prospección de pavimentos existentes con capas de rodadura tanto asfáltica como de hormigón. Esta técnica combinada con retroanálisis (retrocálculo) permite

estimar la capacidad de soporte del suelo de fundación (subrasante) y la capacidad estructural del pavimento. En particular, para los pavimentos flexibles, es posible estimar el módulo resiliente del suelo de fundación, el módulo de las capas granulares y el módulo de la mezcla asfáltica. Al aplicar la metodología de retrocálculo propuesta en la Guía de Diseño AASHTO 1993, es posible estimar también el número estructural efectivo.

En Ecuador, la red vial estatal está integrada por las vías primarias (corredores arteriales) y vías secundarias (colectoras). Las vías primarias y secundarias son arterias de mayor demanda de tráfico vehicular que comunican a las capitales de provincia, ciudades, y grandes y medianos centros de actividad económica. La longitud total de la Red Vial Estatal es de aproximadamente 10.132,74 km de carretera (MTOPE, Reporte de estado de la red vial estatal, 2019). La vía de análisis es la Troncal de la Sierra E35 Rumichaca - Ambato - Riobamba - Cuenca - Loja - Macará, específicamente el segmento en estudio será parte de la vía Cuenca - Azogues, correspondiente al Tramo El Salado - Guangarcucho.

1.2 Problemática.

La infraestructura vial interprovincial en la zona austral del Ecuador se ha desarrollado en los últimos años mediante la ampliación y rehabilitación de carreteras existentes, las mismas que demandaban atención inmediata. La inversión que el Ministerio de Transporte y Obras Públicas realiza en las carreteras locales para el mantenimiento por lo general es limitada, por lo que éstas requieren una especial atención hacia su cuidado y protección. Tal es el caso de la rehabilitación y ampliación de la vía Cuenca - Azogues en pavimento asfáltico, que llegó a una inversión aproximada de 135'720.000 USD (MTOPE, Rendición de cuentas, 2018).

La construcción de obras viales en esta zona es particularmente complicada debido a varios factores, a saber: calidad de subrasante desfavorable en varios tramos, zonas de riesgo geológico que producen deslizamientos constantes, calidad de materiales pétreos muy variable y adicionalmente, en general, problemas por deficiencias en los materiales y en las metodologías de construcción. Por tales razones, se vuelve imperiosa la necesidad de un monitoreo y verificación del estado de la obra, con el objeto de garantizar su adecuado desempeño a lo largo de su vida útil o bien, la toma de decisiones necesarias de forma oportuna. En tal virtud, el presente estudio se enfoca en la evaluación estructural del pavimento del Tramo El Salado - Guangarcucho, y propuesta de su rehabilitación.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general.

El objetivo general de este estudio es realizar una evaluación estructural del pavimento del Tramo El Salado – Guangarcucho, de la vía Cuenca - Azogues y la propuesta de rehabilitación del pavimento.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar una zonificación estratégica de tramos homogéneos de vía, que contengan características similares en cuanto a: geología, geomorfología, topografía, estructura vial.
- Determinar las deformaciones de la estructura del pavimento en el Tramo El Salado - Guangarcucho, con mediciones no destructivas (Non-Destructive Test, NDT) con el deflectómetro FWD (Falling Weight Deflectometer), las cuales serán tomadas cada 200 metros aproximadamente, dependiendo de la zonificación previamente realizada.
- Determinación de sectores homogéneos en función de los resultados de la deflectometría.
- Evaluar el número estructural efectivo de la estructura del pavimento, mediante el retroanálisis (retrocálculo).
- Evaluar ensayos de laboratorio realizados a los materiales obtenidos en los sectores homogéneos del tramo de vía como: humedad, índices de Atterberg, CBR.
- Analizar la correlación entre los parámetros calculados con el método no destructivo FWD y aquellos obtenidos por método destructivo en sectores homogéneos.
- Diseño de la rehabilitación del pavimento del Tramo El Salado - Guangarcucho.

1.4 Alcance

La Evaluación Estructural de un pavimento tiene por objeto la cuantificación de la capacidad portante de la estructura del pavimento y a su vez la vida remanente del mismo. 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 por falta de aplicación de acciones de conservación preventivas. Se entiende por deflexión, a la deformación elástica que sufre un pavimento flexible bajo la acción de una carga vehicular

estándar. Mediante ella es posible evaluar el debilitamiento progresivo de la estructura debido a las solicitaciones del tránsito que lo utiliza (Fonseca, 1998).

El presente estudio iniciará con el análisis estructural del Tramo El Salado – Guangarcucho de la vía Cuenca – Azogues por el método no destructivo usando el FWD (Falling Weight Deflectometer), mediante el cual se medirán las deformaciones en el carril crítico en sectores homogéneos. El equipo FWD aplica cargas cíclicas que simulan la carga dinámica de una llanta de un vehículo midiendo las deformaciones (cuenco de deflexiones) en el pavimento con varios sensores o geófonos empotrados en una regleta los cuales se encuentran colocados a diferentes distancias desde el centro de un plato de carga que tiene un diámetro de 30 cm. Mediante modelos matemáticos (retrocálculo) es posible hallar parámetros como el número estructural efectivo (*SNe_f*) y los módulos elásticos de cada capa; los cuales son necesarios para el diseño de rehabilitación. Adicionalmente el MTOP facilita ensayos de laboratorio de intercambiadores que serán construidos sobre el tramo de estudio; de donde se obtienen parámetros característicos de cada capa como: tipo de material, contenido de humedad, CBR, entre los más importantes. Con esta información se realizará una verificación mediante correlación de los datos obtenidos con el FWD. Finalmente se realizará el diseño de la sobrecarpeta con el método MEPDG de la AASHTO 2008.

Capítulo 2

Marco Referencial

2.1 Introducción

Tras varios años de crisis financiera mundial, los países con economías limitadas dependen mucho de decisiones acertadas de sus gobernantes para poder mantenerse en un equilibrio socio-económico. Los indicadores de compatibilidad mundial miden la productividad de cada país y sirven de referencia de inversión de grandes firmas de negocios. A a continuación; en las Tabla 1 y Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos tras el análisis en un total de 140 países los indicadores de Calidad de la infraestructura vial de Sudamérica.

Tabla 1

Calidad de Infraestructura Vial, América del Sur 2018.

<i>AÑO 2018</i>		
<i>PAIS</i>	<i>PUNTUACIÓN</i>	<i>RANKING</i>
CHILE	5,20	24
ECUADOR	5,10	29
BOLIVIA	3,40	98
URUGUAY	3,30	95
ARGENTINA	3,30	96
BRASIL	3,10	103
COLOMBIA	3,00	110
PERU	3,00	108
VENEZUELA	2,80	119
PARAGUAY	2,40	131

Fuente: Foro Económico Mundial, 2018.

Tabla 2

Calidad de Infraestructura Vial, América del Sur 2019.

<i>AÑO 2019</i>		
<i>PAIS</i>	<i>PUNTUACIÓN</i>	<i>RANKING</i>
CHILE	5,20	25
ECUADOR	4,90	35
URUGUAY	3,70	86
ARGENTINA	3,60	92
BOLIVIA	3,50	100
COLOMBIA	3,40	104
PERU	3,20	110
BRASIL	3,00	116
PARAGUAY	2,60	126
VENEZUELA	2,60	128

Fuente: Foro Económico Mundial, 2019.

Como se puede observar, en el año 2018 el Ecuador se encuentra en el segundo lugar en Sudamérica y ubicándose dentro de la clasificación mundial en el puesto 29. Para el año 2019, Ecuador aún mantiene en el segundo lugar en Sudamérica a pesar de que su puntuación tiene un decremento; pero, su clasificación a nivel mundial baja 6 posiciones. No existen datos del año 2020 ni 2021 debido a la pandemia por Covid-19. Muy probablemente para años próximos estos indicadores disminuirán si no hay una intervención en el sistema vial del país. Es importante cuestionarse si se dio el grado de importancia necesario para conservar nuestra estructura vial en el año 2020 y si las instituciones estatales tienen programado un *Sistema de Gestión de Pavimentos* para la red estatal nacional.

2.2 Sistemas de Gestión de pavimentos

Conservar la infraestructura vial de un país es importante para optimizar la gestión de los recursos destinados a la estructura vial y los sistemas de transporte. Controlar los procesos que intervienen en mantener las vías en buen estado no es tarea fácil. Por ello, se han creado los *Sistemas de Gestión de Pavimentos* (PMS, por sus siglas en inglés), término que originalmente empezó a usarse a finales de los años sesenta a partir de los trabajos de investigación de la American Association of State Highway Officials (AASHO), la University of Texas y el Texas Transportation Institute. (Díaz, 2014). La problemática de los años 60 se involucra básicamente en el tamaño de las redes de carreteras de un estado, aumento de las cargas de tránsito, cantidad de información al respecto y los recursos suficientes que se disponga. Todos estos puntos exigen un sistema de pavimentos que resuelva la problemática. El enfoque recomendado para un sistema de pavimentos se basa en el pronóstico de los indicadores de condición y en la definición de las estrategias de conservación. En este contexto, el sistema de gestión de pavimentos nos dirá siempre que hacer.

Los sistemas de gestión de pavimentos deben garantizar que la mayoría o la totalidad de las vías se conserven con excelente calidad de servicio, considerando con una planificación y programación para poder ejecutar las acciones necesarias a tiempo asegurando un mejor manejo de los recursos.

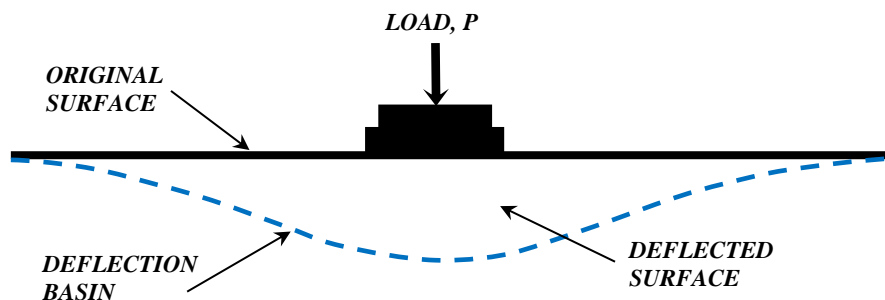
2.3 Deflectometría

2.3.1 Introducción

Realizar una deflectometría es una manera fácil, rápida, y económica de evaluar la condición estructural del pavimento en una carretera de manera no destructiva. Con el pasar del tiempo se han utilizado varios equipos para la obtención de datos de deflexión; desde dispositivos simples de masa amortiguada y medidores mecánicos hasta equipos sofisticados con tecnología basada en láser. Sin embargo, todos los equipos para realizar pruebas de deflexión en pavimentos funcionan básicamente de la misma manera. Se aplica una cierta carga en el pavimento y se mide la deflexión bajo la carga en la superficie, o una serie de deflexiones ubicadas a distancias radiales de la carga, conocidas como cuenco de deflexiones (U.S. Department of Transportation, 2017). En la Figura 1, se muestra un esquema del cuenco de deflexiones.

Figura 1

Cuenca de Deflexiones.



2.3.2 Pruebas Deflectométricas.

El objetivo principal de las pruebas de deflexión (ver Figura 2) es definir la estructura de un pavimento existente y evaluar su capacidad para soportar las cargas de tráfico futuras. Existe una fuerte correlación entre las deflexiones y la capacidad estructural del pavimento para soportar cargas de tráfico a un nivel mínimo de servicio. Identificar los límites de deflexión máxima por debajo de los cuales se esperaba que los pavimentos tengan un adecuado desempeño dentro del periodo de diseño es muy importante para comprobar los espesores actuales a la espera que puedan cumplir su objetivo, caso contrario se diseñaría la superposición para reducir las deflexiones a niveles tolerables.

Las pruebas completas de deflexión pueden mostrar propiedades claves en la estructura del pavimento existente a través del cálculo retroactivo. Específicamente para pavimentos

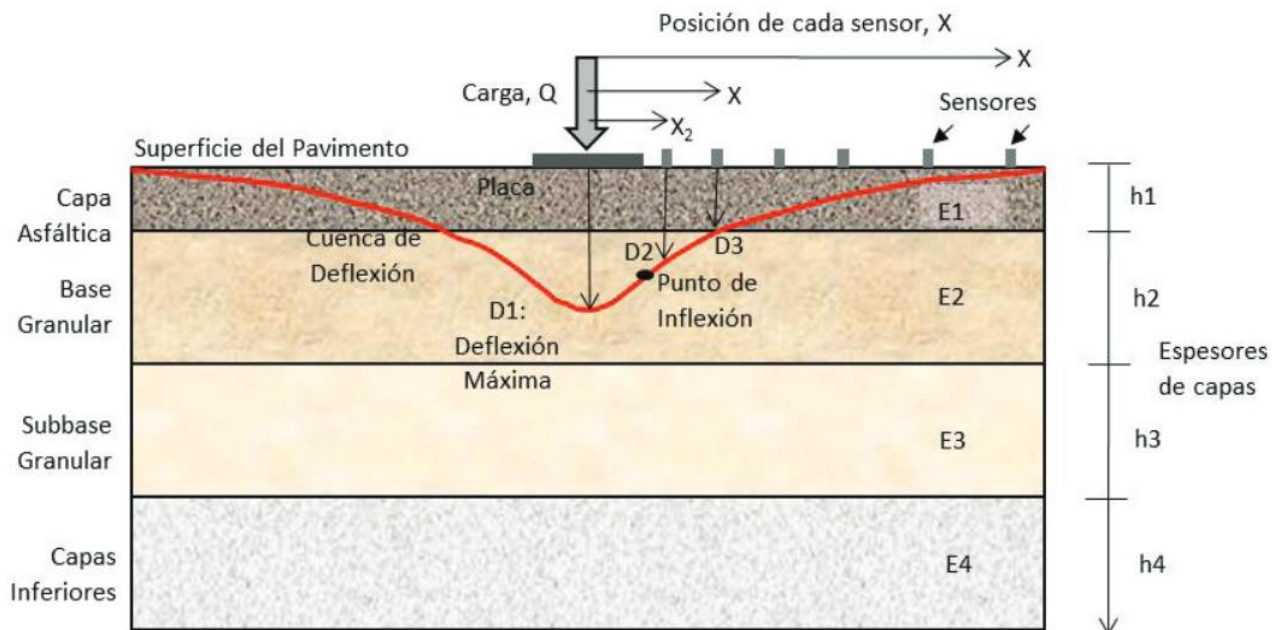
HMA (Hot Mix Asphalt) se puede determinar el módulo de elasticidad (MI) de las capas de pavimento y el módulo resiliente (M_R) de la subrasante. Estas propiedades se utilizan en los procedimientos de diseño de pavimentos o en modelos de predicción de rendimiento para estimar la vida útil restante o la capacidad de carga del pavimento. Se puede utilizar también en programas de capas elásticas o elementos finitos para calcular tensiones, deformaciones y deflexiones en las capas del pavimento; también son datos de ingreso en procedimientos de diseño de superposición para determinar el espesor requerido en las futuras condiciones de cargas de tráfico.

Las medidas de las deflexiones pueden ser utilizadas para caracterizar la condición del pavimento existente. El conjunto de datos de deflexión de un proyecto de pavimento puede examinarse en busca de falta de uniformidad; lo que sugiere áreas que requieren más investigación utilizando medios destructivos. También se usan criterios de deflexión para establecer restricciones de carga para ciertas carreteras de bajo volumen. Las pruebas de deflexión también se han usado para monitorear la calidad de un pavimento durante la construcción. Para un sistema de gestión de pavimentos se pueden realizar pruebas de deflexión a nivel de red para proporcionar una indicación general de la capacidad estructural del pavimento. Las pruebas no destructivas para calcular la deflexión del pavimento brindan algunas ventajas sobre las pruebas destructivas, las cuales según (U.S. Department of Transportation, 2017) son:

- *Operación de prueba más rápida.*
- *Relativa facilidad de operación.*
- *Menor costo operativo.*
- *Requisitos de mano de obra reducidos.*
- *Procedimiento menos complicado.*
- *Mayor número de puntos de prueba.*

Figura 2

Estructura de Pavimento con Mediciones Deflectométricas.



Fuente: Revista Ingeniería Investigación y Tecnología, 2014.

2.3.3 Equipos de Medición de deflexión en pavimentos

Existen varios dispositivos de prueba de deflexión disponibles comercialmente. Estos dispositivos de medición pueden agruparse según el tipo de carga impartida sobre el pavimento, como son:

- ➔ *Carga Estática.*
- ➔ *Carga Vibratoria en estado estable.*
- ➔ *Carga de Impulso.*
- ➔ *Carga Continua.*

Carga Estática.

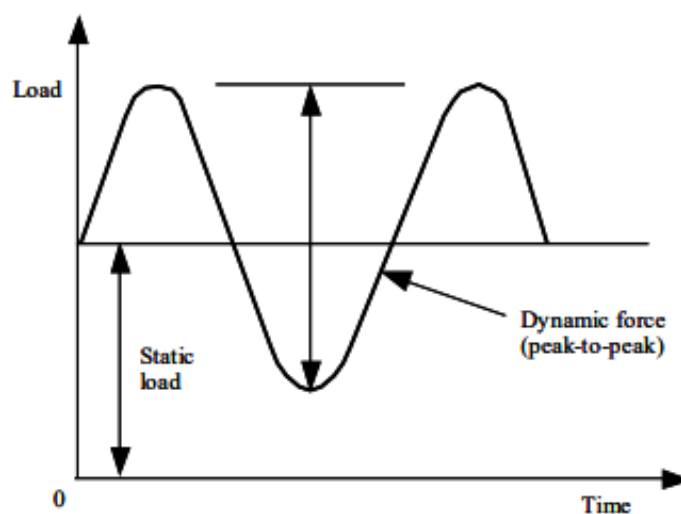
Los dispositivos de carga estática miden las deflexiones del pavimento bajo una carga de rueda estática. Los dispositivos más comunes para realizar este tipo de mediciones es la viga Benkelman, pruebas de soporte de placa y medidores de curvatura. De los mencionados la viga Benkelman es la más utilizada; fue inventada por AC Benkelman en la década de 1950 y utilizado en muchos proyectos de la época.

Carga Vibratoria en estado estable.

En este tipo de dispositivos de deflexión se utiliza una carga inicial estática relativamente grande sobre el pavimento mediante la aplicación de una fuerza sinusoidal superpuesta que simula una condición de carga dinámica. Una serie típica de carga se muestra en Figura 3, donde la carga estática es constante y la producción de una fuerza dinámica con una frecuencia de conducción fija. El alcance de la fuerza dinámica pico a pico tiene que ser menor que la fuerza estática para evitar que el dispositivo rebote en la superficie del pavimento.

Figura 3

Salida típica de un generador de fuerza vibrante en estado estable



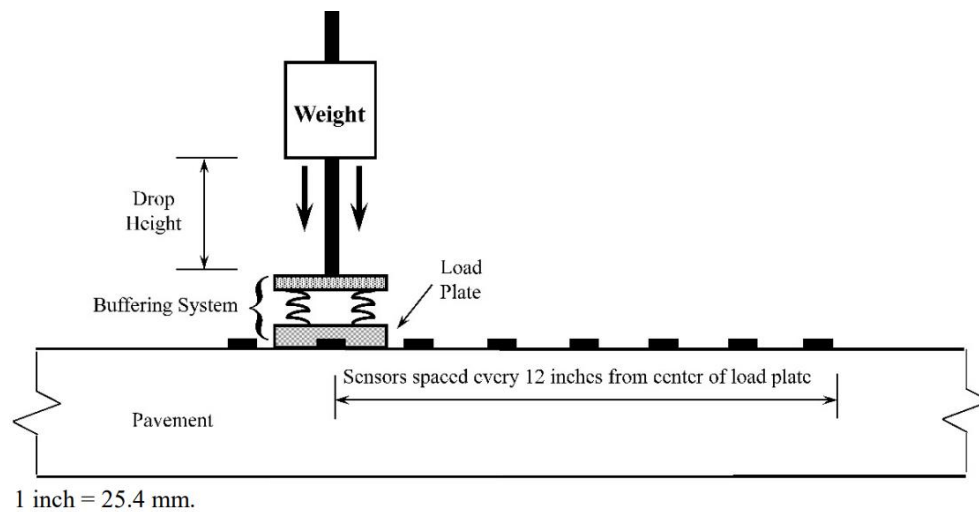
Fuente: Instituto Nacional de Carreteras de USA.

Carga de Impulso.

En esta categoría de dispositivos se utiliza carga de impulso, lo cual se logra con el FWD (Falling Weight Deflectometer). En la actualidad es el dispositivo más común para la medición de deflexiones y es, por lo tanto, de gran importancia en este proyecto de titulación. Como se indica en la Figura 4, desde una altura establecida el FWD deja caer un peso conocido sobre la placa de carga que descansa en el pavimento; produciendo así, una acción sobre el pavimento que resulta similar (magnitud y duración) a la carga de una rueda en movimiento. Varios sensores ubicados a ciertas distancias del centro de carga se encargan de recolectar los datos de mediciones para formar el cuenco de deflexión. Las variaciones en la carga aplicada al pavimento se determinan cambiando la altura de caída y el peso.

Figura 4

Esquema de prueba del FWD.



Fuente: FHWA -HRT-16-011, 2017.

Ventajas y desventajas de los equipos con carga por impulso.

Podemos mencionar varias ventajas de los dispositivos de cargas de impulso, las cuales son las siguientes:

- Altísima productividad.
- Simulación realista de la aplicación de carga producida por una rueda.
- Capacidad para medir la transferencia de carga de fisuras/juntas.
- Capacidad para medir el cuenco de deflexión.

Sin embargo, el FWD tiene algunas desventajas, entre las cuales se tiene:

- Control de tráfico para la toma de datos.
- Alto costo inicial.
- Sistema electromecánico muy complejo.

Carga Continua.

En los últimos años se han desarrollados trabajos importantes en la medición de deflexiones con equipos sofisticados y se han desarrollado perfiles de deflexión continua que proporcionan las siguientes ventajas:

- Se puede realizar la investigación completa de un proyecto cubriendo el tramo longitudinal en su totalidad con datos de deflexión considerando secciones críticas para

su análisis. Se debe considerar también que una sección representativa como muestra puede representar todo el sistema de proyecto de pavimentos.

- Se puede identificar la variabilidad en las deflexiones debido a características del pavimento, como fisuras, grietas, juntas, parches y condiciones cambiantes de construcción o subrasante.
- Las operaciones para las mediciones son más eficientes debido a disminución de tiempo para la toma de datos.

Hasta la fecha se han desarrollado dos de estos dispositivos, el deflectómetro dinámico rodante RDD (Rolling Dynamic Deflectometer) y el deflectómetro de rueda rodante RWD (Rolling Wheel Deflectometer), como se indica en la Figura 5. Los dos dispositivos están en etapa de prototipo sin modelos de producción disponibles.

Figura 5

Rolling Wheel Deflectometer RWD



Fuente: FHWA - vol. 67 n° 4, 2004.

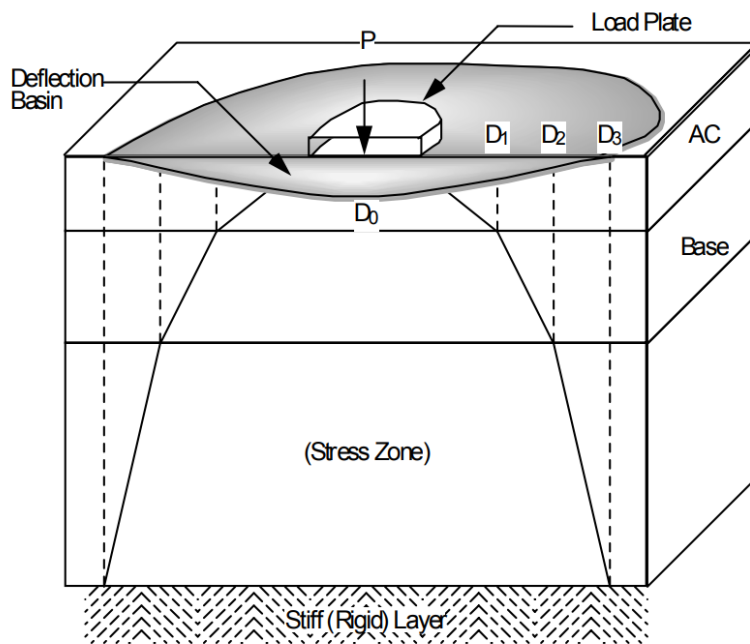
2.4 Retrocálculo

Retrocálculo es un conjunto de operaciones matemáticas empíricas o teóricas mediante las cuales las deflexiones tomadas en campo por un equipo deflectométrico son transformadas a módulos elástico o resiliente de una estructura de pavimento. En el ámbito de la ingeniería de pavimentos se usa frecuentemente los ensayos deflectométricos para la evaluación de su estructura y rehabilitación de la misma. El equipo más utilizado a nivel mundial es el

deflectómetro de impacto FWD (Falling Weight Deflectometer); esta preferencia es debido al carácter dinámico de la carga de ensayo y a la toma de deflexiones a diferentes radios desde centro de la aplicación de carga con sensores sísmicos o geófonos. Las deflexiones obtenidas en el extremo del cuenco reflejan la característica de la subrasante mientras que las obtenidas en el centro de aplicación de carga refleja la condición de las capas superficiales.

Figura 6

Ilustración de Retrocálculo para Estimar Módulos de Capa.



Fuente: EVERSERIES USER'S GUIDE.

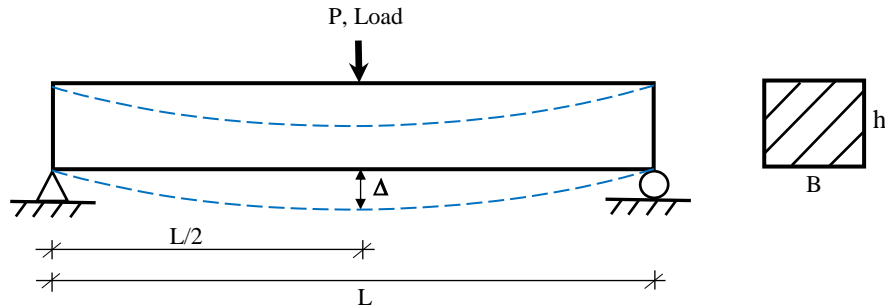
Varios softwares involucrados en el retrocálculo utilizan la teoría elástica lineal aplicada a suelos como la solución planteada por Boussinesq y luego ampliada por Burmister. También hay teorías similares como la de Odemark y el método de elementos finitos.

2.4.1 Proceso general de Retrocálculo.

El Retrocálculo es la técnica más utilizada para determinar los módulos elásticos efectivos de las capas estructurales del pavimento y la subrasante en función de las mediciones de deflexiones superficiales. El proceso para determinar el módulo elástico se puede describir utilizando el caso de una viga simplemente apoyada, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 7.

Viga simplemente apoyada con carga puntual.



Fuente: Federal Highway Administration.

Aplicado la ingeniería mecánica, si la carga P está ubicada en la mitad de la longitud libre L la deflexión máxima ocurre justo bajo la carga aplicada y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (2)$$

Donde:

Δ = Deflexión de la viga en el centro del tramo.

P = Carga aplicada a la superficie.

L = Longitud libre.

h = Altura.

b = Ancho.

La Inercia con respecto a la sección de la viga rectangular, se puede calcular de la siguiente formula:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (3)$$

Sustituyendo los valores de geometría y carga se puede obtener el valor del módulo elástico de la viga (E). El retrocálculo es más complejo por varias incógnitas como los módulos de las diversas capas de la estructura del pavimento y su proceso matemático de cálculo.

A lo largo de los años los investigadores han desarrollado diversos programas de cálculo de módulos elásticos con diferentes características como: tipo de pavimento (flexible-rígido), metodología de cálculo, número de capas, etc. Existen programas que son de dominio público como BAKAA, CHEVDEF, MICHBACK, MODCOMP, MODULUS, PCASE, WESDEF, EVERCALC, ELLEA1, etc.

2.5 Mantenimiento.

Las cargas de tráfico producen efectos que combinados con el medio ambiente harán que los pavimentos, sin importar cuán bien diseñados y contruidos estén, se deterioren con el tiempo. El mantenimiento y la rehabilitación son acciones que se utilizan para ralentizar o restablecer este proceso de deterioro. Las acciones de mantenimiento como el sellado de juntas, el sellado de fisuras o grietas, capas de revestimiento y los parches, ayudan a reducir el porcentaje de deterioro, identifican y abordan las deficiencias específicas del pavimento, que contribuyen al deterioro general. La rehabilitación es la acción de reparar partes de un pavimento existente deteriorado para restablecerlo. Solo con mantenimiento rutinario se puede mejorar, fortalecer o rescatar pavimentos deficientes para que continúen con su servicio. Si los pavimentos deficientes exhiben deterioros en exceso se tiene que manejar una solución integral, la cual sería una rehabilitación o reconstrucción. La reconstrucción de un pavimento no se considera rehabilitación, sino más bien nueva construcción puesto que la metodología utilizada es la misma para desarrollar la construcción de un pavimento. (Pavement Tools Consortium, 2021).

2.6 Rehabilitación.

El mantenimiento rutinario puede disminuir el ritmo de deterioro del pavimento, pero si los efectos del deterioro son agresivos se debe revertir mediante la adición o sustitución de material en la estructura del pavimento existente. Esta sobre carpeta asfáltica se llama rehabilitación, y tiene opciones que depende de las condiciones del pavimento y los riesgos a los que se enfrenta.

Las superposiciones de mezcla asfáltica en caliente (HMA) se utilizan para funciones estructurales y no estructurales.

Las superposiciones estructurales se diseñan para añadir soporte estructural al pavimento existente. Debido a condiciones de carga y estado de deterioro, los pavimentos están diseñados estructuralmente y son más gruesos que las superposiciones no estructurales.

Las superposiciones no estructurales se diseñan para frenar el curso de desgaste del pavimento existente. Debido a esto, contribuyen muy poco a la estructura del pavimento y se considera en algunos casos como elementos de mantenimiento. Cuando la recuperación de la carpeta es de profundidad completa se considera una reconstrucción. En cuanto al reciclaje, se tiene dos tipos de reciclaje in-situ, el reciclaje in-situ caliente y reciclaje in-situ en frío. (Pavement Tools Consortium, 2021).

2.7 Diseño de Pavimentos

El diseño estructural de pavimentos tiene como objetivo principal la determinación del número de capas, tipo de material y el espesor de cada capa (rodadura, base o subbase y subrasante) que conforma la estructura del pavimento que soportara una carga determinada.

Los pavimentos de mezcla asfáltica en caliente determinan principalmente el espesor y la composición adecuada de cada una de las capas. El análisis de cálculo se basa en las tensiones de carga por el tráfico vehicular, las tensiones relacionadas con el ambiente como la temperatura y se toman en cuenta el diseño de la mezcla asfáltica.

Los pavimentos de hormigón hidráulico determinan principalmente el espesor de losa apropiado para soportar las cargas de tráfico, las características del material, y el diseño de juntas. Se consideran varias tensiones que afectan el rendimiento del pavimento rígido: tensiones de temperatura (dilatación / contracción), tensiones por deformaciones y por carga vehicular.

Para el diseño estructural de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente y de hormigón hidráulico se presenta dos métodos que son:

- Método Empírico: La Guía AASHTO 1993, para pavimentos rígidos y flexibles.
- Método Mecanicista: La Guía de diseño 2002, NCHRP 1-37^a. para pavimentos rígidos y flexibles.

En la actualidad se presentan softwares avanzados de diseño de estructuras de pavimentos, rehabilitación y reconstrucción, tal es el caso del programa AASHTOWare para el diseño Empírico – Mecanicista de Pavimentos.

2.7.1 Diseño Empírico de Pavimentos

Los métodos empíricos son aquellos que se basan netamente en resultados experimentales o experiencias técnicas. Por tal motivo, es necesario realizar una serie de observaciones para encontrar relaciones entre las variables de entrada y los resultados. No es necesario establecer firmemente la base científica para las relaciones entre las variables y los resultados; siempre y cuando se reconozcan las limitaciones de dicho enfoque. No se puede utilizar un análisis empírico para describir fenómenos que estén fuera del rango de los datos utilizados para desarrollar tal análisis.

Varios procedimientos de diseño de pavimentos utilizan el método empírico. Este método determina que la relación entre los requerimientos de diseño (cargas, materiales,

configuraciones de capas y entorno) y la falla del pavimento se llega a través de la experiencia, la experimentación o una combinación de ambos. Las variaciones de los métodos de diseño empírico pueden ir desde muy simples hasta bastante complejos. Los análisis simples especifican diseños de la estructura de pavimento en base a los diseños que han funcionado en el pasado. Los análisis complejos se basan en ecuaciones empíricas derivadas de la experimentación, como las ecuaciones empíricas utilizadas en la Guía AASHTO de 1993, que son en su mayoría el resultado de la prueba experimental de carretera AASHTO original (1950-1960).

2.7.2 Diseño Empírico – Mecanicista de Pavimentos

La ingeniería mecánica es un campo muy amplio que implica el uso de los principios de la física para el análisis. Por lo tanto, un enfoque mecanicista busca explicar solo los fenómenos debidos a causas físicas. Dentro de un diseño de pavimento los fenómenos son los esfuerzos, tensiones, deformaciones y deflexiones dentro de una estructura de pavimento y las causas físicas son las cargas y las propiedades de los materiales de la estructura del pavimento. La relación entre fenómenos y sus causas físicas se pueden describir usando un modelo matemático en donde el más común es el *modelo elástico en capas*. Junto con el análisis mecanicista se utilizan variantes empíricas al definir qué valor de los esfuerzos, tensiones, deformaciones y deflexiones calculadas resultan en fallas en el pavimento. La relación entre los fenómenos físicos y la falla del pavimento se describe mediante ecuaciones derivadas empíricamente que calculan el número de ciclos de carga para su falla.

Las ventajas de un método Empírico - Mecanicista para el diseño de pavimentos, sobre un método empírico son:

- Se pueden utilizar para la construcción de nuevos pavimentos como para la rehabilitación del pavimento existente.
- Se adapta a los cambios de varios tipos de carga y volúmenes.
- Puede caracterizar mejor los materiales permitiendo:
 - ➔ Mejor utilización de los materiales disponibles.
 - ➔ Ingreso de nuevos materiales.
 - ➔ Una definición mejorada de las propiedades de cada capa.
- Utiliza propiedades de materiales que se relacionan mejor con el rendimiento real del pavimento.
- Proporciona predicciones de rendimiento más confiables.

- Define mejor el papel de la construcción.
- Se adapta a los efectos ambientales y de envejecimiento en los materiales.

El método Empírico – Mecanicista tiene la capacidad de caracterizar con precisión el material en sitio (capas existentes en el pavimento y el subsuelo). Para obtener mediciones reales de deflexión en una estructura de pavimento que se pretenda rehabilitar los datos de caracterización se obtienen de un dispositivo portátil (Falling Weight Deflectometer). Con las mediciones obtenidas y la combinación con el retrocálculo (Backcalculation) es posible determinar el soporte estructural del pavimento existente y la vida útil restante del mismo (Pavement Tools Consortium).

Capítulo 3

Marco Teórico

Este capítulo contiene los antecedentes, bases teóricas y los conceptos, que representan las claves para cumplir con los objetivos planteados en este estudio. Nos permite hacer una revisión técnica de conceptos generales, evaluación de pavimentos, deflectometría, retrocálculo y rehabilitación.

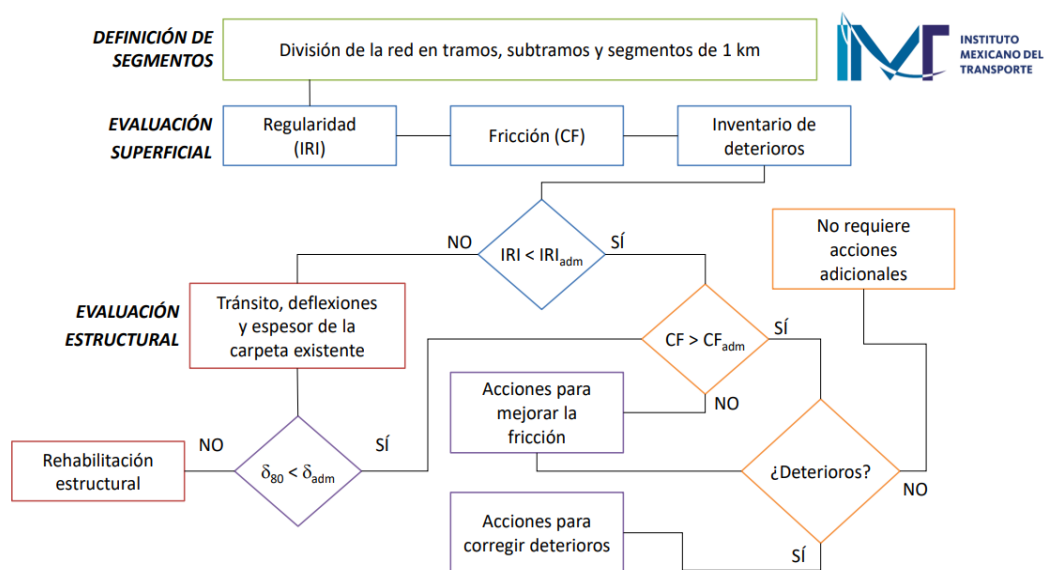
3.1 Gestión de Pavimentos

La gestión de pavimentos es la conducción efectiva y eficiente de las diversas actividades involucradas en el suministro y preservación de pavimentos en una condición aceptable para el público usuario al menor costo del ciclo de vida (AASHTO 1985).

Una gestión de pavimentos como primer orden tiene que definir los segmentos o tramos que serán analizados en una menor longitud posible (Figura 8). Dentro de la evaluación superficial se necesita tener claro los límites o tolerancias del Índice de Regularidad Internacional (IRI), el Coeficiente de Fricción (FC), y un inventario de deterioros. En la evaluación estructural, tener una cuantificación precisa de tipos de vehículos, considerando como dato importante los vehículos que van sobrecargados. En este mismo tema la auscultación se presenta como determinante ya que de este estudio se definirá la posibilidad de rehabilitación o reconstrucción. (IMT, 2002).

Figura 8

Diagrama, Gestión de Pavimentos.



La sostenibilidad está presente en la comunidad mundial, cada país está consciente de la reducción de impactos negativos por sus actividades diarias. En este sentido los profesionales encargados de pavimentos tienen la obligación de desarrollar tecnologías que incorporen un alto contenido de materiales reciclados; así también todas las prácticas de la disminución del volumen total de gases de efecto invernadero (huella de carbono). En este contexto, la Gestión de Pavimentos en la medida de cada país tiene que incorporar la acción de sostenibilidad en lo que sea posible.

3.2 Evaluación Superficial

Las vías recién construidas prestan comodidad a los usuarios por su regularidad superficial y cada país tiene su condición límite para este parámetro. Las vías en construcción o en rehabilitación de sobre carpetas tienen que contar con una fricción adecuada para no comprometerse cuando se realiza el frenado. Con el pasar del tiempo se presentan varios deterioros en la superficie del pavimento; por todo lo dicho es necesario realizar una acertada evaluación superficial según mande la gestión de pavimentos.

3.2.1 Índice de rugosidad internacional (IRI)

El IRI es una continuación estadística de la irregularidad de la superficie del pavimento y se encuentra en uso desde que se desarrolló el automóvil. Los inicios de las mediciones datan del año 1940; pero, la diferencia de resultados se debe a la medición desde distintos vehículos. Algunos estados de USA solicitan investigaciones a finales de los años 70 y luego

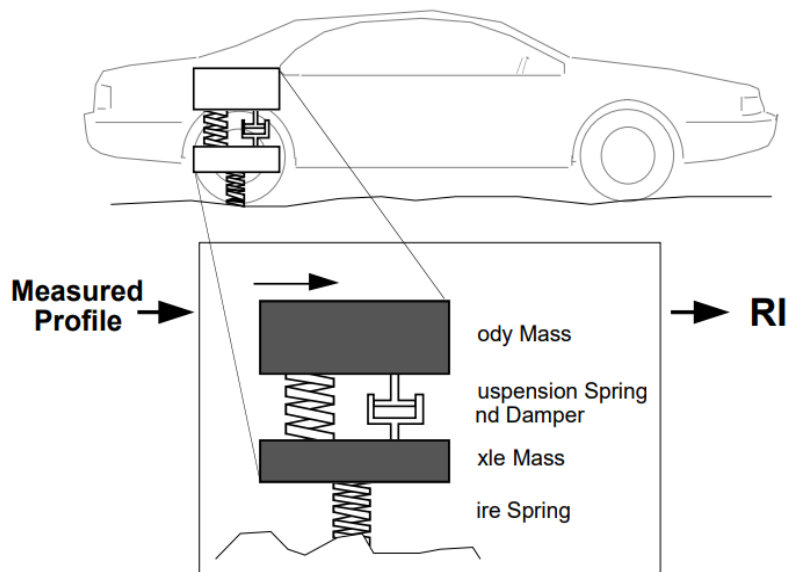
los estudios son analizados por el Programa de Investigación de la Cooperativa Nacional de Carreteras (NCHRP siglas en inglés), los resultados son publicados en el informe *NCHRP 228*.

En el informe descrito en *NCHRP 228*, para calibrar los sistemas tipo respuesta se desarrollan modelos matemáticos en el vehículo y en el medidor sobre las carreteras.

El modelo de *cuarto de automóvil* (Quarter car) utilizado en el algoritmo IRI es exactamente lo que su nombre implica; un modelo de una esquina (un cuarto) de un automóvil. El modelo se muestra esquemáticamente en la Figura 9 que incluye: un neumático representado con un resorte vertical, la masa del eje soportado por el neumático, un resorte de suspensión, un amortiguador y la masa del cuerpo apoyado por la suspensión para ese neumático.

Figura 9

Algoritmo Computarizado para medición de IRI.



Universidad de Michigan

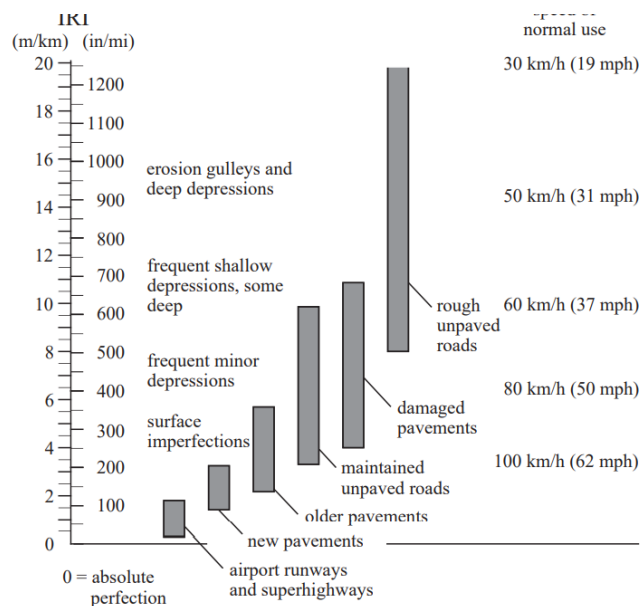
El modelo matemático *cuarto de automóvil* calcula las deflexiones de la suspensión de un sistema mecánico simulado con una respuesta similar a un coche de pasajeros. El movimiento de suspensión simulado se acumula y se divide por la distancia recorrida para dar un índice con unidades de pendiente (m/km, pulg/millas, etc.).

Se dedicaron varios años de desarrollo adicional a probar métodos de cálculo, para una variedad de métodos de perfilado. Los algoritmos informáticos de ejemplo fueron publicados, se redactaron, revisaron y publicaron directrices para definir una referencia de medida a la que se llamó Índice Internacional de Rugosidad (IRI). Posteriormente, el cálculo del IRI fue estandarizado por ASTM International.

El IRI resume las cualidades de rugosidad que impactan la respuesta del vehículo, y es más apropiado cuando se desea una medida de rugosidad que se relacione con: vehículo en general, costo de operación, calidad de conducción general, cargas dinámicas de las ruedas (es decir, daños en la carretera por camiones pesados, límites de seguridad en frenadas y curvas disponibles) y el estado general de la superficie. La Figura 10 muestra los rangos de IRI representado por diferentes clases de carreteras.

Figura 10

Rangos IRI vs Tipos de Carretera

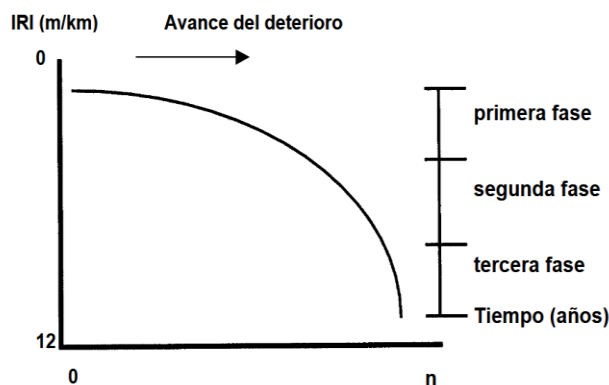


Fuente: Universidad de Michigan

La disminución de la calidad de la superficie no es lineal sino que se puede dividir en tres etapas: la primera tiene un deterioro poco significativo en los primeros años, la segunda presenta un deterioro más pronunciado que en la primera y demanda la programación de un mantenimiento para no dejar avanzar el deterioro, la tercera está dentro de un deterioro acelerado ya que en pocos años el nivel de servicio cae de forma importante lo que significa un mantenimiento costoso; y como límite, puede ser necesaria una reconstrucción total del mismo. Esto se puede observar gráficamente en la Figura 11. (Arriaga M., Garnica P., Rico A., 1998).

Figura 11

Avance del deterioro de una carretera respecto al tiempo



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte

Cesar Mauricio Balarezo Durán

Para la medición del IRI se necesita como dato de partida el “perfil longitudinal” de la superficie del pavimento. En esta línea sería posible determinar el IRI a partir de equipamiento sencillo de manejar como es la mira y un nivel, donde el inconveniente más importante es que para grandes distancias el trabajo puede resultar largo y tedioso. Hoy en día hay múltiples equipos automatizados capaces de medir el índice de rugosidad internacional.

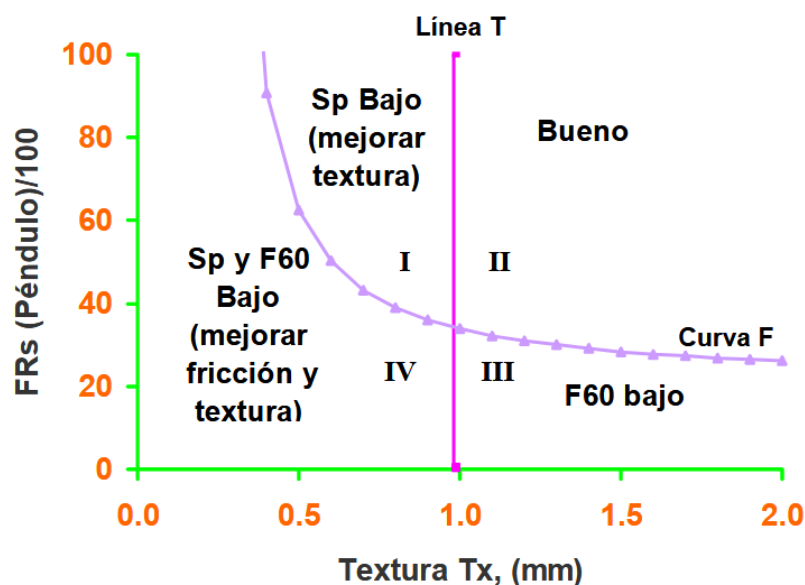
3.2.2 Índice Internacional de Fricción (IFI).

La resistencia al deslizamiento se define como la fuerza generada entre el neumático y la superficie del pavimento cuando las ruedas del vehículo son parcial o totalmente bloqueadas.

Las características de fricción en el pavimento son muy importantes dentro de la seguridad en las carreteras. La superficie de los firmes debe proporcionar un adecuado nivel de fricción en la interfaz neumático - pavimento para proveer seguridad de operación a los vehículos. Los métodos usados a través del mundo para medición de textura y resistencia al deslizamiento varían significativamente; por tal razón el comité técnico Permanent International Association of Road Congresses (PIARC), en 1992, decidió realizar un experimento internacional para comparar las mediciones de textura y resistencia al deslizamiento (Figura 12). Como resultado de este experimento se definió el índice de Fricción Internacional (IFI) como un indicador que define el estado de una carretera en términos de la fricción y de la textura. (López D., Garnica P., 2002).

Figura 12

Fricción vs Textura.



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte.
Cesar Mauricio Balarezo Durán

El modelo PIARC puede ser utilizado en la administración de pavimentos considerando ciertos valores o niveles mínimos de fricción y textura según las condiciones y necesidades requeridas en cada país. En la Figura 12 indica la relación entre los valores de fricción (FR) y los valores de textura (Tx).

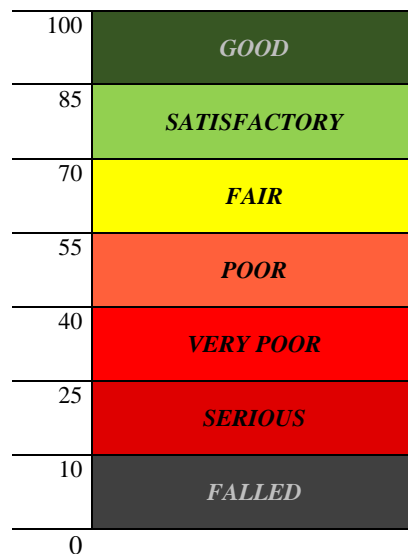
Cuando una carretera, pista de aterrizaje o un pavimento en general es proyectado, el objetivo es que el tránsito sea cómodo, seguro, poco ruidoso y económico para los usuarios; además, los pavimentos deben ser durables y producir el menor desgaste a los vehículos. Estos requerimientos pueden ser alcanzados con un adecuado control de las propiedades superficiales. En la actualidad hay un sin número de equipos para medir la fricción y textura, pudiendo medir a distintas velocidades, según el principio de medición que puede ser longitudinal o transversal, o así también para medir la macro y micro textura.

3.2.3 Índice de Condición del Pavimento (PCI).

El Índice de Condición del Pavimento (PCI, por sus siglas en inglés) sin duda es una metodología más completa para la evaluación y calificación objetiva de pavimentos flexibles y rígidos dentro de los modelos de sistemas de gestión vial disponibles en la actualidad. PCI es un indicador numérico entre 0 y 100, unos pavimentos recién construidos tienen un indicador de 100 puntos y por circunstancias de tiempo, clima y carga vehicular se presentan deterioros que afectan para que su indicador disminuya, como se indica en la Figura 13. (U.S. Department of Transporte, 2014).

Figura 13

Clasificación PCI, ASTM 6233-11.



Fuente: ASTM 6233-11

El índice de condición del pavimento fue introducido por primera vez por el ejército de los Estados Unidos. En la actualidad el cálculo de PCI está estandarizado por ASTM International (American Society for Testing and Materials) en los documentos: ASTM D 6433 y ASTM D 5340.

El PCI se calcula recopilando datos sobre múltiples defectos. Se mide la densidad del daño, después la densidad de daños se traduce en “*valor deducido*” utilizando curvas ASTM. Finalmente, PCI se calcula en un proceso iterativo. Los defectos en un pavimento flexible más importantes para el cálculo de PCI se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3

Tipos de Deterioro, en Pavimento Flexible.

DETERIOROS EN PAVIMENTO FLEXIBLE	
Alligator Cracking	<i>Piel de Cocodrilo</i>
Bleeding	<i>Exudación</i>
Block Cracking	<i>Agrietamiento en Bloque</i>
Bumps and Sags	<i>Abultamientos y Hundimientos</i>
Corrugation	<i>Corrugación</i>
Depression	<i>Depresión</i>
Edge Cracking	<i>Grieta de Borde</i>
Joint Reflection Cracking	<i>Grieta de Reflexión de Junta</i>
Lane / Shoulder Drop Off	<i>Desnivel Carril / Berma</i>
Longitudinal & Transversal Cracking	<i>Grietas Longitudinales y Transversales</i>
Patching & Utility Patching	<i>Parcheo y acometidas de servicios</i>
Polished Aggregates	<i>Pulimento de Agregados</i>
Potholes	<i>Huecos</i>
Railroad Crossing	<i>Cruce de Vía Férrea</i>
Rutting	<i>Ahuellamiento</i>
Shoving	<i>Desplazamiento</i>
Slippage Cracking	<i>Grietas Parabólicas o por deslizamiento</i>
Swell	<i>Hinchamiento</i>
Weathering / Raveling	<i>Meteorización / Desprendimiento de Agregados</i>

Fuente: ASTM 6233-11.

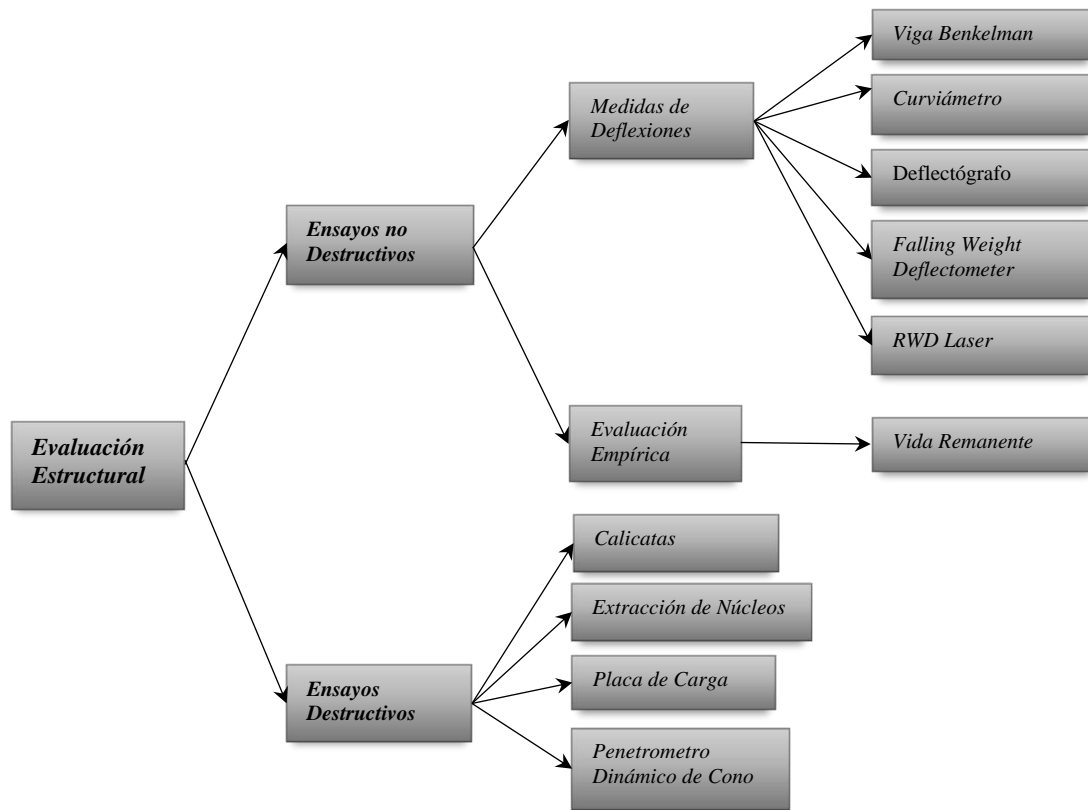
3.3 Evaluación Estructural

La evaluación estructural de un pavimento determina la capacidad portante de cada una de las capas que lo conforman y evalúa también su cimentación. Según el tipo de pavimento se realizan diferentes tipos de estudios de su estructura. Los factores de mayor influencia de agresividad para el desgaste de un pavimento son: Clima, Agua y Tráfico. El mal drenaje en una carretera y las cargas repetitivas de tráfico, determinan daños permanentes en el pavimento. La evaluación estructural de un pavimento puede ser evaluado mediante ensayos *no*

destruictivos y ensayos destruictivos, de los cuales se derivan varios métodos, en la Figura 14 se puede observar lo dicho:

Figura 14

Clasificación de Métodos para la Evaluación estructural de un Pavimento.



Fuente: Guillermo Thenoux Z. y Rodrigo Gaete P.

Nuestro objeto de estudio es realizar ensayos no destructivos midiendo deflexiones en el pavimento en los 20 km de longitud del segmento de vía seleccionado tanto en la calzada izquierda como la derecha con el uso de un deflectómetro de propiedad del ministerio de transporte y obras públicas (MTOB).

3.4 Deflexiones en la Estructura del Pavimento

La deflexión es el desplazamiento vertical de la superficie del pavimento al someterse a una determinada carga. La deflexión de un pavimento está condicionada por una serie de factores, como son: la rigidez de los materiales, espesores de capas, su temperatura y las cualidades de la subrasante. Con los parámetros mencionados más los datos de deflexiones obtenidos por FWD podemos caracterizar los parámetros de las capas de la estructura del pavimento mediante un análisis de cálculo inverso, obteniendo en las capas del pavimento el

módulo elástico (E) y para la subrasante el módulo resiliente (Mr). Para pavimentos de hormigón de cemento Portland (PCC) se puede determinar el módulo de elasticidad (E) de la losa y el módulo de reacción de la subrasante (k). En resumen, las características para las capas de pavimento y de la subrasante se determina para que se produzca una respuesta del pavimento que mejor se adapte a las deflexiones medidas con el deflectómetro con las condiciones de carga establecidas (FHWA-HRT-16-011. 2017).

Los parámetros de las capas de la estructura del pavimento y la subrasante se utilizan en los procedimientos para diseño de pavimentos, para estimar la vida remanente y rehabilitación o reconstrucción. También son útiles en programas de capas elásticas para calcular tensiones, esfuerzos y deformaciones.

Con la obtención de las deflexiones de la estructura de un pavimento podemos realizar varios análisis estructurales, ya sea para pavimentos rígidos como flexibles. Entre los cuales tenemos:

- Evaluar la capacidad de soporte de carreteras, aeropuertos y otras superficies.
- Evaluación de la transferencia de carga en pavimentos de hormigón (juntas).
- Detección de vacíos en pavimentos de hormigón (estabilidad de losas).
- Control de calidad (periodo de construcción).
- Análisis de tramos de prueba.
- Sectorización de zonas dañadas.
- Dimensionamiento de refuerzos (sobre carpetas).
- Respuesta de un pavimento a las fuerzas ambientales (cambios térmicos).
- Incorporación a Sistemas de Gestión de Pavimentos.

3.4.1 Índices característicos a partir de datos de deflexión.

Existen índices que se basan en las mediciones de las deflexiones para caracterizar aspectos de la estructura del pavimento existente. Algunos de los índices comunes se describen a continuación:

Método Área

Hoffman & Thompson (1981) introdujeron por vez primera el método de Área para la caracterización del cuenco de deflexiones, ver Tabla 4 . El método Área es el área normalizada de una vertical que corta un depósito de deflexiones entre el centro de aplicación de carga y diferentes distancias radiales. Para una configuración de siete sensores se muestra el método de ÁREA en la siguiente ecuación:

$$\text{ÁREA}_{60} = 4 + 6 \frac{D_8}{D_0} + 5 \frac{D_{12}}{D_0} + 6 \frac{D_{18}}{D_0} + 9 \frac{D_{24}}{D_0} + 18 \frac{D_{36}}{D_0} + 12 \frac{D_{60}}{D_0} \quad (4)$$

Donde:

D_0 = Deflexión de la superficie en el centro de la carga de prueba (pulgadas).

D_8 = Deflexión de la superficie a una distancia de 203 mm (8 pulgadas) de la carga.

D_{12} = Deflexión de la superficie a una distancia de 300 mm (12 pulgadas) de la carga.

D_{18} = Deflexión de la superficie a una distancia de 457 mm (18 pulgadas) de la carga.

D_{24} = Deflexión de la superficie a una distancia de 600 mm (24 pulgadas) de la carga.

D_{36} = Deflexión de la superficie a una distancia de 900 mm (36 pulgadas) de la carga.

D_{60} = Deflexión de la superficie a una distancia de 1219 mm (48 pulgadas) de la carga.

Tabla 4

Tendencias D_0 y Valores de Área.

ÁREA Valor	Superficie máxima Deflexión (D_0)	Conclusiones generalizadas ¹
Bajo	Bajo	Estructura débil, subrasante fuerte
Bajo	Alto	Estructura débil, subrasante débil
Alto	Bajo	Estructura fuerte, subrasante fuerte
Alto	Alto	Estructura fuerte, subrasante débil

¹ Pueden ocurrir excepciones.

Fuente: FHWA -HRT-16-011, 2017

F - 1 factor de forma

El factor de forma F - 1 representa el grado de curvatura de la cuenca de deflexiones y es inversamente proporcional a la relación entre la rigidez del pavimento y la rigidez de la subrasante. El factor de forma F - 1 se define mediante la siguiente ecuación:

$$F - 1 = \frac{D_0 - D_2}{D_1} \quad (5)$$

Donde:

D_1 = Deflexión de la superficie a una distancia de 300 mm (12 pulgadas) de la carga.

D_2 = Deflexión de la superficie a una distancia de 600 mm (24 pulgadas) de la carga.

Radio de Curvatura

El radio de curvatura (RoC, zona 1) fue desarrollado en Sudáfrica y nos da una indicación del estado estructural de la superficie y el curso base. Se obtiene con la siguiente ecuación:

$$R_0C = \frac{L^2}{2D_0 * \left(1 - \frac{D_{200}}{D_0}\right)} \quad (6)$$

Donde:

$L = 200 \text{ mm}$ (8 pulgadas).

$D_{200} =$ Deflexión de la superficie a una distancia de 200 mm (8 pulgadas).

Índice de capa Base

El Índice de la capa base (BLI, zona 1, Figura 15), denominado también Índice de curvatura de la superficie (SCI), nos indica el estado estructural de la capa base el cual se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$BLI = D_0 - D_{300} \quad (7)$$

Donde:

$D_{300} =$ Deflexión de la superficie a una distancia de 300 mm (12 pulgadas) de la carga.

Índice de capa media

El índice de capa media (MLI, zona 2, Figura 15), conocido también como índice de curvatura base (BCI), nos indica la condición estructural de la subbase. Podemos obtener con la siguiente ecuación:

$$MLI = D_{300} - D_{600} \quad (8)$$

Donde:

$D_{600} =$ Deflexión de la superficie a una distancia de 600 mm (24 pulgadas) de la carga.

Índice de capa inferior

El Índice de Capa Inferior (LLI, zona 3, Figura 15), se le conoce do como Índice de Daño Base (BDI), nos indica el estado estructural de las capas de la subrasante. Se determina con la siguiente ecuación:

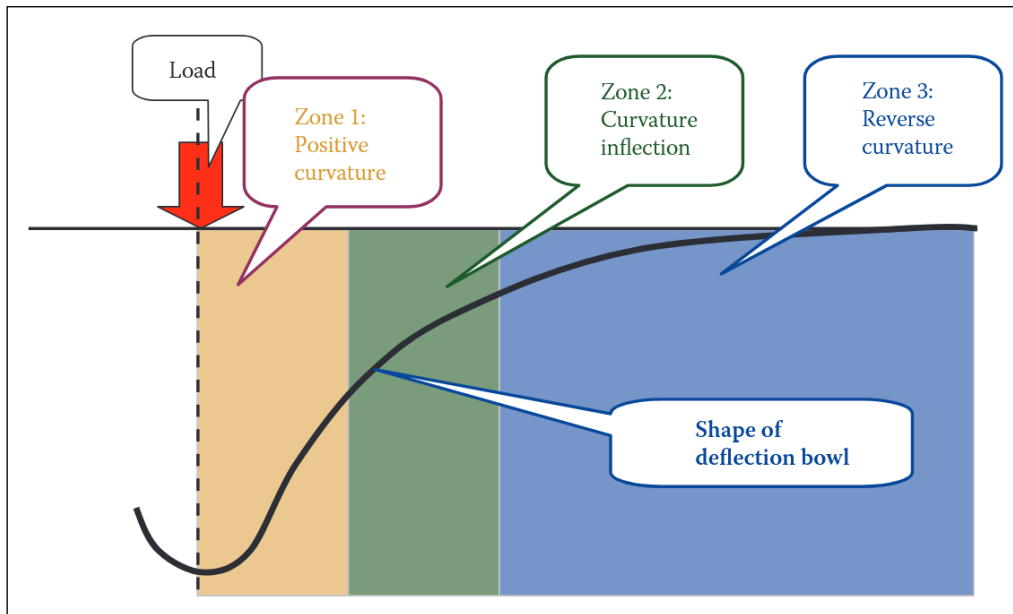
$$LLI = D_{600} - D_{900} \quad (9)$$

Donde:

$D_{900} =$ Deflexión de la superficie a una distancia de 900 mm (36 pulgadas) de la carga.

Figura 15

Zonas de curvatura de un cuenco de deflexión



Fuente: EMILE HORAK, 2008

EMILE HORAK, determino valores referenciales de RoC, BLI, MLI, y LLI, para varias secciones de pavimento flexible, como se indica en la siguiente figura:

Figura 16

Referencia de Parámetros de Horak.

	Structural condition rating	Deflection bowl parameters				
		D_0 (μm)	RoC (m)	BLI (μm)	MLI (μm)	LLI (μm)
Granular base	Sound	<500	>100	<200	<100	<50
	Warning	500-750	50-100	200-400	100-200	50-100
	Severe	>750	<50	>400	>200	>100
Cementitious base	Sound	<200	>150	<100	<50	<40
	Warning	200-400	80-150	100-300	50-100	40-80
	Severe	>400	<80	>300	>100	>80
Bituminous base	Sound	<400	>250	<200	<100	<50
	Warning	400-600	100-250	200-400	100-150	50-80
	Severe	>600	<100	>400	>150	>80

Note: These criteria can be adjusted to improve sensitivity of benchmarking.

Fuente: EMILE HORAK, 2008.

3.4.2 Factores que afectan las deflexiones.

Existen varios factores que pueden afectar la magnitud de las deflexiones medidas en el pavimento lo que provocaría una dificultad en la interpretación de sus resultados. Tener pleno conocimiento de estos factores antes de plantear un programa de pruebas de campo asegura la recopilación de deflexiones útiles para utilizar en el análisis de retrocálculo. (FHWA-HRT-16-011, 2017). Entre los principales factores que afectan las deflexiones son:

- ➔ Estructura del pavimento (tipo y espesor),
- ➔ Carga del pavimento (magnitud de la carga y tipo de carga), y
- ➔ Clima (temperatura y efectos estacionales).

Estructura del Pavimento

En un pavimento la deflexión medida representa una respuesta general de todo el sistema de las capas que lo conforman (superficie, base y subbase) así como es la propia subrasante. Los parámetros característicos de la capa superficial y de las capas de soporte (espesor y rigidez) afectan a la magnitud de las deflexiones medidas. Generalmente, los sistemas más débiles se afectan más que los sistemas más fuertes bajo la acción de la misma carga. Existen otros factores que también pueden afectar las deflexiones medidas en los pavimentos; estos pueden ser:

- Las pruebas tomadas cerca de juntas, bordes, grietas o en áreas con daños estructurales (como grietas de cocodrilo) que producen deflexiones más altas.
- Las variaciones en el espesor de la estructura del pavimento que crean variabilidad en las deflexiones.
- Las variaciones en los parámetros característicos de la subrasante o la presencia de capas rígidas subyacentes (capa rígida / como lecho de roca o un nivel freático alto) que pueden crear variabilidad significativa en las deflexiones.

Carga de Pavimento

El factor directo que afecta a las deflexiones del pavimento es la magnitud de la carga aplicada. Los equipos para la medición de las deflexiones en los pavimentos pueden actuar con niveles de carga

desde 13 KN (3,000 lbf) a más de 245 KN (55,000 lbf) y es importante tener en cuenta los niveles adecuados de carga para cada aplicación. Otro factor que afecta a las deflexiones es el tipo de carga; una carga estática lenta produce una respuesta diferente que una carga dinámica

y rápida. Por lo general, si la carga aplicada es más rápida más corto es el pulso de carga y menores son las deflexiones.

Clima.

Uno de los factores importantes que se tiene que considerar para cualquier programa de pruebas de deflexiones de un pavimento es la temperatura. En los pavimentos flexibles la rigidez de la carpeta asfáltica disminuye a medida que se incrementa la temperatura dando resultados de deflexiones mayores. Por lo tanto, contar con los datos de temperatura precisos nos ayuda a determinar el factor de corrección que se aplicará al módulo HMA retrocalculado para obtener un valor a una temperatura estándar. Se recomiendan lecturas de temperatura cada hora como un intervalo más práctico para su uso en el diseño (normalmente 21 ° C o 70 ° F). Además, es necesario realizar la corrección de las deflexiones medidas a una temperatura estándar (comúnmente 21 ° C o 70 ° F), (FHWA-HRT-16-011. 2017).

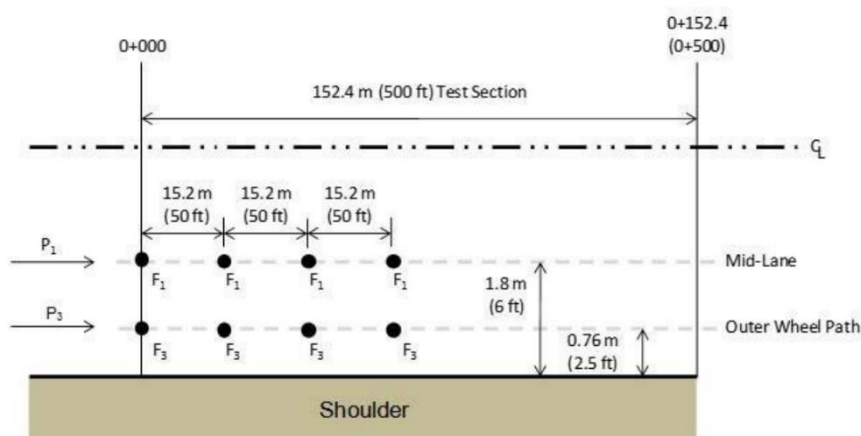
En AASHTO 1993 se indica que no es necesario realizar el ajuste por temperatura para determinar la M_R de la subrasante ya que la deflexión utilizada se debe únicamente a la deformación de esta capa.

3.5 Ubicación de prueba.

Las ubicaciones de pruebas con el FWD para pavimentos rígidos y flexibles generalmente consisten en pruebas que se toman en carriles específicos; pero, también se pueden obtener datos a lo largo de las juntas longitudinales o esquinas de losas, en grietas y fisuras. La obtención de pruebas con el FWD generalmente se realiza sobre el carril externo (adyacente a la vereda) para las vías con múltiples carriles en una dirección (FHWA-HRT-16-011. 2017), como se observa en Figura 17.

Figura 17

Pruebas en Pavimento flexible.



Fuente: FHWA-HRT-16-011. 2017.
Cesar Mauricio Balarezo Durán

3.6 Intervalos de prueba.

El intervalo de pruebas con el FDW es muy importante ya que las distancias entre datos determinan el nivel de estudio que estamos realizando en el ensayo que puede ser a nivel de red o nivel de proyecto.

A *nivel de red*, los datos que se recolectan son para dar una descripción general de capacidad de carga o repuesta de las distintas vías involucradas. Las pruebas de deflexión se realizan a intervalos de 100 metros a 500 metros (250 pies a 1000 pies).

A *nivel de proyecto*, los datos recolectados sirven para un análisis detallado del pavimento como para el estudio de una rehabilitación vial. Se deben realizar las pruebas a intervalos de 50 metros a 200 metros (100 pies a 500 pies). (ASTM D 4695-03). Para el presente estudio la recolección de datos defletométricos se realizó cada 200 metros.

3.7 Valores de deflexión atípicos.

Entre los aspectos más difíciles del cálculo inverso es reconocer si los valores de los módulos de cada capa son aceptables. Se puede evaluar el error de los cálculos, pero eso no garantiza que los resultados sean aprobados. Poder evaluar razonablemente los resultados es necesario tener total conocimiento de parámetros, comportamiento de materiales y la experiencia que se adquiere con el proceso de retrocálculo. Se recomienda analizar los siguientes aspectos de los datos deflectométricos antes de la evaluación de los módulos obtenidos por retrocálculo.

- Confirme que el error este dentro de las tolerancias deseadas. Por ejemplo, 3% ASTM D 4694-96.
- Confirme los datos de ingreso para el retrocálculo corresponden a la ubicación de los sensores del FWD.
- Confirme el grosor de las capas individuales. Idealmente, la capa de HMA no debe variar más de 13 mm (0,5 pulgadas) del grosor real. Las capas base y subbase son menos sensibles a los espesores de capa.
- Revise los datos deflectométricos FWD para identificar causas de errores altos.
- Eliminar la estación de toma de datos si los valores de un sensor son mayores a los valores del sensor anterior y si los valores son ceros.
- Revise el lugar específico de pruebas para determinar fallas aisladas o sectorizadas (Fisuras o grietas y hundimientos severos) que pueden estar ocasionando errores altos.

Si los análisis de los parámetros descritos no proporcionan información adecuada sobre los errores altos dichos datos deflectométricos deben considerarse como valores atípicos y eliminarse del análisis. (FHWA-HRT-16-011, 2017).

3.8 Deflectómetro de Impacto FWD

El Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer) es un equipo que aplica una carga dinámica de impacto a la superficie del pavimento con influencia en todo el paquete estructural y determina los desplazamientos verticales (cuenco de deflexiones) producidas en él. Es un ensayo no destructivo que trata de simular el comportamiento del pavimento ante el paso de los vehículos pesados. Puede ser utilizado en pavimentos de asfalto, hormigón o la combinación de ambos, o sobre cualquier capa de un pavimento en la etapa de construcción.

El deflectómetro de impacto para la medición de deflexiones (ver Figura 18) utiliza una serie de geófonos (sensores sísmicos) que están en una misma alineación y a diferentes distancias radiales desde el punto centro de la aplicación de la carga de prueba. El funcionamiento general del uso del FWD consiste en colocar la placa de carga de 300 o 450 mm (12 o 18 pulg.) sobre la superficie del pavimento junto con la regleta de sensores en el lugar escogido para la prueba, seguido se genera una carga dinámica máximo de 50 KN (11000 lb.) sobre un sistema de amortiguadores (buffers) el cual actúa sobre el plato de carga circular que reparte las tensiones al pavimento; por medio de los sensores se mide la deformación vertical de la superficie (deflexión) bajo el punto de aplicación de la carga y a las demás distancias entre sensores. La duración de la carga de impacto va entre los 20-60 milisegundos y un tiempo de subida de 10 a 30 milisegundos, lo que simula un vehículo en circulación de 60 a 70 km/h (Figura 18). Los geófonos en el momento de impacto miden las deflexiones verticales en micrómetros. Es recomendable realizar al menos dos secuencias de carga y si los resultados son superiores al 3% se repite la prueba. (ASTM D 4694-09, 2003).

Figura 18

Deflectómetro de Impacto, FWD.



Fuente: Dynatest.

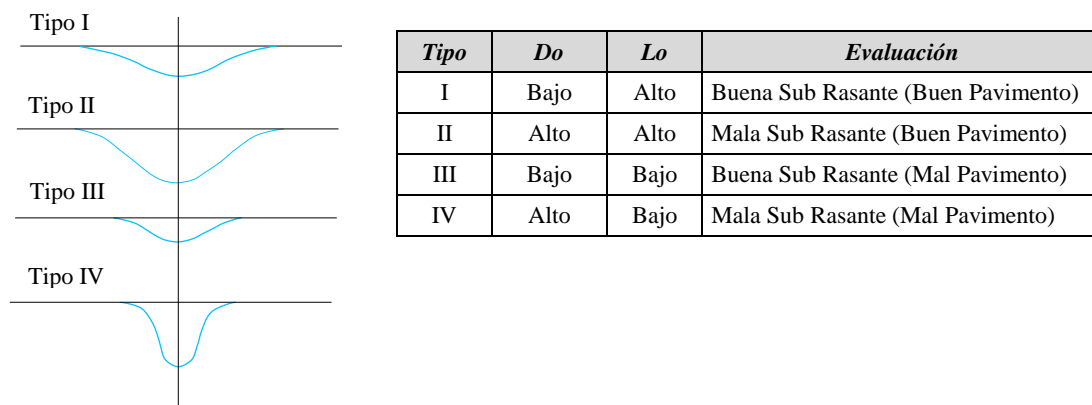
Cesar Mauricio Balarezo Durán

3.9 Cuenco de deflexiones

Con el análisis del cuenco de deflexiones se obtiene información de la rigidez de la estructura de pavimentos y su suelo de fundación (subrasante), siendo muy importante para definir las condiciones de la estructura durante el periodo de diseño de un proyecto. Esto es fundamental para evaluar actividades relacionadas con la mantención, rehabilitación, reconstrucción y control de calidad en su construcción.

Figura 19

Tipos de Cuenco de Deflexiones.



Fuente: Federal Highway Administration.

3.10 Secciones Homogéneas

El método de las diferencias acumuladas es un método analítico sencillo y potente para determinar intervalos estadísticamente homogéneos a partir de las mediciones de las características del pavimento a lo largo de una carretera. La metodología presentada es fundamentalmente fácil puesto que se puede resolver de manera rápida con una secuencia computarizada para el proceso de datos y análisis gráfico. Las diferencias acumuladas se pueden utilizar para algunas variables del pavimento como: deflexión, índice de regularidad internacional, índice de fricción internacional, deterioro del pavimento, etc.

Realizada la toma de deflexiones en una carretera se determinan las secciones homogéneas las cuales nos servirán para la sectorización de zonas en mal o buen estado y para considerar en el dimensionamiento del refuerzo o sobre carpeta. El procedimiento a seguir para determinar secciones homogéneas es el siguiente:

Dentro de una hoja de cálculo se realiza una secuencia de pasos en donde la primera columna se registra la numeración secuencial de cada dato deflectométrico, en la segunda columna se registra la abscisa del ensayo correspondiente.

$$X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n$$

Dónde:

X_1 = Abscisa en el ensayo 1.

X_n = Abscisa en el enésimo ensayo.

En la tercera columna se calcula la distancia entre ensayos, restando las abscisas y expresando la longitud en metros.

$$\begin{aligned}\Delta X_1 &= X_1 \\ \Delta X_2 &= X_2 - X_1 \\ \Delta X_3 &= X_3 - X_2 \\ \Delta X_n &= X_n - X_{n-1}\end{aligned}$$

En la cuarta columna se realiza el cálculo de la distancia acumulada, como se expresa en las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned}\sum \Delta X_1 &= 0 \\ \sum \Delta X_2 &= \Delta X_1 + \Delta X_2 \\ \sum \Delta X_3 &= \Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_3 \\ \sum \Delta X_n &= \Delta X_1 + \Delta X_2 + \dots + \Delta X_{n-1} + \Delta X_n\end{aligned}$$

En la quinta columna se registra la deflexión máxima (Do) del pavimento de cada estación.

$$r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$$

La sexta columna se calcula el promedio entre las deflexiones con la siguiente expresión.

$$\begin{aligned}R_1 &= r_1 \\ R_2 &= (r_1 + r_2)/2 \\ R_3 &= (r_1 + r_3)/2 \\ R_n &= (r_{n-1} + r_n)/2\end{aligned}$$

La séptima columna se calcula el área del intervalo con la siguiente expresión.

$$\begin{aligned}a_1 &= R_1 \Delta X_1 \\ a_2 &= R_2 \Delta X_2 \\ a_3 &= R_3 \Delta X_3 \\ a_n &= R_n \Delta X_n\end{aligned}$$

La octava columna se calcula el área acumulada como sigue.

$$\begin{aligned}\sum a_1 &= 0 \\ \sum a_2 &= a_1 + a_2 \\ \sum a_3 &= a_1 + a_2 + a_3 \\ \sum a_n &= a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_{n-1} + a_n\end{aligned}$$

Seguido se determina el factor de diferencia con la siguiente fórmula.

$$F = \frac{\text{Área Acumulada Total}}{\text{Distancia Acumulada Total}} \quad (10)$$

En la novena columna se calcula la diferencia acumulada con la siguiente formulación.

$$Zx_1 = 0$$

$$Zx_2 = \sum a_2 - (F * \sum \Delta X_2)$$

$$Zx_3 = \sum a_3 - (F * \sum \Delta X_3)$$

$$Zxn = \sum a_n - (F * \sum \Delta X_n)$$

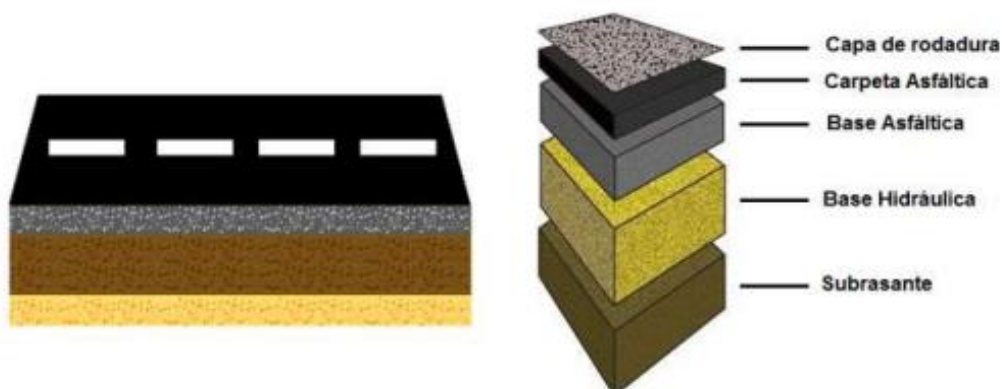
Para finalizar se realiza un informe gráfico entre abscisas vs diferencias acumuladas mediante el cual determinaremos las secciones homogéneas. Cada vez que los conjuntos de datos de diferencias acumuladas cambien de pendiente esta determinara una nueva sección homogénea pero siempre nos guiaremos en el coeficiente de variación. No se puede hacer secciones homogéneas relativamente pequeñas esperando que la rehabilitación vial sea económicamente viable.

3.11 Comportamiento mecánico de los materiales.

Las estructuras de pavimentos de carreteras se forman por capas de distintos materiales instalados de manera horizontal donde cada uno de ellos mantiene funciones y características especiales. La función principal es la de soportar las cargas del tránsito y los cambios por efectos atmosféricos como precipitaciones, la temperatura, radiación solar, etc. con la finalidad de afrontar estas dificultades y prestar un servicio seguro y cómodo para los usuarios. En la Figura 20 los pavimentos se presentan en estructuras multicapas como se a continuación.

Figura 20

Estructura de Pavimentos Flexibles.



Fuente: Garnica y Hernández, 2013.

El objetivo de los pavimentos es brindar un viaje seguro, cómodo y libre de obstáculos para los usuarios. También es la transmisión y distribución de cargas por las exigencias de

tránsito. Las primera o las primeras capas contarían de una impermeabilización para proteger las capas subyacentes del agua. Los objetivos descritos se logran con planteamiento de la calidad de los materiales a emplearse en cada capa y cumplir estrictamente con los procedimientos constructivos especificados para ellas. La elección de los materiales es fundamental para el desempeño en la ingeniería de pavimentos, los cuales se pueden clasificar en los siguientes grupos.

- Materiales granulares, como gravas o rocas trituradas.
- Materiales asfálticos, como bases o carpetas asfálticas.
- Materiales cementados, como concreto Portland o bases tratadas con cemento.

El comportamiento de los materiales es necesario conocerlos por completo, para ser utilizados en proyectos de carreteras, las propiedades fundamentales que debería comprenderse son:

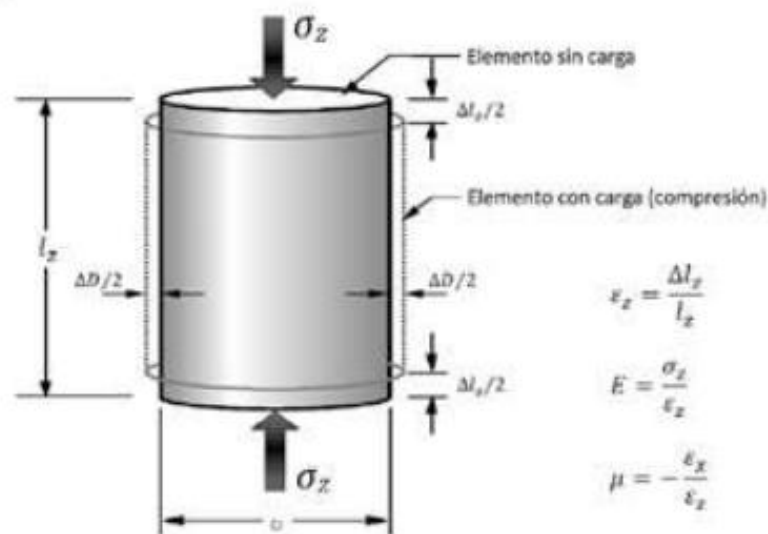
- Elasticidad.
- Plasticidad.
- Viscosidad.

3.11.1 Elasticidad.

Como se observa en la figura 21, la elasticidad se define como la propiedad física y mecánica de los materiales cuando sufren deformaciones al estar sometidos a la acción de fuerzas exteriores y de poder recuperar la forma inicial si estas fuerzas se eliminan.

Figura 21

Elemento sometido a Compresión.



Fuente: Garnica y Hernández, 2013.

Como se ve en la Figura 21, si una muestra cilíndrica de un cierto material de sección transversal A y una longitud inicial L_z es sometida a una presión uniforme provocada por una fuerza F que actúa en dirección la misma sufrirá una disminución de magnitud ΔL_z que es proporcional a la fuerza aplicada F , a su longitud original L_z y a su vez es inversamente proporcional al área de su sección transversal A . El científico Robert Hooke (1635-1703) es el primero que noto esta relación de gran aplicabilidad para la mayoría de materiales, pero no de manera universal, que se describe como:

$$E \cdot \frac{\Delta L_z}{L_z} = \frac{F}{A} \quad (11)$$

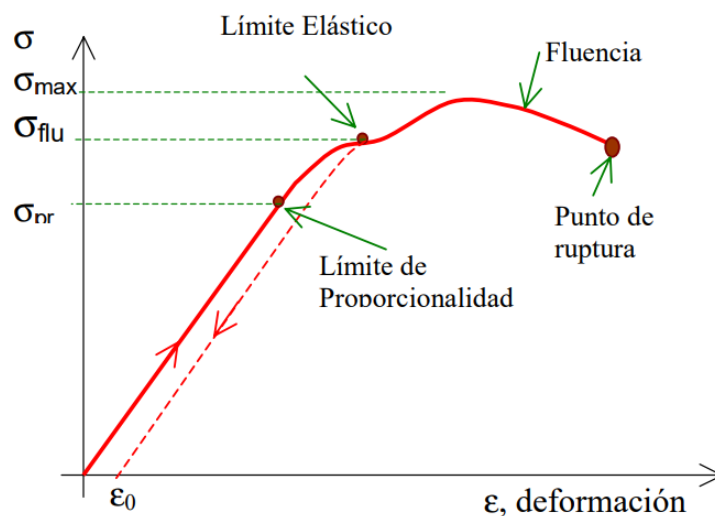
Donde E es una constante característica de un material elásticamente lineal que se denomina módulo de elasticidad o módulo de Young. Para su aplicabilidad esta relación solo funciona en la llamada zona de proporcionalidad como se observa en la Figura 22. La relación F/A se denomina esfuerzo y se denota con la letra σ . La relación $\Delta L/L_z$ se lo denomina deformación unitaria y se la denota con la letra ε , esta magnitud es adimensional (no tiene unidades). Con esta notación la expresión anterior se puede escribir como:

$$\sigma_z = E * \varepsilon_z \quad (12)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \quad (13)$$

Figura 22

Relación Esfuerzo Aplicado σ vs la Deformación Unitaria ε



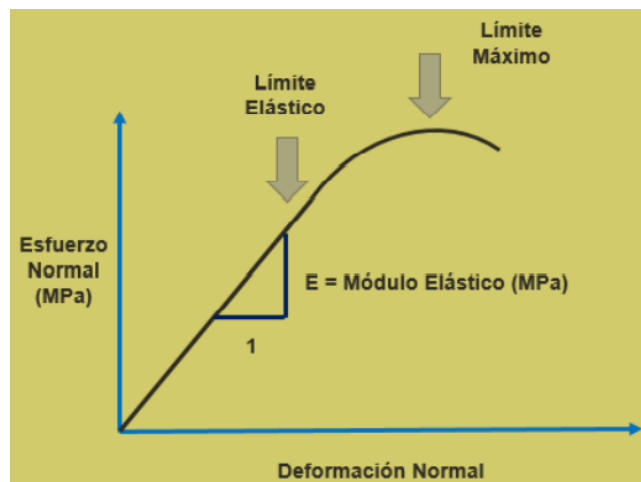
Fuente: UNSAM - S. Gil.

Cesar Mauricio Balarezo Durán

Cuando se llega al esfuerzo de fluencia se sobrepasa el límite elástico y se suprime el esfuerzo aplicado el material se deforma permanentemente. Este hecho se indica en la Figura 22, por medio de las flechas. El valor ϵ_0 , indica la magnitud de la deformación permanente, hasta el límite de proporcionalidad $\epsilon_0 < 10^{-4}$. El punto de fluencia se define como la intersección de una paralela a la línea elástica que atraviesa por un punto de deformación permanente $\epsilon_f = 0.002$ (0.2%).

Figura 23

Concepto de Módulo Elástico de los Materiales.



Fuente: Garnica y Hernández 2013.

El material se denomina *isótropo* si los parámetros que lo definen son los mismos en todas las direcciones. La isotropía disminuye los parámetros elásticos en un punto, a dos parámetros y estos son: el coeficiente de Poisson “ ν ” y el módulo de elasticidad “ E ”. Si los parámetros elásticos son los mismos en todos los puntos dentro de una región de un material esta región se dice que es *homogénea*.

Las deformaciones axiales para un material isótropo, elástico y homogéneo que se producen por una carga aplicada en un elemento tridimensional (Figura 24) en función de componentes de esfuerzo son dadas por la ley de Hooke como se indica:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (14)$$

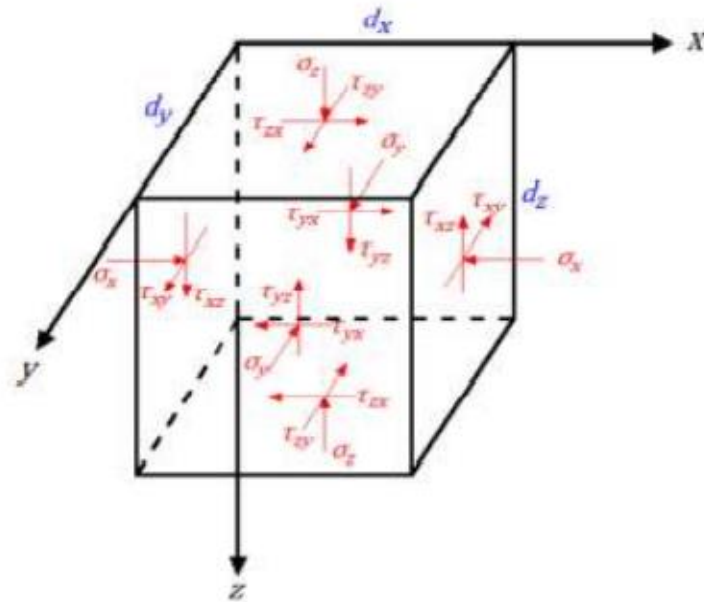
$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (15)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (16)$$

Donde, μ es la relación de Poisson, E es el módulo elástico, ϵ_i son las deformaciones y σ_i esfuerzos normales en las direcciones $i = x, y, z$, respectivamente.

Figura 24

Esfuerzos Normales y Cortantes en un sistema de Coordenadas Rectangulares.



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 2015.

Los esfuerzos tienen sus componentes como se indica a continuación en las siguientes expresiones.

$$\sigma_x = \frac{\mu E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + \frac{E}{1 + \mu}\epsilon_x \quad (17)$$

$$\sigma_y = \frac{\mu E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + \frac{E}{1 + \mu}\epsilon_y \quad (18)$$

$$\sigma_z = \frac{\mu E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + \frac{E}{1 + \mu}\epsilon_z \quad (19)$$

Las deformaciones cortantes tienen sus componentes de esfuerzo como se indica a continuación en las siguientes expresiones.

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (20)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad (21)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (22)$$

El módulo de corte G se puede obtener con siguiente expresión.

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (23)$$

Presentamos en las Tabla 5 y Tabla 6 los valores típicos de módulos de elasticidad y la relación de Poisson, respectivamente.

Tabla 5

Módulos Elásticos (E) típicos, en Materiales para Pavimentos

<i>Material</i>	<i>Rango (MPa)</i>	<i>Valor Típico (MPa)</i>
Carpeta Asfáltica Convencional	2000-4000	3000
Carpeta Asfáltica con Asfalto modificado	4000-6000	5000
Base Estabilizada con Cemento	750-2000	1500
Base Estabilizada con Asfalto	500-1500	1000
Base Hidráulica	270-350	310
Subrasante	190-260	220

Fuente: Garnica y Hernández 2013.

Tabla 6

Relación de Poisson (ν) típicos, en Materiales para Pavimentos

Material	Rango	Valor Típico
Carpeta Asfáltica Convencional	0,15-0,45	0,3
Carpeta Asfáltica con Asfalto modificado	0,15-0,30	0,2
Base Estabilizada con Cemento	0,15-0,30	0,2
Base Estabilizada con Asfalto	0,15-0,45	0,3
Base Hidráulica	0,30-0,40	0,35
Subrasante	0,30-0,50	0,4

Fuente: Garnica y Hernández 2013.

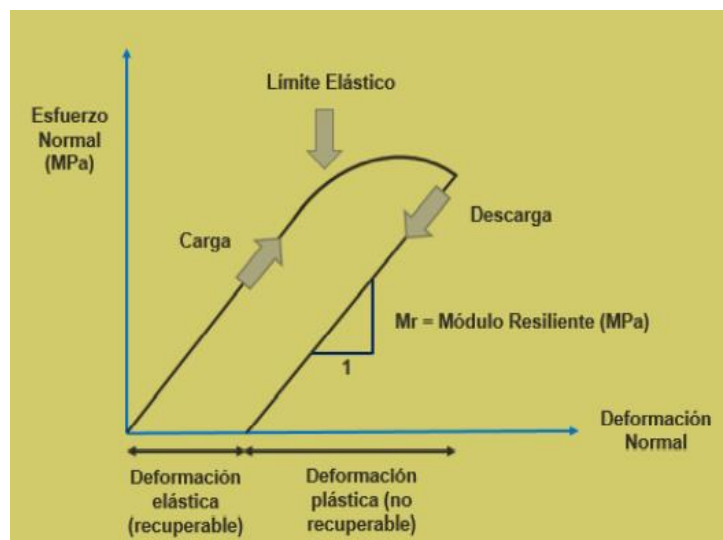
3.11.2 Plasticidad.

El comportamiento plástico describe materiales que acumulan deformaciones no recuperables cuando se les aplica una carga. Algunas veces el comportamiento plástico sólo comienza cuando el esfuerzo aplicado alcanza una cierta magnitud.

Cuando la carga se extiende más allá del límite elástico y se extiende al comportamiento plástico (ver Figura 25) dando como resultado la acumulación de deformación plástica no recuperable. Este comportamiento se denomina *Elasto-Plástico* y se utiliza para modelar materiales bajo repetición de carga y obtener su correspondiente Módulo Resiliente (M_r). Con cada ciclo de carga se acumula una deformación plástica, lo que resulta en deformación permanente en el material después de varios ciclos de carga repetidos.

Figura 25

Comportamiento Elasto - Plástico de los Materiales.



Fuente: Garnica y Hernández 2013.

3.11.3 Viscosidad.

Los materiales asfálticos se caracterizan por su comportamiento visco-elástico. El asfalto se mantiene muy rígido y también elástico con bajas temperaturas, sucede lo contrario cuando la temperatura es muy alta puesto que lo convierte en un fluido. La Reología estudia la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad y el derrame de la materia, que nos ayuda a comprender el comportamiento de deformación y flujo de estos materiales asfálticos.

3.12 Esfuerzos, Deformaciones y Deflexiones en Pavimento Flexible.

Cuando los vehículos transitan por cierta carretera el peso se transmite a los neumáticos y estos directamente se apoya en la parte superior de la estructura del pavimento en la cual se originan esfuerzos, deformaciones y deflexiones; las magnitudes de estos dependen del tipo de carga y la configuración de los ejes del vehículo que circula y los ejes de camiones se clasifican en:

- ➔ Eje sencillo
- ➔ Eje dual.
- ➔ Eje tándem
- ➔ Eje trídem.
- ➔ Eje Cuádruple

La ubicación y magnitud de cada una de estas respuestas determinan el tipo y grado de deterioro en la estructura del pavimento. Siendo muy importante la consideración de las tensiones, esfuerzos, deformaciones y deflexiones en el diseño de pavimentos por las siguientes razones:

- Se puede caracterizar los materiales mediante modelos constitutivos. Permiten determinar las rigideces de las capas de la estructura del pavimento según el nivel de esfuerzo que se utilice.
- Se puede diseñar el pavimento por deformación permanente y fatiga considerando la deformación a tensión debajo de la carpeta asfáltica y la deformación a compresión arriba de la subrasante.

Para predecir el deterioro de un pavimento es necesario respuestas del siguiente tipo: las que son generadas por la aplicación de cargas vehiculares y a las que no se producen por acción de estas (Coria, Hernández, Garnica 2018).

Por acción de las cargas vehiculares tenemos:

- ➔ Esfuerzos y deformaciones verticales,
- ➔ Esfuerzos y deformaciones cortantes,
- ➔ Esfuerzos y deformaciones tangenciales y radiales,
- ➔ Deflexiones.

Por la no acción de las cargas vehiculares tenemos:

- ➔ Por los fenómenos de bajas y altas temperaturas de los materiales que son utilizados en la estructura del pavimento.

3.12.1 Esfuerzos y deformaciones verticales.

La carga de los vehículos a través de los neumáticos se refleja en un esfuerzo vertical (compresión). Esta acción produce compresión en cada uno de los materiales de la estructura del pavimento; la cual, al ser permanente genera surcos o roderas plásticas en la superficie del pavimento en un determinado tiempo.

La mayor compresión será directamente debajo de la carga aplicada. Sin embargo, cuando se existen cargas múltiples (varios neumáticos) el esfuerzo puede presentarse a tensión o compresión. Cuando el esfuerzo vertical se invierte a tensión, en ciertos materiales se produce un desplazamiento lateral y puede causar una descompactación la cual es causal para producir inestabilidades.

3.12.2 Esfuerzos y deformaciones cortantes.

Las cargas de los vehículos a través de los neumáticos generan tensiones de corte dentro de la estructura de un pavimento. Las magnitudes de esfuerzos y deformaciones por el corte dependen de las cargas por los neumáticos y de propiedades de cada capa de la estructura del pavimento. Los esfuerzos cortantes son muy críticos en capas constituidas por materiales no tratados, como son las bases hidráulicas. Los excesivos esfuerzos de corte en bases hidráulicas pueden producir movimientos inestables, como se observan a menudo en los caminos con bajo volumen de tránsito donde hay poca actividad de vehículos pesados.

3.12.3 Esfuerzos y deformaciones cortantes tangenciales y radiales.

La deformación del pavimento y las capas individuales actúan de una manera similar a la deformación de una viga a flexión. Esta flexión da como resultado esfuerzos radiales y tangenciales en la parte inferior de las capas del pavimento. Los esfuerzos tangenciales y radiales se establecen en un plano horizontal y pueden ser a tensión como a compresión dependiendo de la ubicación y número de las cargas de los neumáticos (eje dual, tándem, trídem, etc.). Los esfuerzos a tensión ubicados en la parte inferior de capa asfáltica conducen a la aparición de grietas por fatiga (desde abajo hacia arriba); esto también ocurre en las capas estabilizadas con cemento o asfalto.

3.12.4 Deflexiones.

Cuando se aplica una carga de un tren vehicular sobre la superficie del pavimento este se deformará verticalmente. La magnitud de la deflexión generada es proporcional a la rigidez total de la estructura del pavimento (espesores y módulos elásticos) y rigidez del suelo de apoyo.

A mayores deflexiones más susceptible es el pavimento para que se produzcan fallas de tipo estructural.

3.12.5 Fenómenos de bajas y altas temperaturas de los materiales.

Con diversos cambios de temperatura las mezclas asfálticas en caliente se condicionan para los cambios en su volumen. Cuando la temperatura disminuye la carpeta asfáltica intenta contraerse, pero se mantiene rígida debido a que es una capa de longitud continua. A medida que esto sucede, los esfuerzos de tensión se desarrollan y son proporcionales a la magnitud por disminución de la temperatura. El esfuerzo a tensión disminuye con el tiempo por la relajación del material viscoelástico. Sin embargo, la tensión en la carpeta asfáltica causada por el cambio de volumen continuo se acumula en la parte superior y cuando el esfuerzo a tensión sobrepasa la resistencia de la carpeta (resistencia a la tensión o a la fatiga térmica) se genera una grieta. En ciudad de Cuenca no hay una gradiente de temperatura considerable y tampoco hay temperaturas extremadamente bajas.

3.13 Respuestas en Tipos de Pavimentos Flexibles.

Cada tipo de pavimento tiene sus propias respuestas (esfuerzos, tensiones, deformaciones y deflexiones) y su localización, así como de los materiales utilizados durante su construcción. Los pavimentos flexibles que son utilizados en la actualidad pueden agruparse en tres grupos:

- a) Pavimentos de tipo convencionales (espesor delgado de la carpeta asfáltica y espesores considerables de las capas granulares).
- b) Pavimentos de tipo full depth (espesor total de carpeta asfáltica sobre la capa subrasante).
- c) Pavimentos de tipo semirrígidos.

3.13.1 Pavimentos de tipo convencionales.

Como se indica en la Figura 26, se muestra un pavimento de tipo convencional. Las respuestas por sus condiciones de carga son las siguientes:

- ➔ Deflexión de la superficie del pavimento directamente bajo la carga aplicada y a varias distancias radiales de la misma (δ).

- ➔ Deformaciones y esfuerzos verticales en la parte superior y a distintas profundidades de la carpeta asfáltica (ϵ_t y σ_z).
- ➔ Deformaciones y esfuerzos radiales y tangenciales en la parte inferior de la carpeta asfáltica y en los puntos radiales superficiales adyacentes a la carga aplicada (σ_r y ϵ_t).
- ➔ Esfuerzo vertical y horizontal en las capas granulares (base y sub-base, hidráulica) en el interfaz y en puntos medios de cada capa (σ_z y σ_r).
- ➔ Esfuerzo vertical y horizontal en la parte superior de la subrasante (σ_z y σ_r).
- ➔ Deformación vertical en la parte superior de la subrasante (ϵ_z).

Figura 26

Respuestas críticas en un pavimento flexible convencional.



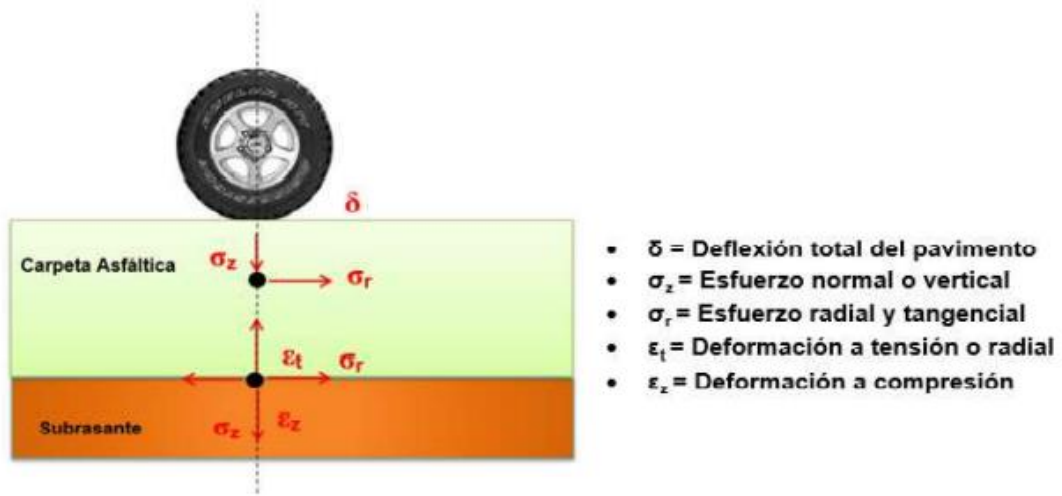
Fuente: Garnica, Hernández y Coria 2018.

3.13.2 Pavimentos de tipo Full Depth.

Para un pavimento tipo full depth (espesor total, figura 27) las respuestas críticas son las mismas que para el pavimento flexible convencional, pero sin capas granulares (base y sub-base hidráulica).

Figura 27

Respuestas críticas en pavimento tipo full depth.



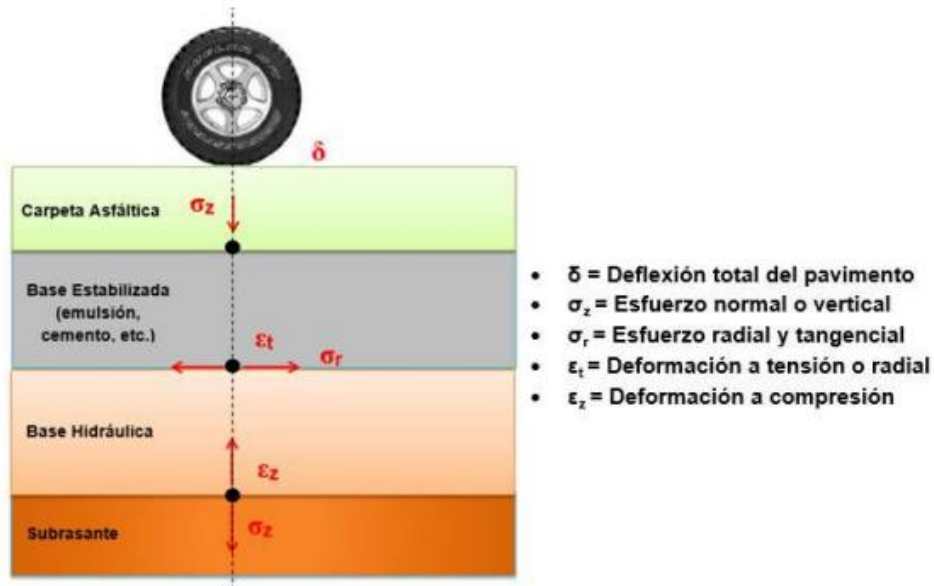
Fuente: Garnica, Hernández y Coria 2018.

3.13.3 Pavimentos de tipo Semirrígidos.

Los pavimentos semirrígidos se componen de una carpeta asfáltica la cual está sobre capas estabilizadas que tienen mayores rigideces (Deep Strength). Estas capas estabilizadas pueden ser bases estabilizadas con cemento Portland, asfalto, cal, etc. Esto ocasiona que las deformaciones y esfuerzos radiales se incrementen y generen agrietamientos en la parte inferior de cada capa y que se reflejen a la capa superficial (Figura 28). Las deformaciones y esfuerzos críticos son similares que los desarrollados en una estructura de pavimento convencional. (Coria, Hernández, Garnica 2018).

Figura 28

Respuestas críticas en pavimento Semirígido.convencional.



Fuente: Garnica, Hernández y Coria 2018.

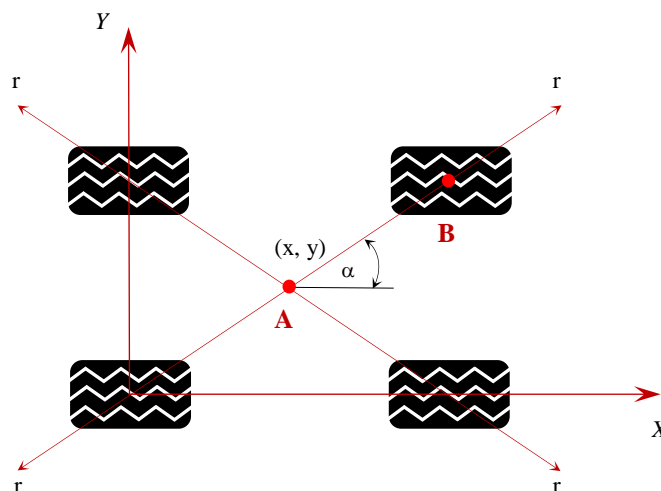
3.14 Superposición en estructura de pavimentos flexibles.

El principio de *superposición* es un postulado elemental en la mecánica de materiales el cual tiene una importancia preponderante en el análisis estructural de los sistemas de pavimentos flexibles. El principio de superposición indica la sumatoria de los efectos que causan cada una de las fuerzas que actúan sobre un elemento sólido o sobre una superficie y que bajo de ella se encuentra un cuerpo constituido de varios materiales teniendo en consideración la convención de signos (tensión (-) y compresión (+)).

Los sistemas elásticos multicapas bajo la acción de múltiples cargas pueden ser solucionados con la aplicación del principio de superposición. La Figura 29 muestra en planta un arreglo de neumáticos de un sistema dual-tándem. Los esfuerzos, deformaciones y deflexiones bajo el punto A (sentido vertical) debido a las cargas de los 4 neumáticos pueden ser obtenidos mediante la sumatoria de la acción de cada una de las cargas debido a que todos los esfuerzos y deformaciones están en la misma dirección vertical o z. Por lo que, el esfuerzo radial σ_r , tangencial σ_θ , y el esfuerzo cortante τ_{rz} debido a cada carga no puede ser directamente sumada por estar en 4 diferentes direcciones como se indica en el punto A (ver Figura 29). Por lo tanto, σ_θ , σ_r y τ_{rz} , deben ser resueltos por sus componentes en las direcciones x e y como se indica en la Figura 30 para esfuerzos en el punto A debidos a la carga aplicada en el punto B. El análisis en el punto A, es el mismo para cualquier otro punto de interés para encontrar esfuerzos máximos.

Figura 29

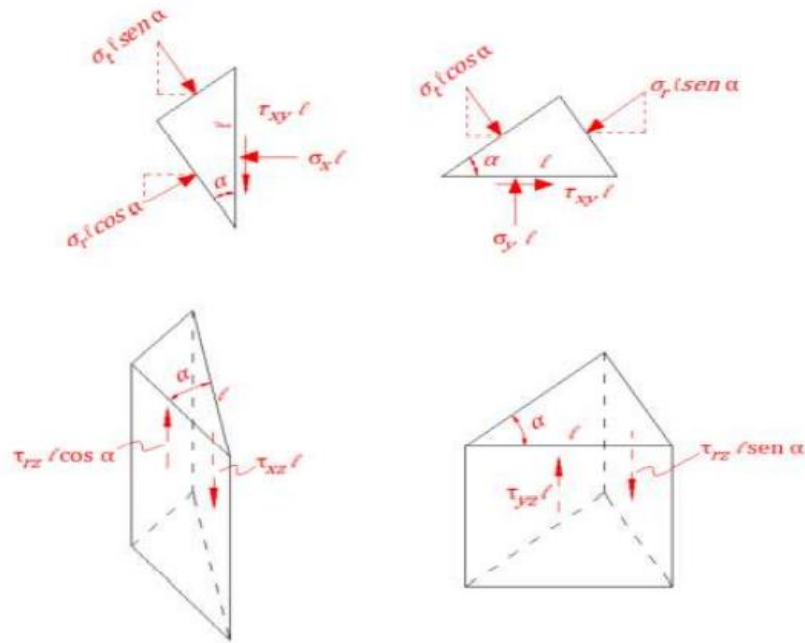
Superposición de Esfuerzos para Cargas Múltiples.



Fuente: Garnica, Hernández y Coria 2018.

Figura 30

Superposición de Esfuerzos para Cargas Múltiples.

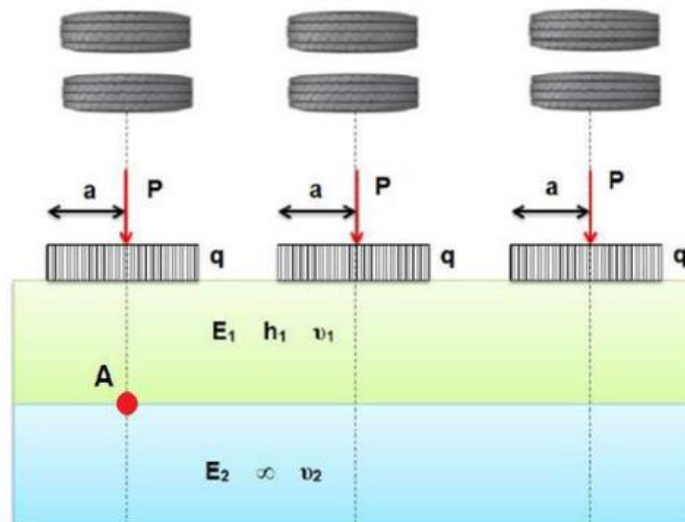


Fuente: Garnica, Hernández y Coria 2018.

En el caso de un semi eje tridem, como se indica en la Figura 31 y Figura 32. Para obtener el esfuerzo normal o la deflexión de todo sistema en el punto A primeramente se debe determinar el efecto del neumático en ese punto, y luego de todos y cada uno de los neumáticos que forman el sistema restante: B, C, D, E y F.

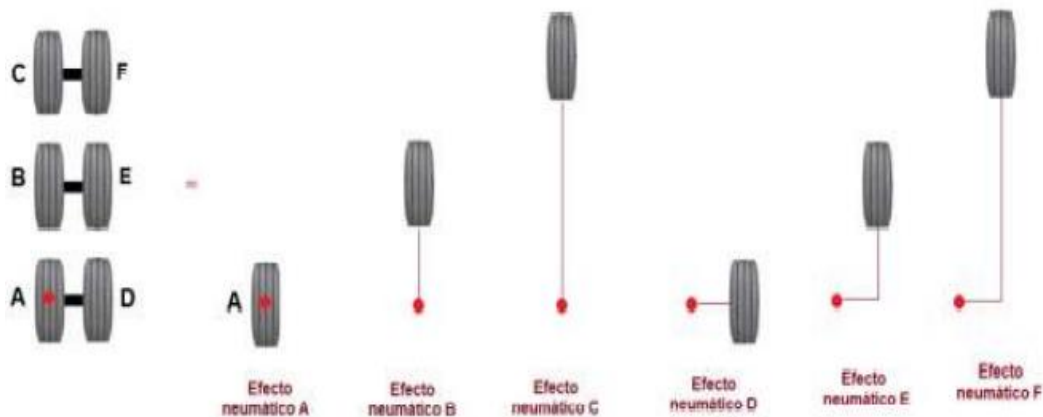
Figura 31

Superposición para la mitad de un eje tridem.



Fuente: Garnica, Hernández y Coria 2018.

Superposición para la Mitad de un Eje Tridem.



Fuente: Garnica, Hernández y Coria 2018.

3.15 Análisis lineal, no lineal y viscoelástico en pavimentos flexibles.

3.15.1 Análisis lineal.

En pavimentos flexibles el análisis lineal considera el comportamiento de los materiales los cuales tienen una coordinación proporcional entre el esfuerzo aplicado y la deformación que se genera. Este tipo de concepto generalmente se considera en los análisis estructurales de pavimentos, por su simplicidad.

3.15.2 Análisis no lineal.

El análisis no lineal en un pavimento flexible considera también el comportamiento de los materiales debido a su rigidez que depende del nivel de esfuerzos producidos; este análisis corresponde a suelos no estabilizados. El análisis no lineal considera que los materiales de un pavimento flexible se comportan de acuerdo al estado de esfuerzos al que se someten cuando existen diferentes cargas vehiculares. Esta característica se da en materiales no tratados y suelos (subrasante).

En los últimos años han evolucionado los métodos y pruebas para determinar las características mecánicas de los materiales granulares y suelos. Existe una amplia variedad de pruebas de laboratorio y ensayos de campo, las cuales son:

Las que se ensayan en laboratorio son las siguientes:

- ➔ *Estabilómetro de Hveem (R).*
- ➔ *Valor Relativo de Soporte (CBR).*
- ➔ *valor de soporte del suelo (SSV).*

Las que se ensayan en in situ son las siguientes:

No destructivos:

- ➔ *Deflectómetros de caída de peso (FWD).*
- ➔ *GeoGauge.*
- ➔ *Analizador de pavimento sísmico (SPA).*
- ➔ *Deflectómetros de caída ligera (LWD).*

Destructivos:

- ➔ *Penetrómetro de cono dinámico (DCP).*
- ➔ *Medidor de presión (PMT).*
- ➔ *Prueba de carga de placa (PLT).*
- ➔ *Dilatómetro (DMT).*

3.15.3 Análisis viscoelástico.

Dentro del análisis viscoelástico se considera que la temperatura es determinante en los materiales estabilizados con asfalto, pero también hay que tomar en cuenta la aplicación de cargas y su frecuencia. Se considera la carga de los neumáticos en movimiento junto a la variación de las propiedades de los materiales para la definición de los esfuerzos y deformaciones en puntos específicos de la estructura del pavimento. La forma más práctica y sencilla de analizar la viscoelasticidad es mediante los modelos reológicos (La **reología** es la rama de la física que se estudia el modo en que los materiales se deforman o fluyen en respuesta a fuerzas o tensiones aplicadas).

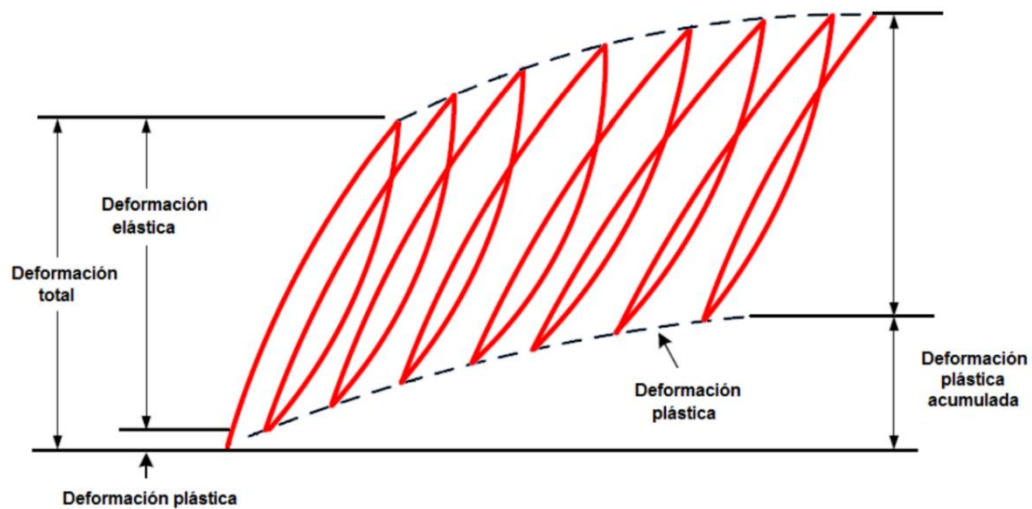
Cuando un material es un sólido con características viscoelásticas y es sometido a un estado tensional la deformación producida no es constante, sino que se producen cambios con el tiempo. Los materiales fluyen relativamente por lo que la deformación se incrementa progresivamente como si fuera un fluido. (Coria, Hernández, Garnica 2018).

3.16 Módulo Resiliente.

Cuando un material granular se le somete a la aplicación de cargas, presenta una deformación donde su magnitud depende de varios factores como el tipo de material, granulometría, tipo de compactación, esfuerzo aplicado, peso específico, humedad, etc. La deformación total producida por la acción de cargas repetidas tiene dos componentes, la una definida como deformación recuperable o elástica es cuantificable una vez que las cargas dejan de actuar sobre el material y la otra componente denominada deformación permanente es una deformación no recuperable o plástica que experimenta un cierto material con un espesor definido por cada ciclo de aplicación de cargas. Como se indica en la Figura 33.

Figura 33

Resiliencia de materiales granulares y suelos



Fuente: Garnica, Hernández y Coria 2018.

Cuando un material se somete a compresión triaxial, se obtiene un esfuerzo desviador, el cual se divide entre la deformación axial recuperable y se obtiene el módulo resiliente.

$$M_r = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\epsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{axial}} \quad (24)$$

M_r = Modulo resiliente.

σ_1 = Esfuerzo principal mayor.

σ_3 = Esfuerzo principal menor.

σ_d = Esfuerzo desviador.

ϵ_{axial} = Deformación axial recuperable.

Figura 34

Equipo Triaxial Cíclico, Obtención M_R en Materiales Granulares



Fuente: Ensayos Triaxiales para Suelos

Cesar Mauricio Balarezo Durán

Para determinar el Módulo Resiliente de la subrasante de las muestras de laboratorio proporcionadas por el MTOP se utilizan las correlaciones propuestas por la AASHTO 2002, las cuales se relacionan con el CBR obtenido y siguientes ecuaciones indican lo dicho.

$$Mr(Psi) = 2555xCBR^{0.65}, \quad CBR \leq 10\% \text{ (AASHTO 2002)} \quad (25)$$

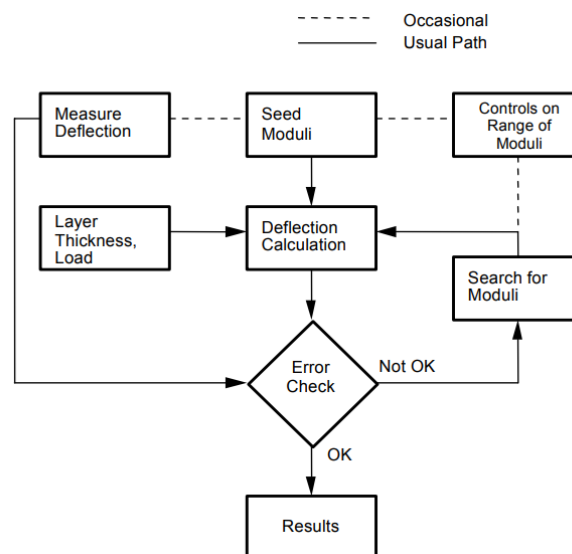
$$Mr(Psi) = 4326 \ln(CBR) + 241 \quad CBR > 10\% \quad (26)$$

3.17 Calculo Inverso de Módulos del Pavimento

El cálculo inverso o retrocálculo es una evaluación mecánica de las cuencas de deflexión obtenidas de la superficie del pavimento y generadas por varios dispositivos de deflexión (geófonos). El retrocálculo toma una medida de deformación de la superficie e intenta igualarla (dentro de error tolerable) con una deformación de la superficie calculada generada de una estructura de pavimento idéntica suponiendo la rigidez de cada capa (módulos elásticos). Los supuestos módulos de cada capa en el modelo calculado se ajustan hasta que producen una deformación de la superficie que se asemeja mucho a la medida (FWD). Entonces las rigideces de las capas supuestas que da como resultado esta coincidencia se asemeja a módulos reales in situ para las diversas capas de pavimento. El proceso de retrocálculo de comparación de módulos es iterativo y normalmente se realiza con programas de computación. En la Figura 35 se indica el diagrama de flujo para el cálculo iterativa para la obtención de módulos.

Figura 35

Flujo típico de cálculo inverso iterativo.



Fuente: modelo de Robert L. Lytton, 1989.

Cesar Mauricio Balarezo Durán

Entrada y análisis de datos en los procesos de retrocálculo son comunes para todos los programas de este tipo, mantienen en sus procesos de cálculo matemático los siguientes datos:

- **Deflexiones medidas.** Configuración de los resultados de la prueba FWD considerando ubicación de la prueba, diámetro de placa de carga, distancia radial de sensores y nivel de carga.
- **Temperatura.** Medición de temperatura en el momento de la prueba FWD.
- **Estructura del Pavimento.** Tipo de capa (PCC, HMA, Base / Subbase y subrasante), espesores, relación de Poisson.
- **Módulos de semillas.** Módulos iniciales propuestos por experiencia del usuario.
- **Cálculo de deflexión.** El método elástico de capas, utilizado generalmente para calcular deflexiones.
- **Comprobación de errores.** Compara las cuencas medidas con las calculadas.
- **Búsqueda de nuevos módulos.** Se introduce nuevos módulos para converger en un error aceptable entre las cuencas de deflexión medidas y calculadas.
- **Controles sobre el rango de módulos.** Control de módulos no razonables (mínimo y máximo).

Cuando se realiza el retrocálculo de los módulos la diferencia entre el cuenco de deflexión calculado para que coincida con el cuenco de deflexión medido se describe como la verificación de errores bondad de ajuste o error de convergencia. La medida principal de convergencia es típicamente es la raíz cuadrada media (RMS) o error de la raíz cuadrada media (RMSE), ambos términos se consideran similares. El programa para el cálculo inverso EVERCALC utiliza el RMSE. En la Figura 36 se indica el cuenco de deflexiones medido vs el cuenco de deflexiones calculado.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_d} \left[\frac{1}{n_d} \left(\frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2 \right]} \quad (27)$$

Donde:

RMSE = Error de la raíz cuadrada media.

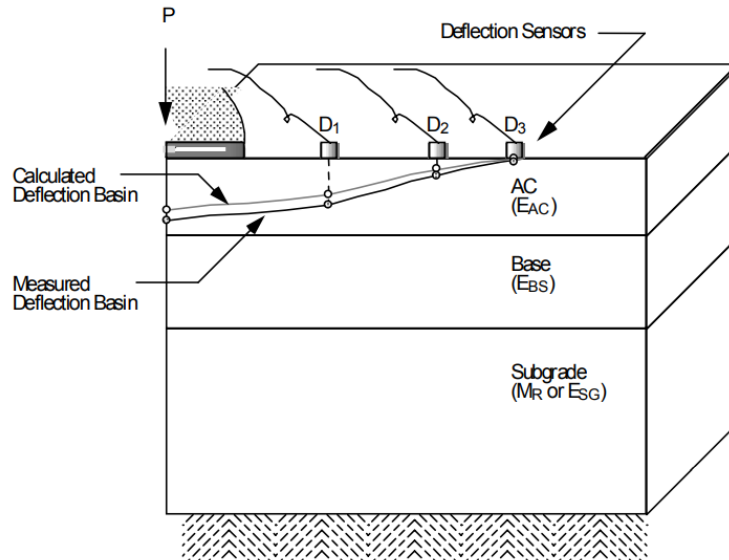
n_d = Número total de sensores de deflexión utilizados.

d_{ci} = Deflexión calculada de la superficie del pavimento en el sensor i .

d_{mi} = Deflexión medida de la superficie del pavimento en el sensor i .

Figura 36

Cuenco de Deflexiones Calculadas vs Medidas



Fuente: *EVERSERIES USER'S GUIDE*.

3.17.1 Método AASHTO 1993

Es un método tradicional para la evaluación de la estructura de pavimentos nuevos y en cuando están en uso. La metodología utilizada en este método se basa en el modelo de monocapa de Boussinesq.

Podemos calcular de manera inversa el módulo resiliente de la subrasante conociendo la magnitud de la carga y la deflexión con una distancia radial desde el centro del plato de carga. No se necesita como dato adicional la dimensión del plato de carga y tampoco un ajuste de temperatura.

$$M_{rr} = \frac{P(1 - \mu^2)}{\pi * d_r * r} \quad (28)$$

Donde:

M_{rr} = Módulo resiliente retrocalculado de la subrasante (MPa o lb/pulg²).

P = Carga aplicada (KN o libras).

μ = Relación de poisson de la subrasante.

d_r = Deflexión registrada a la distancia r , desde el centro del plato de carga (cm o pulg.)

r = Distancia desde el plato de carga y el sensor en análisis (cm o pulg.).

Asumiendo una relación de Poisson con un valor de 0.50, el módulo resiliente retrocalculado de la subrasante se simplifica a:

Para obtener el M_{rr} se utiliza una deflexión con una distancia radial lo suficientemente lejana para que proporcione una aceptable estimación, pero también lo suficientemente cercana evitando una deflexión muy pequeña, la cual no sería significativa. La distancia radial se expresa de la siguiente manera:

$$r \geq 0.70a_e \quad (29)$$

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(H_T * \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_{rr}}} \right)^2} \quad (30)$$

Donde:

a_e = Es el radio del bulbo de tensión, en la interface subrasante –pavimento (in).

a = Es el radio del plato de carga (in).

H_T = Es el espesor total de la estructura del pavimento (in).

E_p = Es el modulo elástico de la estructura del pavimento (psi).

Los valores del módulo resiliente es ajustado para tener coherencia con los valores obtenidos en laboratorio. AASHTO 93 recomienda del módulo resiliente retrocalculado se multipliquen por un factor de ajuste igual a $C = 0.33$ debido a que los valores retrocalculados son superiores a los obtenidos en laboratorio. (AASHTO 93).

$$M_{rr} = C \left[\frac{P(1 - \mu^2)}{\pi * d_r * r} \right] \quad (31)$$

Para conocer el modulo elástico de la estructura del pavimento (E_p) se utiliza la deflexión medida en el centro del plato de carga (D_o), el módulo resiliente de la subrasante (M_{rr}), la carga aplicada (p) y el espesor total de la estructura del pavimento (H_T). Se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$D_o = 1.5pa \left\{ \frac{1}{M_{rr} \sqrt{1 + \left(\frac{H_T}{a} \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_{rr}}} \right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{H_T}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\} \quad (32)$$

El número estructural efectivo (SN_{ef}) es un valor muy importante ya que nos permite determinar espesores de refuerzo o análisis de la vida residual del pavimento en uso y se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$SN_{ef} = 0.0045 H_T \sqrt[3]{E_P} \quad (33)$$

3.17.2 Método de YONAPAVE

Este método analiza los valores de deflexión de una estructura de pavimento y estima directamente el módulo resiliente de la subrasante el cual se basa en la teoría del modelo elástico de Hogg. Esta metodología se basa en el análisis del cuenco de deflexiones y toma en cuenta la capacidad portante de la estructura del pavimento.

Para el cálculo del área del cuenco de deflexiones se consideran los sensores a 0, 30, 60 y 90 cm desde el centro del plato de carga y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$AREA = 6 * \left[1 + 2 \frac{D_{30}}{D_0} + 2 \frac{D_{60}}{D_0} + \frac{D_{90}}{D_0} \right] \quad (34)$$

Para calcular la longitud característica l_o , Yonapave considera el área del cuenco de deflexiones y coeficientes de ajuste (ver Tabla 7) de acuerdo a la misma área involucrada. Se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$l_o = A * e^{(B*AREA)} \quad (35)$$

Tabla 7

Coefficientes de ajuste de curva para l_o y Mrr

Rango de valores para el Área (pulg.)	h/l_o	A	B	m	n
Mayor o igual a 23	5	3,275	0,1039	926,90	-0,8595
Mayor o igual a 21 y menor que 23	10	3,691	0,0948	1152,10	-0,8782
Mayor o igual a 19 y menor que 21	20	2,800	0,1044	1277,60	-0,8867
Menor que 19	40	2,371	0,1096	1344,20	-0,8945

Fuente: Método Yonapave

Luego de obtener la longitud característica (l_0) se procede a calcular el módulo resiliente (M_{rr}) el cual utiliza la presión de contacto aplicada sobre el pavimento (P), la deflexión que se produce justo bajo el plato de carga (D_0) y los factores de ajuste de curva (m , n).

$$M_{rr} = m * \frac{P}{D_0} * l_0^n \quad (36)$$

Con los parámetros de la longitud característica (l_0) y el módulo resiliente (M_{rr}) podemos obtener el número estructural efectivo del pavimento SN_{ef} con la siguiente ecuación:

$$SN_{ef} = 0.01821 * l_0 * \sqrt[3]{M_{rr}} \quad (37)$$

Hoffman en 1977 realiza una corrección al SN_{ef} , con correlaciones obtenidas en programas de computación, lo que da lugar a la siguiente ecuación:

$$SN_{ef} = 2[0.01821 * l_0 * \sqrt[3]{M_{rr}}] - 0.50 \quad (38)$$

3.17.3 Programa de retrocálculo EVERCALC

EVERSERIES es un paquete de tres programas como son Everstress, Evercalc y Everpave. Sirven para determinar las respuestas en los pavimentos, retrocálculo de módulos y diseño de pavimentos, respectivamente. Se realizó la petición de este programa a Washington State Department of Transportation (WSDOT) y fue entregado por el Ingeniero en Pavimentos *Jeff Uhlmeier*. La versión entregada es del 2001 y en la actualidad este programa está incluido en el programa AASHTOWare que tiene un costo de adquisición elevado.

Evercalc es un software que analiza la estructura del pavimento con la característica de que puede estimar los módulos elásticos de cada una de las capas del pavimento y de manera opcional normaliza el módulo de HMA a una condición estándar de laboratorio (temperatura).

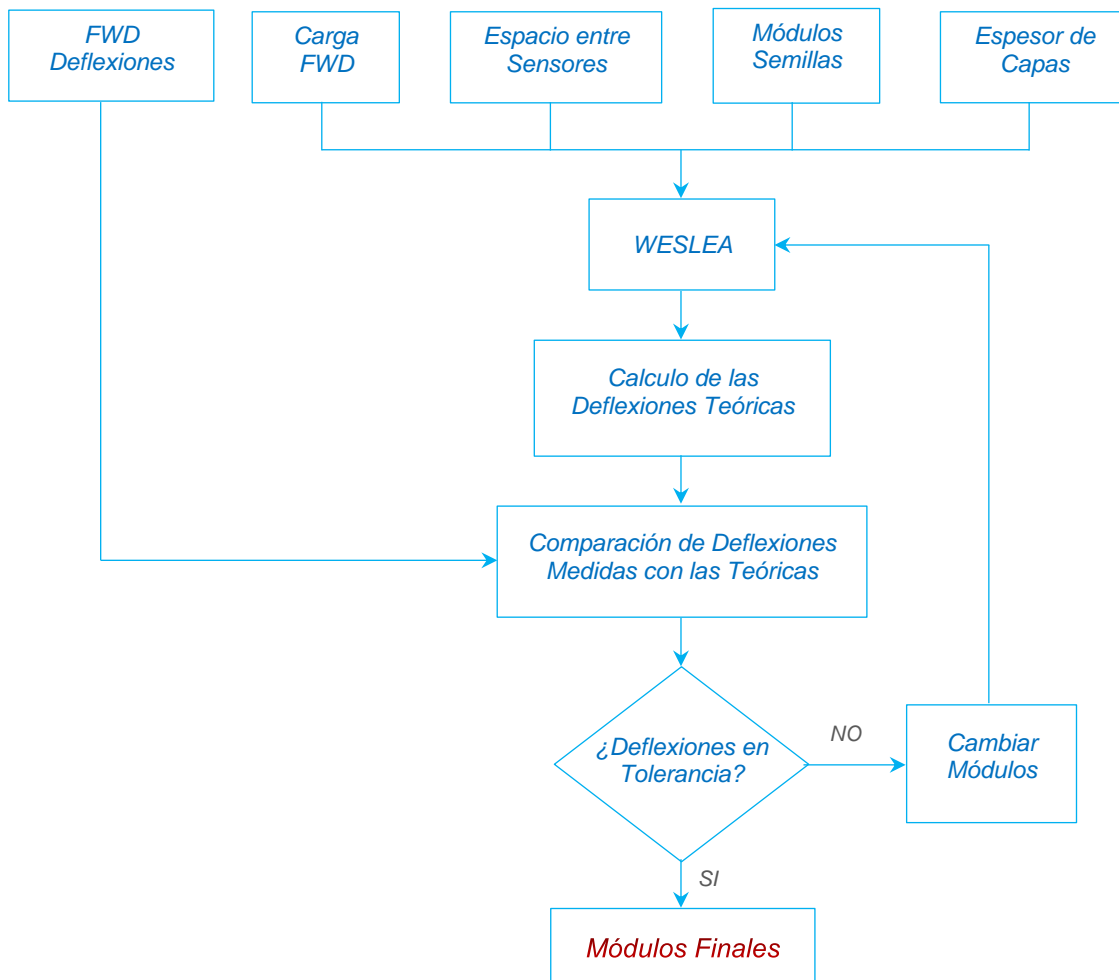
Evercalc utiliza un escenario iterativo para obtener los módulos con una solución elástica de capas igualando deflexiones calculadas y medidas. Evercalc es un software robusto, eficiente, con alta precisión, y utiliza el algoritmo de minimización de Levenberg – Marquardt.

El programa Evercalc utiliza WESLEA (proporcionado por Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers) como la solución elástica en capas que calcula las

deflexiones teóricas (2005 WSDOT). En la Figura 37 se indica el flujograma simplificado de este método.

Figura 37

Flujograma para la Determinación de Módulos, EVERCALC



Módulos Semilla. Cuando se analiza una estructura de pavimento que contiene hasta tres capas los módulos semilla pueden ser calculados por el programa con ecuaciones de regresión interna. Más de cuatro capas los módulos semilla son introducidos en base a la experiencia del modelador.

Finalización de Iteraciones. El programa termina su proceso de cálculo iterativo cuando se cumple una de las siguientes condiciones:

Tolerancia a la deflexión. Cuando el error cuadrático medio (RMS) es inferior a un valor especificado en el programa. Un 3% se considera una adecuada tolerancia en la deflexión calculada, para que los módulos sean confiables. (2008, MEPDG).

Tolerancia en módulos. La relación entre diferencia del último módulo y el antepenúltimo, sobre el último módulo calculado nos indica el incremento o decremento de módulos calculados; si este valor no supera el 1% se considera una tolerancia adecuada para finalizar las iteraciones.

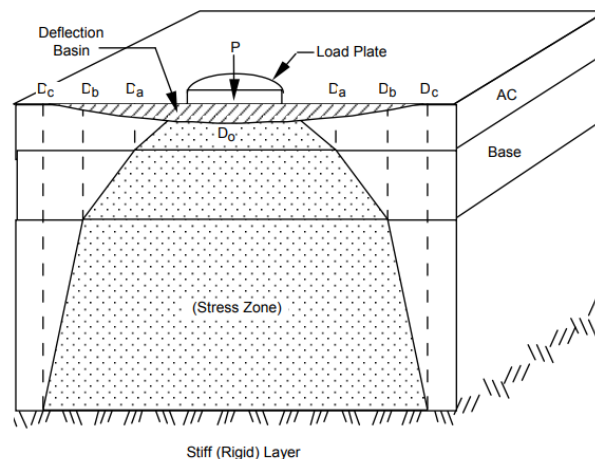
El número de iteraciones alcanza el máximo de iteraciones. Para cada iteración se realiza un mínimo de llamadas a WESLEA ($m + 1$), donde m es el número de capas del pavimento con módulos desconocidos. Usualmente, un número máximo de diez iteraciones es adecuado.

Capa Rígida.

Una suposición fundamental es que la deflexión de la superficie del pavimento es resultado de la deformación de los diversos materiales en la zona de tensión aplicada. Por lo que, tan sólo la parte de la estructura del pavimento que se encuentra sometida a esfuerzos contribuye a las deflexiones superficiales medidas. Además, no se producirá deflexión de la superficie más allá del desplazamiento (medido desde la placa de carga) que corresponde a la intersección de la zona de tensión aplicada y la capa rígida. Por lo tanto, el método para estimar la profundidad de la capa rígida supone que la profundidad a la que se produce una deflexión cero (presumiblemente debido a una capa rígida) está relacionada con el desplazamiento (distancia radial) en el que se produce una deflexión superficial cero. En la Figura 38 se ilustra lo dicho anteriormente, donde se observa que la deflexión de la superficie D_c es cero.

Figura 38

Zona de Tensión y Capa Rígida



Fuente: *EVERSERIES USER'S GUIDE*.

Si el retrocálculo nos dan resultados de módulos de subrasante inusualmente altos se tiene que verificar si existe una capa rígida. Si no se tienen en cuenta las capas rígidas en el proceso de retrocálculo por lo general darán módulos de subrasante irrealmente altos, esto es

relativamente verdadero si una capa rígida se encuentra a una profundidad de 6 a 9 metros aproximadamente (20 a 30 pies) por debajo de la superficie del pavimento.

Por lo general, las capas rígidas reciben una rigidez que varía entre 700 a 7000 MPa (100.000 a 1.000.000 psi), con una profundidad semi-infinita. Esto hace que la subrasante sea una capa con una profundidad finita en lugar de la profundidad infinita normalmente asumida. Es aconsejable utilizar un software de retrocálculo que utilice el algoritmo "Profundidad de capa rígida". La profundidad a la capa rígida se debe verificar en lo posible con pruebas no destructivas (NDT) o perforaciones.

El módulo de la capa rígida aparentemente puede variar. Si la capa rígida se debe a condiciones saturadas (nivel freático), entonces el módulo apropiado sería 345 MPa aproximadamente (50.000 psi). Si la base de la capa rígida son rocas o sustratos de alta consolidación, entonces el módulo apropiado sería 7000 MPa aproximadamente (1.000.000 psi) (2005 WSDOT).

3.17.4 Programa de retrocálculo ELLEA1.

En el 2009 el doctor Eyal Levenberg realiza un trabajo de investigación posdoctoral sobre validación de equipos de pista de prueba estructural para lo cual usó las instalaciones de pruebas aceleradas en pavimento (Accelerated Pavement Testing, APT). Menciona en su introducción que, a pesar que han pasado muchos años de investigación continua y sistemática el diseño o análisis de pavimentos asfálticos en la actualidad aún incluyen componentes empíricas dominantes. Lo dicho anteriormente se atribuye a la complejidad del problema de donde se tienen los siguientes puntos:

- ➔ El comportamiento mecánico de los materiales de la estructura del pavimento y la subrasante no se relacionan bien y tampoco se puede controlar lo suficiente.
- ➔ Las propiedades de los materiales cambian continuamente en el transcurso de la vida útil del pavimento debido a la acción natural como procesos de oxidación y el proceso de endurecimiento por el envejecimiento del mismo.
- ➔ Se pueden hacer estimaciones aproximadas con datos tales como cargas de tráfico y condiciones ambientales.
- ➔ Por último, la noción de falla estructural no está definida de manera clara.

Por todas estas razones los métodos actuales se basan en la experiencia pasada. Por lo tanto, no se pueden usar de una manera confiable con diversos materiales ya que no ayudan a optimizar los diseños de pavimentos.

Eyal, con su trabajo en el año 2009 necesitó para su desarrollo un programa para el análisis retroactivo de módulos donde menciona lo siguiente: la introducción por Burmister (1943 -1945), los ingenieros e investigadores han utilizado la teoría elástica de capas (layered elastic theory LET) isotrópica para representar las respuestas resilientes de los materiales inducidas por las cargas de los sistemas de pavimentos asfálticos. A la fecha, LET isotrópica sirve como el "motor" indispensable para el MEPDG a través del código informático JULEA (Uzan, 1976). Se supone, de acuerdo con la teoría, que los materiales del pavimento son elásticos lineales, homogéneos, isotrópicos y sin peso, caracterizados por un módulo elástico (de Young, E) y una relación de Poisson (ν). Eyal realiza el análisis para determinar los módulos elásticos de capas y lo programa en una hoja de cálculo de Excel y lo llama *ELLEA1*.

La Figura 39 se puede ver el ingreso de las propiedades de los materiales. Para cada capa se requieren tres atributos como el módulo de Young, relación de Poisson y su espesor. En la Figura 39, se consideran cuatro capas y la subrasante semi-inf, pero se asignan propiedades de material idénticas a las capas 3 y 4. Se observa el número de cargas y su magnitud vertical de carga (105 frente a 55), un radio de carga (4 frente a 7) y la ubicación de la aplicación de carga (coordenadas X, Y). Por último, se ingresa las coordenadas del punto de evaluación dentro de la estructura.

Figura 39

Programa LET Isotrópico ELLEA1

Layer	Modulus	Poisson	Thickness		
1	300,000	0.30	5.0		
2	24,000	0.35	6.0		
3	12,000	0.40	19.0		
4	12,000	0.40	42.0		
5	4,300,000	0.20	semi-inf		
Load#	Stress	Radius	X	Y	
1	105.00	4.00	-10.00	0.00	
2	55.00	7.00	10.00	0.00	
Evaluation Point	x	y	z	Layer=	
	2.00	2.00	2.00	1	
Direction	Stress	Strain (microstrains)	1000 * Disp.		
X	22.5	40			
Y	27.1	60			
Z	8.2	-22	20.8	Positive = Down	
YZ	7.7	Negative (stress or strain)=Tension			
XZ	-20.2				
XY	-1.0				

Para ejecutar un cálculo no es necesario accionar ningún botón, cualquier cambio que se realice en una de las tablas de datos de entrada se refleja automáticamente en tiempo real en la tabla de resultados. Esta característica resalta en el programa y hace que sea extremadamente fácil de usar y atractivo en comparación con cualquier otro disponible que utilice la teoría elástica de capas (LET).

Es de conocimiento extenso que los materiales del pavimento no cumplen con la teoría elástica de capas (LET isotrópicos, ver Figura 40). Se sabe que la respuesta resiliente de las mezclas de HMA es viscoelástica anisotrópica y no lineal (Uzan y Levenberg, 2007). La respuesta elástica de las capas no unidas es elástica no lineal y sensible al estado de tensión (Uzan, 1985; 1992) y también anisotrópica (2007, Levenberg). Por lo tanto, Eyal analiza la creación de un método elástico de capas con propiedades de materiales anisotrópicos, programa en una hoja de cálculo de Excel y lo llama ELLEA2, similar al programa isotrópico ELLEA1. Luego de comparar los dos programas con ensayos realizados determina que los resultados son similares, al igual que sus errores en las respuestas de pavimentos medidas por el FWD. Con base en esos hallazgos, concluye que el análisis anisotrópico de deflexiones ofrece pocas ventajas sobre un análisis isotrópico. En la tabla Figura 40, se observa las suposiciones elásticas vs la realidad a la que está sometida la estructura del pavimento.

Figura 40

Teoría Elástica vs La Realidad

<i>Suposiciones en las cuales se basa la teoría elástica, no se cumple a cabalidad en los materiales y en las estructuras de pavimentos.</i>	
TEORÍA ELÁSTICA	REALIDAD
Carga Estática	Carga Dinámica
Continuidad de los Materiales	Discontinuidad en los Materiales
Homogeneidad	No Homogeneidad
Isotropía	Anisotropía
Relación Lineal Esfuerzo - deformación	Relación Compleja Esfuerzo - Deformación
Deformaciones Elásticas	Deformaciones Elásticas, Plásticas, Viscosas y Viscoelásticas

Fuente: Fernando Sánchez Sabogal

3.17.5 Corrección por temperatura.

Los módulos de asfalto retrocalculados se pueden ajustar para la temperatura estándar (21 °C) usando la siguiente fórmula (LTPP FHWA-RD-98-085);

$$FAT = 10^{\text{slope}(T_r - T_m)} \quad (39)$$

Donde:

FA = factor de ajuste por temperatura.

Slope = pendiente de módulos logarítmicos, valor típico -0.021.

Tr = Valor estándar o referencial de temperatura de la carpeta asfáltica °F (°C).

Tm = Valor medido de temperatura de la carpeta asfáltica °F (°C).

3.18 Pruebas Destructivas

La Subsecretaría Zonal 6 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, como entidad del Estado Ecuatoriano, tiene en su jurisdicción la vía Cuenca – Azogues – Biblián (E35). En el año 2010 contrata a la Asociación Caminosca – Promanvial, la realización de los Estudios Definitivos de Ingeniería de la carretera Cuenca – Azogues – Biblián, que comprende la Rehabilitación del tramo Cuenca (El Salado) – Guangarcucho, actual paso de Azogues y tramo Azogues - Biblián; la ampliación a 4 carriles del tramo Guangarcucho – Azogues; y los estudios definitivos de Ingeniería de una nueva vía de cuatro carriles entre Azogues y Biblián (Paso Lateral). En año 2018 también contrata a la Empresa Pública de la Universidad de Cuenca UCUENCA EP, la realización de los ESTUDIOS DE PREFACTIBILIDAD, FACTIBILIDAD, IMPACTOS AMBIENTALES E INGENIERÍA DEFINITIVOS PARA LA SOLUCIÓN DE LOS CONFLICTOS DE MOVILIDAD DE LA AUTOPISTA CUENCA – AZOGUES – BIBLIÁN, UBICADOS EN LAS PROVINCIAS DE AZUAY Y CAÑAR (MTOF-Z6-01-2018). Con estos antecedentes se realiza una petición formalmente de la universidad estatal de Cuenca y mi persona, como interesado en la realización del estudio vial del tramo Cuenca – Guangarcucho, para que nos ayuden con los datos técnicos para realizar el trabajo de titulación de fin de Master en dicha universidad.

Los resultados de exploración geotécnica referente a datos de laboratorio según lo investigado fueron encontrados en los ensayos de dos empresas, la de CAMINOSCA como UCUENCA EP. La primera tiene ensayos cada 3 km en el tramo Cuenca – Guangarcucho y la

segunda tiene datos en lugares específicos como son los 4 redondeles que están ubicados en dicho tramo tal como se indica en el siguiente detalle:

Tabla 8

Ubicación muestras de laboratorio.

<i>MUESTRA</i>	<i>ABSCISA</i>
1	0+000
2	3+010
3	5+950
4	8+890
5	11+900
6	14+900
7	17+750
8	20+860

Fuente: Caminosca.

Tabla 9

Ubicación muestras de Redondeles.

<i>REDONDEL</i>	<i>ABSCISA</i>
12 de octubre	1+430
Turi	3+270
Gapal	5+350
IESS	8+730

Fuente: UCUENCA EP

En cada abscisa que se indica en las tablas 8 y 9, se ejecutaron en la subrasante ensayos de granulometría, humedad natural, y límites Atterberg para obtener su clasificación. Con el material de subrasante, se realizó adicionalmente ensayos de compactación y CBR para obtener la capacidad soporte del suelo y las densidades máximas logradas.

3.19 Módulos de laboratorio vs los retrocalculados.

Hay varias investigaciones sobre la correlación de módulos obtenidos en laboratorio con los obtenidos con FWD por diferencia de suelos y por variantes en los materiales que dependen de su grado de compactación, situación climáticas y constructivas, que es muy difícil obtener una correlación general. A más de variantes en los materiales existen problemas por las siguientes razones:

- Es muy difícil dar las cualidades de compactación de la base, sub base y subrasante en el laboratorio, tal como están en el campo, con sus propiedades de densidad y condiciones de humedad.
- La carga aplicada de las pruebas FWD, es diferente a la carga en laboratorio.
- La toma de muestras para el laboratorio puede no representar las condiciones de campo (por ejemplo, tomar muestras de subbase o material de relleno en vez de suelos de la subrasante).
- Los materiales que constituyen la estructura del pavimento in situ no son homogéneos.

Desde el punto de vista económico y de eficiencia, las pruebas de laboratorio vs las obtenidas con el FWD, tienen las siguientes conclusiones: (Houston, Mamlouk, Perera, 1992).

- El muestreo o toma de datos con el FWD son al menos 50-100 veces menos costosas que las pruebas de muestreo y de laboratorio.
- Con presupuesto adecuado se puede obtener mucha más información de las pruebas con el FWD y realizar un estudio estadístico significativo.
- Los módulos retrocalculados de los datos FWD son suficientemente confiables para el diseño de superposición y que son muy superiores a los módulos derivados de muestreo y pruebas de laboratorio.
- Los resultados con los datos del FWD produce automáticamente un módulo promedio ponderado que se ajusta a las características del material. Por lo tanto, el módulo con los datos del FWD es el más apropiado para un diseño de superposición.

En la guía de diseño de pavimentos empírico – mecanicista MEPDG, AASHTO 2008 se menciona que si el módulo resiliente se determina retrocalculando los valores de módulos de la estructura del pavimento de las pruebas de deflexión se deben ajustar a condiciones de laboratorio, estos ajustes se aplican a capas no ligadas. Para el diseño se recomienda el uso de los valores publicados en los folletos de la FHWA FHWA-RD-97-076 y FHWA-RD-97-083 (Von Quintus y Killingsworth, 1997 a y b). En la Tabla 10 se muestran dichos valores.

Tabla 10

Relaciones de módulos retrocalculados con respecto al laboratorio.

Tipo de capa	Ubicación de la capa	M_R/E_R
Capas de base y subbase granulares no unidas	Base / subbase granular entre dos capas estabilizadas (materiales cementosos o estabilizados con asfalto).	1,43
	Base / subbase granular debajo de una capa de PCC.	1,32
	Base / subbase granular debajo de una superficie o capa base de HMA.	0,62
Suelos de terraplén y subrasante	Terraplén o suelo de subrasante debajo de una capa de subbase estabilizada o suelo estabilizado.	0,75
	Terraplén o subrasante debajo de un pavimento flexible o rígido sin una capa de base / subbase granular.	0,52
	Terraplén o subrasante debajo de un pavimento flexible o rígido con una base granular o una capa de subbase.	0,35

E_R = Módulo elástico retrocalculado.

M_R = Módulo de elasticidad de las materiales in situ, determinado en el laboratorio.

Fuente: MEPDG. (FHWA FHWA-RD-97-076 y FHWA-RD-97-083).

3.20 Tráfico

El estudio de tráfico tiene como finalidad principal dimensionar las vías para que se construyan de la manera más eficiente bajo la mejor consideración económica y a su vez cubran la demanda estimada.

Estimar la demanda de tráfico es muy importante y para ello en la actualidad existen varias herramientas con avanzada tecnología que facilitan al proyectista establecer las mejores decisiones para el dimensionamiento de las características de las vías.

Los datos más recientes de tráfico para el tramo en estudio son los realizados por la empresa pública UCUENCA EP realizados en el año 2018.

3.20.1 Tasas de Crecimiento

En el cálculo de las proyecciones del tráfico para los diferentes periodos de diseño se han considerado las tasas recomendadas por la Unidad de Factibilidad del Ministerio de Transporte y Obras Públicas para el caso de la provincia del Azuay como se expone en Tabla 11. Para el periodo 2035-2045 se ha tenido que realizar la correspondiente extrapolación de los datos.

Tabla 11

Tasas de Crecimiento de Vehículos

<i>TASAS DE CRECIMIENTO</i>			
<i>PERIODO</i>	<i>LIVIANOS</i>	<i>BUSES</i>	<i>CAMIONES</i>
2018-2020	5.98	2.27	4.45
2020-2025	5.16	1.96	4.07
2025-2030	4.51	1.72	3.67
2030-2035	3.99	1.51	3.33
2035-2040	3.63	1.36	2.99
2040-2045	3.42	1.26	2.67

Fuente: MTOP

3.20.2 Conteos Vehiculares.

La determinación de conteos automáticos nos permite determinar el número de ejes a través de los impulsos que genera el paso de cada vehículo sobre sensores ubicadas en la calzada de manera transversal. La información proporcionada por estos equipos automáticos mide el número de ejes por lo que es necesario obtener un factor de conversión de número de ejes a número de vehículos (livianos, buses, camión dual, tándem, tridem, etc.), Para este cálculo también es necesario el conteo volumétrico de vehículos.

3.20.3 Cálculo del Tráfico Promedio Diaria Anual (TPDA).

El tráfico promedio diario anual es muy útil como herramienta para el cálculo de los indicadores financieros y de rentabilidad económica; así también, como para los cálculos de estructuras de pavimentos. Así mismo, el TPDA permite determinar mediante los indicadores financieros y de rentabilidad para evaluar si el dimensionamiento del diseño vial da solución en una intersección o un intercambiador.

Para calcular el Tráfico Promedio Diario Anual; el cual se realizó en los redondeles 12 de octubre, Turi, Gapal e IESS, se determinó los factores de influencia directa que modifican el tráfico observado. Se realizó un conteo automático de siete días durante 24 horas por diarias

más dos días de conteo volumétrico durante 24 por día siendo un día entre semana y el otro en fin de semana.

El cálculo del TPDA se puede obtener de la siguiente manera:

$$TPDA_{2022} = TO * Fh * Fd * Fs * Fm \quad (40)$$

Donde:

TO = Tráfico observado (medido en número de vehículos).

Fh, Fd, Fs, Fm Factores de influencia.

Los factores de influencia se utilizan de la siguiente manera:

→ *Fh* = El Factor Horario, posibilita llevar el tráfico de un número de horas de levantamiento de datos a las 24 horas del día de encuesta.

→ *Fd* = El Factor Diario, permite llevar el tráfico de un día en particular a un día promedio de la semana.

→ *Fs* = El Factor Semanal, permite llevar el tráfico de una semana en particular a un promedio semanal del mes.

→ *Fm* = El Factor Mensual, permite llevar el tráfico de un mes, en un mes promedio en virtud que el tráfico tiene una variación entre mes y mes.

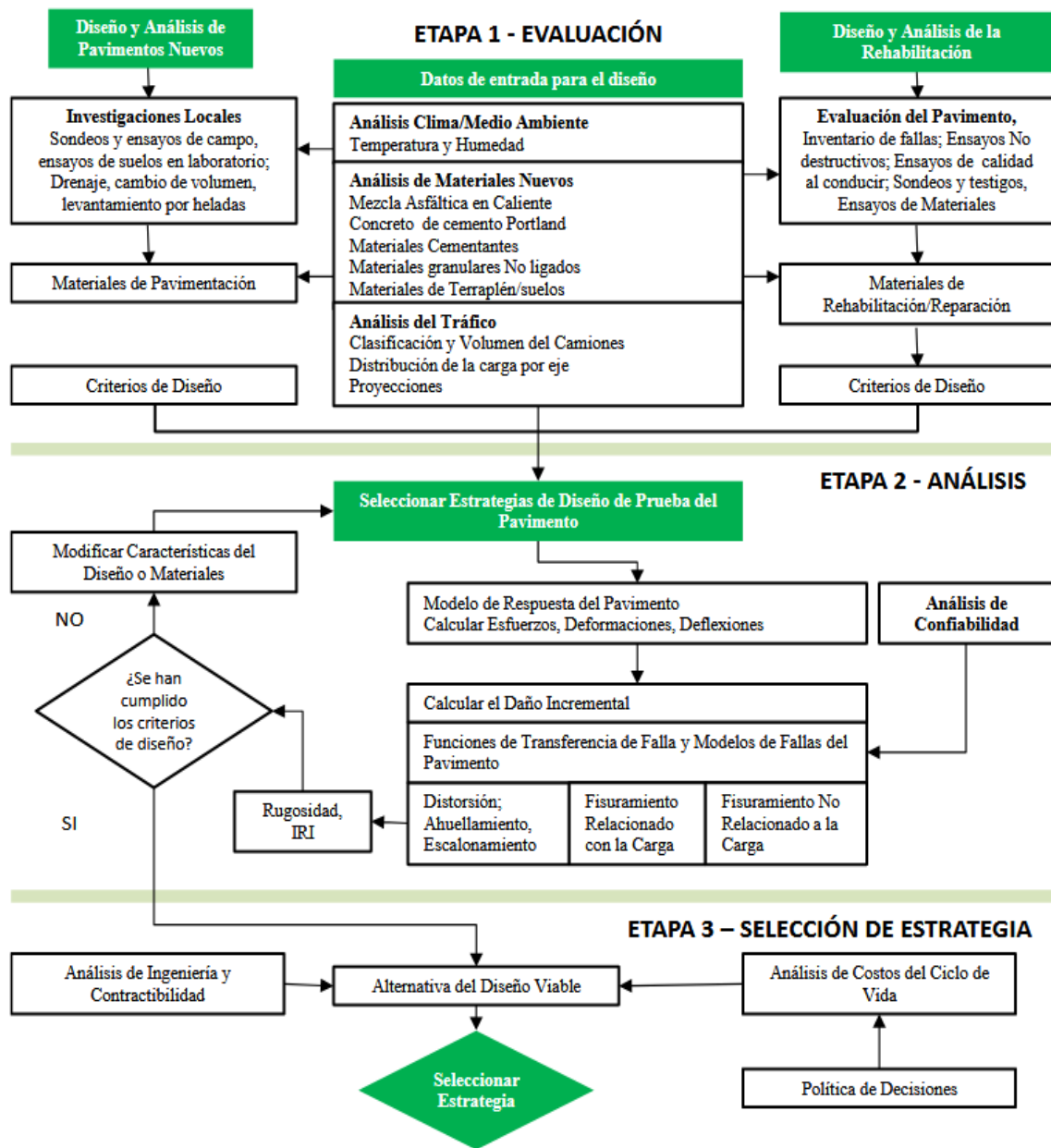
3.21 Método Empírico Mecanicista para el Diseño de Pavimentos

(EMPDG).

La Guía de diseño de pavimento empírico-mecanicista (MEPDG) tiene como objetivo general el proporcionar una potente herramienta para el análisis y diseño de pavimentos nuevos y rehabilitados con base en principios empíricos y mecanicistas (ME). El procedimiento de análisis y diseño calcula los factores de mayor influencia en un pavimento (tensiones, esfuerzos, deformaciones y deflexiones) para con estas respuestas determinar patologías que se presentan a lo largo de la vida útil de la estructura vial. El diagrama de flujo que se muestra en la Figura 41, indica el procedimiento empírico – mecanicista.

Figura 41

Diagrama de Flujo del Proceso de Diseño/Análisis en Etapas para el MEPDG



Fuente: Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG).

El análisis y diseño mediante el MEPDG constituye un cambio importante en el diseño de pavimentos. La diferencia fundamental entre la Guía AASHTO 1993 y el MEPDG es que el último tiene la facultad de predecir varios indicadores de desempeño y proporciona un vínculo directo entre los materiales, diseño, sistemas de gestión, tráfico, clima y el pavimento.

El MEPDG utiliza un diseño de pavimentos con un proceso iterativo donde los resultados de este procedimiento son deterioros del pavimento y no espesores de capa. El diseñador primero considera las condiciones del proyecto; es decir; clima, tráfico, cualidades de la subrasante y condiciones del pavimento existente. Al proponer un diseño de una rehabilitación o un nuevo pavimento el enfoque Empírico – Mecanicista optimiza el diseño y garantiza plenamente que los deterioros específicos serán limitados a valores inferiores a los criterios de falla dentro de la vida útil de un diseño de una estructura del pavimento.

El método empírico-mecanicista para el diseño de pavimentos ha existido durante décadas. La versión EMPDG 1.0 se envió en abril de 2007 a NCHRP, FHWA y AASHTO para su consideración adicional como un estándar provisional de AASHTO el cual utilizaremos para nuestro análisis de rehabilitación en el tramo en estudio.

3.21.1 Enfoque general de diseño del MEPDG

El enfoque general de diseño que se encuentra en el MEPDG consta de tres niveles o etapas principales y múltiples pasos a seguir, como se ve en la Figura 41.

La primera etapa determina todos los datos de entrada para el diseño de ensayo. En esta fase se identifican las estrategias a ser consideradas en la etapa de diseño siendo una clave fundamental el análisis de la base de cimentación. En pavimentos nuevos lo importante es la investigación de cimentación, la determinación del módulo resiliente de la subrasante, la evaluación de la contracción e hinchazón de los suelos de alta plasticidad, el comportamiento de los suelos por las heladas, deshielo y las condiciones de drenaje.

Para el análisis de rehabilitación se recomienda la evaluación del estado de la estructura del pavimento para identificar los diversos tipos de problemas que se presentan y las causas subyacentes. El procedimiento es cuantificar la resistencia de las capas utilizando las pruebas deflectométricas para el proceso en el retrocálculo. Sin embargo, el procedimiento incluye estudios del estado del pavimento, estudios de drenaje y datos de radar de penetración (GPR) para cuantificar las condiciones en el sitio. En esta etapa también se incluye la caracterización de materiales, clima y tráfico. Para la caracterización de los materiales lo más importante es el módulo elástico de cada capa mientras que para las capas de HMA sería el módulo dinámico.

La caracterización del tráfico se enfoca en estimar las distribuciones de aplicación de carga por ejes al pavimento. El programa MEPDG no se basa en ejes equivalentes de carga

(ESAL) y tampoco factores de equivalencia de carga. El MEPDG en realidad utiliza configuraciones especiales de ejes para su análisis además de cargas de ejes simple, tándem, tridem y cuádruple.

Otra condición importante que incluye el MEPDG es el efecto climático sobre los materiales utilizados en el pavimento, las respuestas y el deterioro de manera conjunta. Para estimar estos efectos se utiliza el Modelo Climático Integrado (ICM) el cual representa una herramienta de condiciones climáticas y es utilizada para modelar la humedad y temperatura dentro de las capas de la estructura del pavimento. El modelo climático considera datos ambientales cada hora donde se analizan estadísticas de temperatura, radiación solar, velocidad del viento, precipitaciones, cobertura de nubes y humedad relativa, etc. *Para este análisis se ha creado un archivo ICM del cantón Cuenca de la estación meteorológica de Nulti; los datos fueron proporcionados por el Instituto de Investigación Geológico y Energético.*

La etapa 2 determina el proceso de diseño de lo que sería el análisis estructural más las predicciones de indicadores de rendimiento y la selección de suavidad IRI (ver figura Figura 41). El análisis es iterativo y su comienzo es con la selección de un diseño de prueba inicial. Estos diseños de prueba iniciales son creados por el propio diseñador, obtenidos de un catálogo o de un diseño anterior. Los resultados producto del análisis incluyen propiedades de los materiales, el daño acumulativo, los deterioros y la suavidad (IRI) a lo largo del tiempo. Si el diseño propuesto no cumple con las exigencias o los criterios de diseño son superiores dentro del nivel de confiabilidad especificado se analiza y se realizan las modificaciones para ejecutar nuevamente hasta que se obtenga un resultado satisfactorio.

La etapa 3 incluye actividades para evaluar alternativas que sean estructuralmente viables las cuales incluyen un análisis de ingeniería y a su vez un análisis del costo del ciclo de vida de las alternativas.

La salida de datos del MEPDG son pronósticos de fallas y su regularidad IRI dentro de un nivel de confiabilidad asumido. Por lo tanto, no es un procedimiento directo de diseño de espesores de una estructura de pavimentos; más bien, el MEPDG es una herramienta de análisis para que los diseñadores la usen de una manera iterativa. El MEPDG Específicamente evalúa un diseño que combina tipos de capa, espesor de capas y características propias de diseño, para condiciones específicas del lugar, y criterios de falla para un nivel de confiabilidad asumido.

3.21.2 Indicadores de desempeño previstos por el MEPDG para HMA

En el programa MEPDG se incluyen funciones de transferencia y ecuaciones de regresión que son utilizadas para la predicción de varios indicadores de rendimiento (deterioros) los cuales son considerados de mucha importancia en programas de gestión de pavimentos. Los indicadores específicos de desempeño son calculados por el MEPDG y se calibraron con los datos extraídos de la base de datos de desempeño de pavimento a largo plazo (LTPP). Los indicadores específicos de desempeño para HMA calculados por el MEPDG son los siguientes:

- Profundidad total de ahuellamiento, ahuellamiento de la HMA, base agregada no ligada y de la subrasante.
- Agrietamiento transversal no relacionado con la carga.
- Grietas de cocodrilo relacionadas con la carga (grietas iniciadas desde el fondo).
- Grietas longitudinales relacionadas con la carga (grietas iniciadas en la superficie).
- Agrietamiento por deflexión en superposiciones de HMA, grietas y juntas en estructuras existentes flexibles, semirrígidas, pavimentos compuestos y rígidos.
- Regularidad (IRI).

3.21.3 Niveles jerárquicos de ingreso

Los niveles jerárquicos de ingreso que se incluyen en el MEPDG representan un proceso de entrada de datos que son utilizados para categorizar los conocimientos del diseñador sobre el parámetro que va a ser ingresado. Hay tres niveles de ingreso disponibles para la mayoría de los parámetros de materiales y tráfico. A continuación, se define cada nivel jerárquico que puede utilizar el diseñador:

- ➔ **Nivel de entrada 1** - El parámetro de entrada es medido de manera directa y es un parámetro específico del proyecto. En este nivel de entrada existe el mayor conocimiento sobre un proyecto específico, pero tiene costos altos de prueba y recopilación de información para determinar los valores de entrada. Este nivel se debe usar para diseños de pavimentos que tengan características propias del proyecto como materiales o condiciones de tráfico no comunes que estén fuera del rango para desarrollar las correlaciones y valores predeterminados incluidos en los Niveles de entrada 2 y 3.
- ➔ **Nivel de entrada 2** - El parámetro de entrada se determina por correlaciones o ecuaciones de regresión. Este parámetro de entrada se calcula a partir de otros datos o

parámetros específicos del sitio que tienen menos costos de medición. Este nivel también se puede representar con valores regionales que no son de un proyecto específico.

- ➔ **Nivel de entrada 3** - Este nivel se basa en valores predeterminados regionales o globales como un valor promedio de un grupo de datos con similares características. Este nivel 3 tiene el conocimiento menor sobre el parámetro de entrada para el proyecto específico. Este nivel tiene los costos más bajos de prueba y recopilación de información. En la Tabla 12, se presenta los niveles de entrada predominantes utilizados en el esfuerzo de calibración del MEPDG.

Tabla 12

Niveles de Entrada Para la Calibración del MEPDG

Input Group		Input Parameter	Recalibration Input Level Used
Truck Traffic		Axle-Load Distributions (Single, Tandem, Tridem)	Level 1
		Truck Volume Distribution	Level 1
		Lane and Directional Truck Distributions	Level 1
		Tire Pressure	Level 3
		Axle Configuration, Tire Spacing	Level 3
		Truck Wander	Level 3
Climate		Temperature, Wind Speed, Cloud Cover, Precipitation, Relative Humidity	Level 1 Weather Stations
Material Properties	Unbound Layers and Subgrade	Resilient Modulus—All Unbound Layers	Level 1; Backcalculation
		Classification and Volumetric Properties	Level 1
		Moisture-Density Relationships	Level 1
		Soil-Water Characteristic Relationships	Level 3
		Saturated Hydraulic Conductivity	Level 3
	HMA	HMA Dynamic Modulus	Level 3
		HMA Creep Compliance and Indirect Tensile Strength	Levels 1, 2, and 3
		Volumetric Properties	Level 1
		HMA Coefficient of Thermal Expansion	Level 3
	PCC	PCC Elastic Modulus	Level 1
		PCC Flexural Strength	Level 1
		PCC Indirect Tensile Strength (CRCP Only)	Level 2
		PCC Coefficient of Thermal Expansion	Level 1
All Materials		Unit Weight	Level 1
		Poisson's Ratio	Levels 1 and 3
		Other Thermal Properties; Conductivity, Heat Capacity, Surface Absorptivity	Level 3
Existing Pavement		Condition of Existing Layers	Levels 1 and 2

Fuente: Manual MEPDG 2008

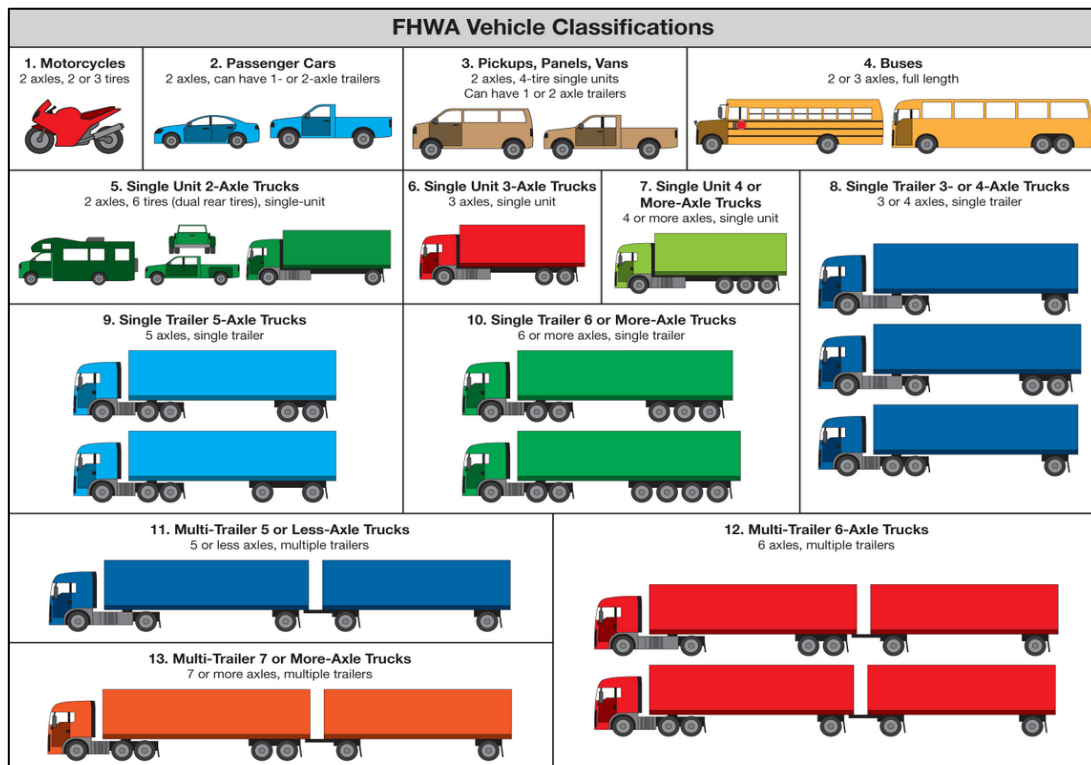
3.21.4 Términos de tráfico de camiones

Son datos estadísticos que sirven para caracterizar el tráfico dentro del programa. La determinación de estos factores es costosa y demanda tiempo en la obtención de datos precisos para agudizar los resultados en el MEPDG.

- ➔ **Espectros de carga por eje** - El espectro de carga es una distribución de cargas por eje o un histograma para un tipo de eje específico como eje ya sea simple, tándem, trídem y cuádruple. Dicho de otra manera, es el número de aplicaciones de eje dentro de un rango específico de carga por eje.
- ➔ **Factores de distribución por hora** – Es el porcentaje de camiones para cada hora del día. Los factores de distribución horaria deben sumar 100 por ciento.
- ➔ **Factores de distribución mensual** – Es la distribución de volúmenes de camiones mensualmente para un año típico. Los factores de distribución mensuales para una clase de camión específica deben sumar 12 como se usa en el MEPDG.
- ➔ **Espectros de carga por eje normalizados** - Es una distribución normalizada de cargas por eje para un eje específico. Para determinar este parámetro se suma el número de ejes de aplicaciones pesadas dentro de un rango de carga específico y se divide por el número total de ejes pesados. La suma acumulada de los valores incrementales en la distribución para un tipo de eje específico es 100 por ciento.
- ➔ **Clasificación de Distribución de camiones normalizada** - Es una distribución normalizada de los diferentes tipos de camiones dentro del flujo de tráfico. Para su determinación se suma el número de camiones dentro de una clasificación específica y se divide para el número total de camiones contados. La suma de todas las clasificaciones es igual al 100 por ciento.
- ➔ **Clasificación de Distribución de camiones** – Es la distribución del número de camiones para cada clasificación de camiones, para el total de camiones. Los camiones se definen como vehículos de la clase 4 a 13 utilizando las clasificaciones FHWA (FHWA, 2001), ver Figura 42.

Figura 42

Clasificación de Camiones FHWA 2001.



Fuente: FHWA.

- ➔ **Clasificación de tráfico de camiones (TTC, Truck Traffic Classification)** – Es un índice que define un conjunto de caminos con espectros de carga por eje normalizados y distribución de camiones normalizados. En otras palabras, la clasificación de tráfico de camiones (TTC) es un valor que define los espectros de carga por eje y la distribución del volumen de camiones a partir de los conteos.

3.21.5 Suavidad (Regularidad IRI)

La comodidad de los usuarios de carreteras se cuantifica por la regularidad de la calzada tanto para pavimentos rígidos como los flexibles. Las carreteras que se encuentran en mal estado generan incomodidad para los usuarios y mayores costos de operación del vehículo. El parámetro que es utilizado en el MEPDG para definir la suavidad del pavimento es el IRI. El MEPDG predice empíricamente y está en función de las fallas del pavimento, los factores de sitio de contracción/hinchamiento, de levantamiento de la cimentación por heladas y un valor del IRI inicial en el momento de la construcción. Los diversos tipos de deterioro que se utilizan

para la predicción del IRI están en función del tipo de pavimento que se está construyendo o rehabilitando. La suavidad calculada por el MEPDG tiene unidades de pulgadas por milla.

3.21.6 Indicadores de deterioro o desempeño: pavimentos HMA

- ➔ **Agrietamiento de cocodrilo** – Se inician en la parte inferior de la HMA; este agrietamiento está relacionado con la fatiga o por la carga de la rueda (eje dual, tándem, tridem, etc.). Está definida por una serie de grietas interconectadas (un patrón de alambre de gallinero o piel de cocodrilo). Las grietas de piel de cocodrilo se inician como múltiples grietas cortas, transversales o longitudinales en la misma trayectoria de la rueda y se interconectan lateralmente con la carga continua del tráfico de camiones. En el MEPDG este agrietamiento de piel de cocodrilo es calculado como un porcentaje del área total del carril.
- ➔ **Agrietamiento longitudinal** – Se inician en la parte superficial de la HMA; este agrietamiento está relacionado con la fatiga o por la carga de la rueda. Ocurren dentro de la trayectoria de la rueda y son grietas paralelas a la línea central del pavimento. Aparecen como grietas longitudinales cortas que se conectan por las cargas continuas del tráfico de camiones. Puede ocurrir desprendimientos o deterioro de grietas a lo largo de los bordes, pero no forman un patrón de grietas de piel de cocodrilo. En el MEPDG este agrietamiento longitudinal es calculado por el total de pies por milla (metros por kilómetro) e incluye la trayectoria de ambas ruedas.
- ➔ **Agrietamiento transversal** – No está relacionado con la carga de las ruedas, este agrietamiento es perpendicular a la línea central del pavimento y es causado por la disminución de temperatura o ciclos térmicos. En el MEPDG este agrietamiento transversal se calcula en pies por milla (metros por kilómetro).
- ➔ **Profundidad de baches o Ahuellamiento** – Es una depresión superficial paralela al eje en la trayectoria de las ruedas. Es un resultado de una deformación plástica o permanente en la estructura del pavimento. La profundidad del surco es la diferencia máxima entre la superficie de la HMA y la línea original del ancho de carril. El MEPDG calcula el ahuellamiento en pulgadas (en nuestro medio se mide en milímetros) la cual es la máxima profundidad media entre ambas trayectorias de las ruedas. El MEPDG

calcula profundidades de los surcos dentro de la HMA de las capas granulares no unidas y de la cimentación.

Los niveles de deterioros que se encuentran en la Tabla 13 son utilizados para calificar a la condición actual del pavimento flexible existente los cuales no están previstos por el MEPDG.

Tabla 13

Tipos de Deterioro y Niveles Recomendados para Evaluar la Situación Estructural Actual del Pavimento Flexible.

Distress Type	Highway Classification	Current Distress Level Regarded as:		
		Inadequate (Poor)	Marginal (Fair)	Adequate (Good)
Fatigue Cracking, percent of total lane area	Interstate, Freeway	>20	5 to 20	<5
	Primary	>45	10 to 45	<10
	Secondary	>45	10 to 45	<10
Longitudinal Cracking in Wheel Path, ft/mi	Interstate, Freeway	>1060	265 to 1060	<265
	Primary	>2650	530 to 2650	<530
	Secondary	>2650	530 to 2650	<530
Reflection Cracking, percent of total lane area.	Interstate, Freeway	>20	5 to 20	<5
	Primary	>45	10 to 45	>10
	Secondary	>45	10 to 45	<10
Transverse Cracking Length, ft/mi	Interstate, Freeway	>800	500 to 800	<500
	Primary	>1000	800 to 1000	<800
	Secondary	>1000	800 to 1000	<800
Rutting, mean depth, maximum between both wheel paths, in.	Interstate, Freeway	>0.45	0.25 to 0.45	<0.25
	Primary	>0.6	0.35 to 0.60	<0.35
	Secondary	>0.8	0.40 to 0.80	<0.4
Shoving, percent of wheel path area	Interstate, Freeway	>10	1 to 10	None
	Primary	>20	10 to 20	<10
	Secondary	>50	20 to 45	<20

Fuente: MEPDG 2008.

3.21.7 Vida de diseño

La vida de diseño útil de un pavimento nuevo o reconstruido es el tiempo desde su construcción inicial hasta que el pavimento se ha deteriorado estructuralmente a una condición de pavimento específica; en otras palabras, hasta que se necesita una rehabilitación o

reconstrucción significativa. La vida útil de diseño de una superposición o sobre carpeta es el tiempo desde que se coloca la superposición hasta que se necesita una rehabilitación o reconstrucción significativa. En el MEPDG permite ingresar vidas de diseño desde 1 año hasta más de 50 años. El uso de una vida de diseño de más de 50 años se define como un pavimento de larga duración.

El programa MEPDG no puede pronosticar deterioros superficiales como durabilidad y desintegración del material. Las fallas de desintegración limitarán la vida útil esperada de todos los pavimentos. Para la calibración global del programa se incluyeron pocos pavimentos que excedieron los 30 años de datos de desempeño. Por lo que, el diseñador debe transmitir la importancia de las especificaciones técnicas de materiales y procesos constructivos para períodos de diseño superiores a 30 años.

3.21.8 Criterios recomendados de rendimiento

Los diversos criterios de rendimiento son utilizados para garantizar que el pavimento funcionará muy satisfactoriamente durante la vida útil pronosticada en el diseño. El diseñador puede seleccionar valores límites para comprobar la idoneidad de un diseño. Estos valores límites pueden representar políticas de cierta agencia (por ejemplo, MTOP) con respecto a la condición de los pavimentos que se tengan que intervenir con una actividad de rehabilitación o reconstrucción considerable.

Estos criterios o valores límites son similares a la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO 1993 que utiliza los niveles del índice de *servicio inicial y terminal*. Los criterios de diseño específicos para determinar la falla e IRI se pueden determinar visualizando la condición del pavimento y el grado de seguridad requerido junto con las necesidades de mantenimiento, la capacidad para rehabilitar los pavimentos en condiciones dadas y que el nivel establecido cumpla con el nivel dado de confiabilidad.

Estos valores límites se pueden también determinar a partir de un análisis de la fuente datos de una gestión de pavimentos, por la consideración del usuario y por razones de seguridad. En un proyecto las consecuencias que exceda un criterio de desempeño o deterioro probablemente podrían requerir un mantenimiento o rehabilitación antes de lo esperado. La Tabla 14 proporciona valores para las consideraciones de las agencias de carreteras (USA).

Tabla 14

Criterios de Diseño o Valores Límites recomendados.

Pavement Type	Performance Criteria	Maximum Value at End of Design Life
HMA pavement and overlays	Alligator cracking (HMA bottom up cracking)	Interstate: 10% lane area Primary: 20% lane area Secondary: 35% lane area
	Rut depth (permanent deformation in wheel paths)	Interstate: 0.40 in. Primary: 0.50 in. Others (<45 mph): 0.65 in.
	Transverse cracking length (thermal cracks)	Interstate: 500 ft./mi Primary: 700 ft./mi Secondary: 700 ft./mi
	IRI (smoothness)	Interstate: 160 in./mi Primary: 200 in./mi Secondary: 200 in./mi
JPCP new, CPR, and overlays	Mean joint faulting	Interstate: 0.15 in. Primary: 0.20 in. Secondary: 0.25 in.
	Percent transverse slab cracking	Interstate: 10% Primary: 15% Secondary: 20%
	IRI (smoothness)	Interstate: 160 in./mi Primary: 200 in./mi Secondary: 200 in./mi

Fuente: MEPDG 2008

3.21.9 Confiabilidad

La confiabilidad está incorporada en el programa MEPDG de manera uniforme y consistente para todos los tipos de pavimento. Se puede especificar el nivel requerido de confiabilidad para cada tipo de deterioro y suavidad (IRI). El nivel de confiabilidad del diseño podría tener la consecuencia de alcanzar una condición de servicio terminal antes de alcanzar la vida útil del diseño. La confiabilidad del diseño ($R = \text{Reliability}$) es definida como la probabilidad ($P = \text{Probability}$) de que la falla pronosticada sea inferior que el nivel crítico durante el periodo de diseño.

$$R = P[\text{Falla en el Periodo de Diseño} < \text{Nivel de Falla Crítico}] \quad (41)$$

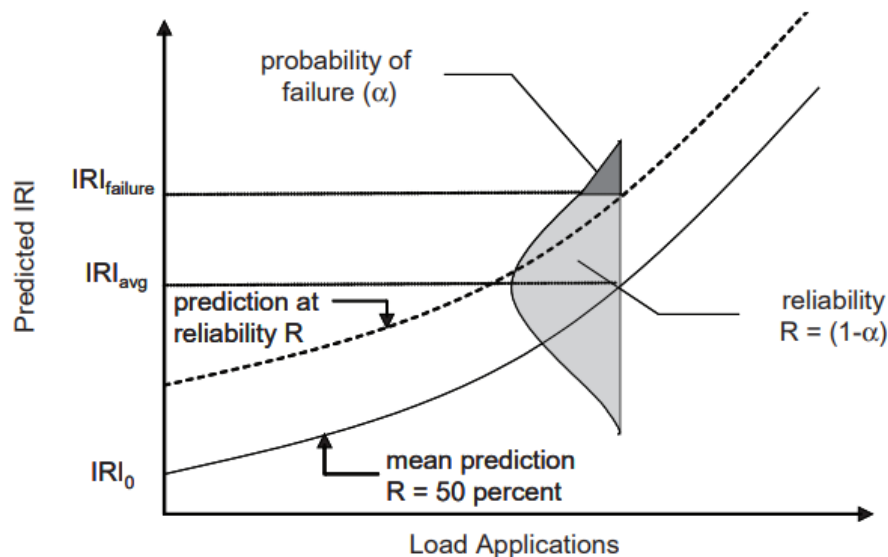
$$R = P[\text{IRI en el Periodo de Diseño} < \text{Nivel de IRI Crítico}] \quad (42)$$

El diseñador ingresa valores límites para cada tipo de falla e IRI previstos. El MEPDG predice los tipos medios de deterioro y la suavidad (IRI) durante la vida de diseño del pavimento como se observa en la línea continua de la Figura 43 para el IRI. Por lo tanto, los deterioros y la suavidad pronosticadas son valores medios que se deben considerar con un

grado de confiabilidad del 50 % al final del período de diseño; es decir, hay un 50 % de posibilidades de que los deterioros o el IRI pronosticados sean menores o mayores que la predicción media.

Figura 43

Concepto de Confiabilidad de Diseño para el IRI.



Fuente: MEPDG 2008.

En casi todos los proyectos se requerirá que la confiabilidad sea mayor al 50 % para que diseño cumpla con criterios de rendimientos durante el periodo de diseño. De tal manera, mientras más importante sea el proyecto vial en términos de consecuencias de falla mayor será la confiabilidad de diseño esperada.

La curva discontinua de la Figura 43 indica la predicción con un nivel de confiabilidad R (por ejemplo, 90 %). Para que el diseño sea al menos 90 % confiable la curva punteada no debe cruzar el IRI en los criterios de diseño durante todo el período de diseño; si esto ocurre, se debe modificar el diseño para mantenerse dentro del rango de confiabilidad.

La confiabilidad del diseño depende del error de predicción del modelo (error estándar). Por ejemplo, una confiabilidad del 75% usa un factor de 1,15 veces el error estándar mientras que una confiabilidad del 90% usa un factor de 1,64 veces y una confiabilidad del 95% usa un valor de 1,96 veces el error estándar. En la Tabla 15 se proporciona valores relacionados al tipo de carretera y se sugieren para su uso en el diseño.

Tabla 15

Valores de Confiabilidad de Diseño.

Clasificación Funcional	Nivel de confiabilidad	
	Urbano	Rural
Interestatal/Autopistas	95	95
Principales arterias	90	85
Colectoras	80	75
Local	75	70

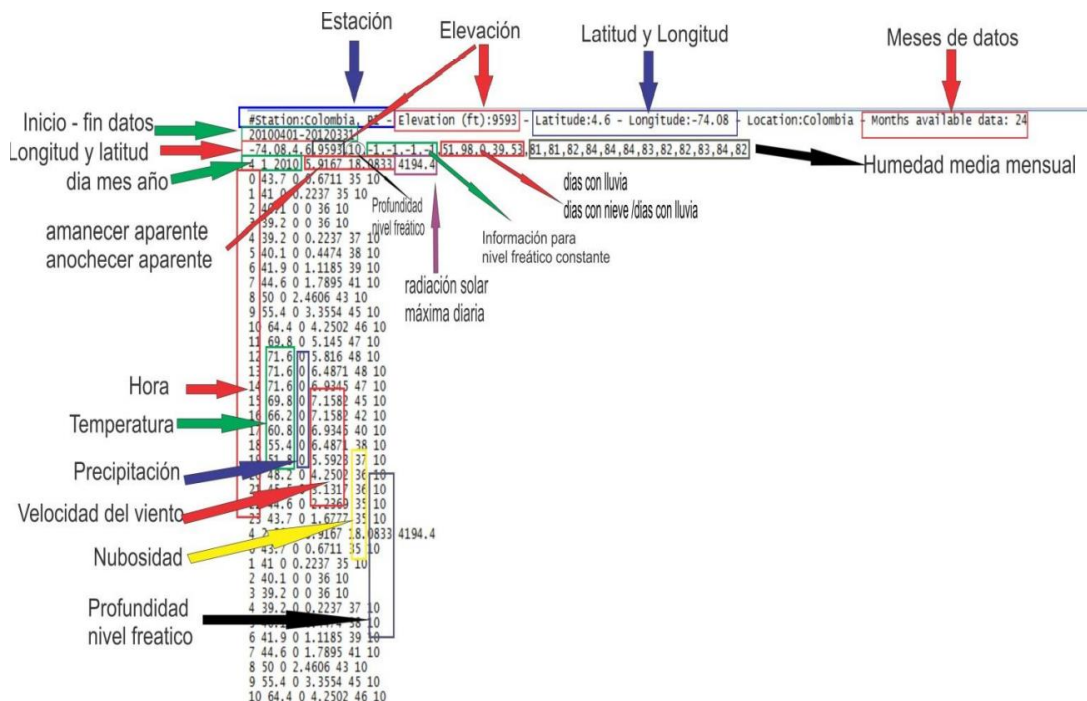
Fuente: MEPDG 2008.

3.21.10 Clima

Para predecir el deterioro del pavimento con el MEPDG se requiere de datos climáticos completos los cuales incluyen datos como precipitación por hora, temperatura, radiación solar, la velocidad del viento, la humedad relativa y la nubosidad. Estos datos son utilizados para predecir la temperatura junto con el contenido de humedad en cada una de las capas de la estructura del pavimento, así como también el parámetro del factor de sitio para los modelos de predicción de suavidad (IRI). Como se mencionó en la sección 3.21.1 se construyó un archivo climático ICM propio del cantón Cuenca de los años 2018, 2019 y 2020, a continuación, en la Figura 44 se presenta todos los datos climáticos que constituyen el archivo ICM.

Figura 44

Descripción de Datos del Archivo Climático



Fuente: Berenize garces 2011

Cesar Mauricio Balarezo Durán

3.21.11 Absorción de onda corta superficial

La absorción de onda corta de una capa superficial de hormigón hidráulico o asfalto depende de su composición, textura y color. Se correlaciona de manera directa con la cantidad de energía solar disponible absorbida por la superficie del pavimento. Las superficies más delgadas y reflectantes tienden a tener una absorción de onda corta más baja y las más densas y con retención son las más altas.

Para cada uno de los niveles de entrada jerárquicos, para estimar este parámetro se tiene las siguientes formas recomendadas:

- Nivel 1. En este primer nivel es recomendable que el parámetro sea estimado mediante pruebas de laboratorio.
- Nivel 2. No aplicable.
- Nivel 3. En este nivel según los materiales se pueden asumir valores predeterminados como sigue:
 - Asfalto degradado (gris) 0,80 – 0,90
 - Asfalto fresco (negro) 0,90 – 0,98
 - Capa PCC envejecida 0,70 – 0,90

Para nuestro caso de entrada es el nivel 1; pero, al no contar con estas pruebas se utilizaron valores predeterminados de 0.85.

3.21.12 Fricción de interfaz entre capas unidas

El parámetro de la fricción en el interfaz de las capas de la estructura del pavimento es un dato de entrada en el MEPDG, pero es muy difícil de medir. Para determinar si existen desprendimientos entre capas a lo largo del proyecto se puede recurrir a la extracción de núcleos o examinación visual. En el momento de extracción de muestras se pueden producir la separación de capas adyacentes o producir grietas por deslizamiento, esto puede ser producto de una baja fricción en la interfaz entre dos capas de la estructura del pavimento. El diseñador debe asumir que no hay unión cuando se producen estas separaciones o deslizamientos puesto que las capas deben permanecer en su lugar para no ser eliminadas o fresadas. A pesar de lo dicho, las calibraciones globales que se consideraron para pavimentos flexibles se ajustaron asumiendo que entre todas las capas existe una fricción total con un valor de entrada en el

MEPDG de fricción de interfaz de 1. Si los valores de fricción son inferiores a 1 aumentarán la formación de grietas y el ahuellamiento en las capas del pavimento. De esta manera, la fricción se considera para tan solo dos condiciones: totalmente vinculado con un valor de 1 o sin vínculo con un valor de 0. De esta manera no afecta de forma significativa la precisión de la respuesta.

Toda la información referente al ingreso de datos en el programa mecanicista fue obtenida de la Guía de diseño de Pavimento Empírico-Mecanicista, MEPDG 2008.

Capítulo 4

Diseño Metodológico

Los diversos avances relacionados al trabajo de titulación planteado y los equipos utilizados para levantamiento de información revelan que en nuestro país no se utilizan métodos modernos de análisis de pavimentos. Para el desarrollo de los objetivos planteados en este trabajo se ha considerado la estructura metodológica descrita a continuación.

Se realiza un análisis geomorfológico del tramo Cuenca – Guangarcucho incluyendo las zonas con posibles inestabilidades geológicas. Se detalla el proceso de toma de muestras deflectométricas realizadas con el equipo del MTOP para determinar secciones homogéneas obteniendo varios sub tramos de con diferentes deflexiones promedio. Con los datos deflectométricos se procede al cálculo inverso para obtener los módulos de la estructura del pavimento y con estos datos se puede calcular el número estructural efectivo del pavimento. Se analizan los datos de laboratorio obtenidos de estudios anteriores de la vía Cuenca – Azogues. Con datos deflectométricos y laboratorio se plantean posibles correlaciones de módulos resilientes retrocalculados (M_{RR}). Y para finalizar, se describe todo el proceso de ingreso de datos en el programa empírico – mecanicista MEPDG de la AASHTO 2008 para la propuesta de rehabilitación.

4.1 Aspectos Geomorfológicos

4.1.1 Ubicación

La autopista Cuenca-Azogues-Biblián es un corredor arterial la cual está dentro de la red vial estatal perteneciente a la troncal de la sierra **E-35**. El tramo en estudio Cuenca – Guangarcucho está ubicado dentro de dicha autopista en la zona centro – sur del país en la provincia del Azuay (Figura 45). En un extremo limita con la provincia del Cañar y específicamente conecta las ciudades de Cuenca y Azogues; además, permite la conexión con cantones de las provincias de Azuay y Cañar. El tramo vial está en jurisdicción de la Subsecretaría Zonal 6 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas. La geografía se caracteriza por irregularidades en su topografía y geología que han condicionado su trazo geométrico; además, permite observar su riqueza paisajística con visuales en todo su recorrido. El tramo Salado – Guangarcucho conecta parroquias urbanas y rurales del cantón Cuenca generando en su trazado conflictos en intersecciones que se complican por el volumen de tráfico especialmente en horas pico.

Figura 45

Ubicación, Tramo Cuenca-Guangarcucho



4.1.2 Clima.

El tipo de clima pertenece a un valle templado interandino con elevaciones que van desde los 2200 hasta los 2800 msnm. Las precipitaciones características son de dos tipos (ver figura 46); es decir, que se definen dos estaciones lluviosas en el año siendo entre los meses de febrero a mayo donde se presentan mayores precipitaciones y la segunda esta entre octubre y noviembre. Para lo que queda del año por lo general es clima es seco (templado). Dentro del área de análisis climático se encuentra la ciudad de Cuenca que en general tiene un espectro Ecuatorial Mesotermico Semi – Húmedo con una temperatura media anual de 12.4 °C.

Figura 46

Temperatura, Precipitaciones y Humedad en la Provincia del Azuay

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	13	13.1	13	12.8	12.5	11.3	10.9	11.1	12.2	13	13.5	13.1
Temperatura min. (°C)	10.1	10.3	10.2	10	9.6	8.5	7.9	7.6	8.3	9.5	10.1	10.1
Temperatura máx. (°C)	16.7	16.8	16.6	16.4	16	14.9	14.6	15.3	16.6	17.2	17.6	16.9
Precipitación (mm)	158	184	190	166	110	89	84	63	69	138	181	180
Humedad(%)	85%	86%	86%	86%	86%	87%	86%	83%	79%	82%	82%	85%
Días Lluviosos (días)	18	18	20	20	18	15	14	11	12	17	17	18

Fuente: Ministerio de Agricultura

Cesar Mauricio Balarezo Durán

4.1.3 Suelo.

El Suelo presenta gran variedad de materiales que van desde desperdicios formados en rellenos, areniscas parcialmente cementadas hasta lutitas suaves. Quedan excluidas de la definición las rocas sanas, ígneas o metamórficas y los depósitos sedimentarios altamente cementados que no se desintegren rápidamente por acción de la intemperie. Con certeza se dice que es un conjunto con organización definida y propiedades que varían "vectorialmente". El agua contenida juega un papel tan fundamental en el comportamiento mecánico del suelo que debe considerarse como parte integral del mismo. (Juárez Badillo/Rico Rodríguez, 2005)

El tramo vial en estudio está sobre la región interandina que se define por un conjunto morfológico montañoso que corresponde a la cordillera occidental la cual está dentro de la cordillera de los Andes con altitudes dentro de 2200 y 2800 msnm. En su gran porcentaje existen superficies y relieves irregulares, escarpados y montañosos con un ambiente climático muy variable. La cuenca sedimentaria de la ciudad de Cuenca se dio en un periodo de inundación marina junto a la cordillera Real; esta sedimentación se inició con conglomerados aluviales, luego sedimentos finos, arcillas rojas alternadas con arenas finas y microconglomeráticas (Steinmann, 1997). Todos estos materiales se pueden encontrar a lo largo del tramo vial en análisis.

4.1.4 Geológicos.

La cordillera de los Andes o arco volcánico conformada por dos cordilleras paralelas conocidas como la Occidental y la Real confinan estrechos valles o depresión interandina a lo largo de la cual se extienden cuencas intramontañosas como es el caso de la ciudad de Cuenca dentro de la cual con una orientación general N 40° E se encuentra el tramo vial en análisis. Esta cuenca intramontañosa está constituida por rocas volcánicas de grandes espesores (formación Turi y formación Magan) y sedimentarias (formación Azogues, formación Loyola y formación Biblian) con edades entre el terciario y cuaternario. La información geológica se encuentra presente en los mapas geológicos CT-NV-F, hoja 53 perteneciente a Cuenca y CT-ÑV-E, hoja 73 perteneciente a Azogues como se indica en la Figura 47.

En el mapa geológico de Cuenca el tramo vial atraviesa la **Formación Turi** que está dentro de un periodo Cuaternario de la época del Pleistoceno con profundidad de 200 m que contiene material característico conglomerado que básicamente es de origen volcánico y areniscas con cierto contenido de bloques angulares.

También atraviesa la **formación Mangan** que pertenece al grupo Ayancay que está dentro del periodo Terciario de la época del Mioceno con una profundidad de 2200 m con materiales como arcilla, conglomerado y areniscas de grano fino.

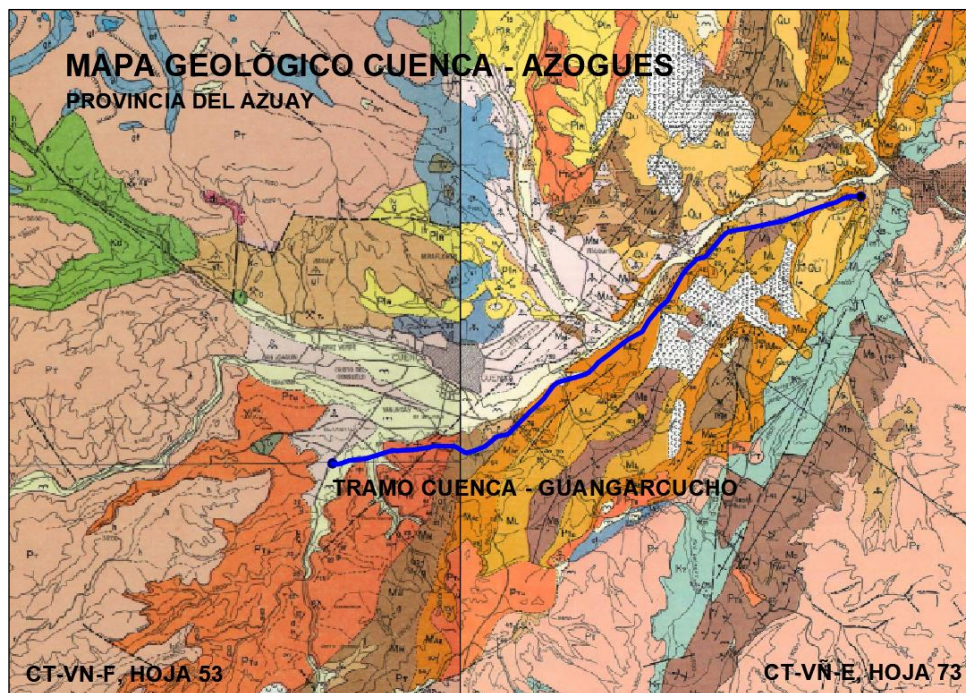
En el mapa geológico de Azogues la vía atraviesa por la **Formación Azogues** que pertenece al grupo que del periodo Terciario de la época del Mioceno con una profundidad máxima de 280 m; esta formación consta de areniscas tobaceas, arcilla de 1 metro de espesor y un conglomerado basal.

También atraviesa la **Formación Loyola** perteneciente al grupo Azogues que está dentro del periodo Terciario de la época del Mioceno con profundidad de 360 m y cuyo material es en su mayoría un conglomerado basal.

Atraviesa también la **Formación Biblian** que está dentro del periodo Terciario de la época del Mioceno con profundidad de 1000 m y presenta un material conformado por piroclásticos y lavas andesíticas.

Figura 47

Mapa Geológico Cuenca – Azogues



Fuente: Instituto de Investigación Geológico y Energético

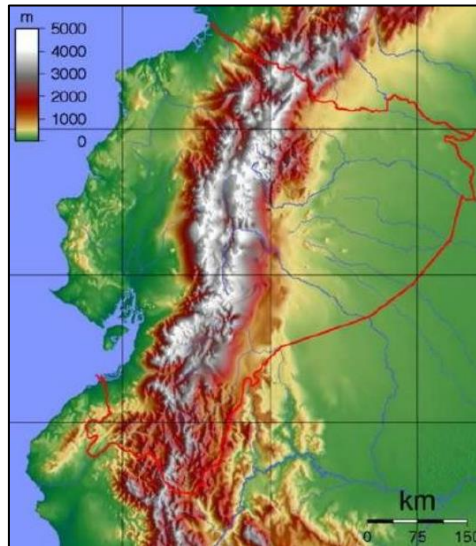
4.1.5 Aspectos Topográficos.

La cordillera de los Andes atraviesa a nuestro país en toda su longitud; es la cordillera continental más grande de la tierra con elevaciones y depresiones entre los 2500 msnm. La topografía (ver Figura 48) es característica de las zonas del Altiplano, el tramo El Salado -

Guangarcucho es paralelo a los ríos que atraviesan la ciudad de Cuenca y por esta razón está sobre depósitos aluviales (material por arrastre de ríos). Hacia el otro lado se encuentra con una cadena montañosa con depósitos coluviales (alteración y desprendimiento de los macizos rocosos) por lo se puede definir a la zona de proyecto como topográficamente homogénea.

Figura 48

Mapa Topográfico, Cordillera de los Andes



Fuente: Piterest

4.2 Deflectometría

Para una rehabilitación vial son necesarios los datos de las respuestas de pavimento; por lo dicho anteriormente las pruebas defletométricas son más confiables que las pruebas realizadas en laboratorio. El tema económico juega un rol importante puesto que proceder a la toma de deflexiones se necesita una inversión inicial considerable. Para nuestro estudio el MTOP aportó con los equipos necesarios para la toma de datos deflectométricos.

Para la toma de deflexiones se utilizó un deflectómetro de carga dinámica de marca PRIMAX tipo remolque; la fecha en la cual se realizó la toma de muestras fue el 9 de diciembre del 2020 cumpliendo con la normativa ASTM D 4695-03 y ASTM D 4694-96. Los intervalos de prueba se tomaron cada 200 metros por estar a nivel de proyecto y se utilizó un plato de carga de 300 mm para un tiempo de pulsación dentro de los 30 milisegundos (20-60 milisegundos) con un tiempo de duración de subida (10-30 milisegundos) siendo el error entre pruebas inferior al 3%. Se realizaron dos golpes (caídas) por cada abscisa y en ningún caso el error fue del superior al 3%; por lo tanto, para nuestro análisis se utilizó el segundo valor.

En este estudio y en la mayoría de las pruebas de pavimento de carreteras se usa un nivel de carga nominal de 40 KN (9,000 lb.). Los valores aplicados de carga son aproximados

a los 40 KN; por esta razón este valor se tiene que normalizar. Todas las deflexiones medidas son afectadas por esta normalización por lo que se consigue con la siguiente ecuación:

$$d_{normalizada} = \frac{d_i * carga\ normalizada}{carga\ aplicada} \quad (43)$$

Donde:

$d_{normalizada}$ = deflexión normalizada a 40 KN.

d_i = deflexión medida.

El FWD utilizado se constituye de una regleta con varios sensores sísmicos, los cuales 8 trabajaron para la toma de deflexiones a distancias de radiales de 0 cm, 20 cm, 30 cm, 60 cm, 90 cm, 120 cm, 150 cm y 180 cm.

El equipo registra temperaturas de manera automática, pero se realizan comprobaciones en la estructura del pavimento cada hora realizando una perforación en la superficie de la carpeta asfáltica e introduciendo un termómetro en el agujero y llenándolo de agua para estabilizar la temperatura en el cuerpo de la carpeta. La temperatura sirve para ajustar el módulo de la carpeta asfáltica a temperatura de 21 °C (70 °F).

El FWD tiene que someterse a calibraciones anuales y chequeos de mantenimiento eventuales. Al momento de la toma de datos el equipo se encontraba en condiciones óptimas. En la Tabla 16 se indican los datos generales de cada punto de muestra. En la Tabla 17 se indican las deflexiones a distintas distancias radiales, carga, temperatura y tiempo de pulso (carga dinámica).

Tabla 16

Datos de generales de cada muestra

DATOS GENERALES DE LA MUESTRA	
Chainage [m].....	810
Lane.....	1/R
Pavement description...	Asphalt
Remarks.....	Cuenca - Guangarcucho
Position of Drop:	Longitude: 79°1'58.2300"W Latitude: 2°55'25.1520"S Altitude: 2565.6 m
No. of drops: 2	2
Fallheight: 20	20
Time: 10:27	10:27

Fuente: FWD Primax

Tabla 17

Deflexiones medidas.

DEFLEXIONES, CARGA, TEMPERATURA Y TIEMPO DE PULSO

Drop	D(1)	D(2)	D(3)	D(4)	D(5)	D(6)	D(7)	D(8)	KPa	KN	Air	Sur.	Man.	Pulse time
1	85.3	76.9	72.0	59.3	41.0	35.0	26.7	22.9	546	38.61	21.8	30.7	28.4	28.00
2	85.6	77.2	72.0	59.3	41.2	35.2	26.9	22.9	548	38.77	21.7	30.0	28.4	27.75

Fuente: FWD Primax

Las muestras fueron tomadas en el carril externo en la huella adyacente a la vereda. Todos los datos deflectométricos fueron tomados sobre una estructura del pavimento visualmente sana (sin grietas, hundimientos o baches). Los sensores también se asentaron firme y ordenadamente sobre la superficie del asfalto sin ningún impedimento de apoyo.

Todos los datos deflectométricos se consiguieron tomar un solo día y en la calzada sentido oeste - este y viceversa. En ninguna calzada fueron necesarios recolectar datos adicionales, visualmente no se evidencio la necesidad de disminuir el intervalo de prueba por posibles inestabilidades dentro de la vía.

En la Figura 49 se ilustra el proceso de toma de datos con FWD Primax y la comprobación de temperatura en la calzada.

Figura 49

Recolección de datos con el FWD



4.3 Secciones Homogéneas

Cuando se obtienen secciones homogéneas se manejan datos similares dentro de un rango determinado. Para el inicio de la obtención de secciones con características semejantes se realiza un barrido estadístico para determinar valores atípicos de la calzada derecha e izquierda del tramo El Salado – Guangarcucho. Para lo cual se utiliza el método de caja y bigotes que permite mostrar visualmente y convenientemente grupos de datos numéricos a través de sus cuartiles. Las líneas que se extienden desde las cajas se conocen como bigotes y son usados para indicar la variabilidad fuera de los cuartiles centrales. Este procedimiento estadístico se aplica a los datos deflectométricos D_0 ; es decir, los de mayor deflexión para las dos calzadas. Para la derecha se presentan 6 datos que están fuera del cuartil superior y para la izquierda 2 (ver Figura 50 y Figura 51). Estos datos por tener su dispersión fuera del alcance de los bigotes (atípicos) son separados mientras que con los datos restantes se realiza el análisis para desarrollar secciones homogéneas.

Figura 50

Valores Atípicos Calzada Derecha

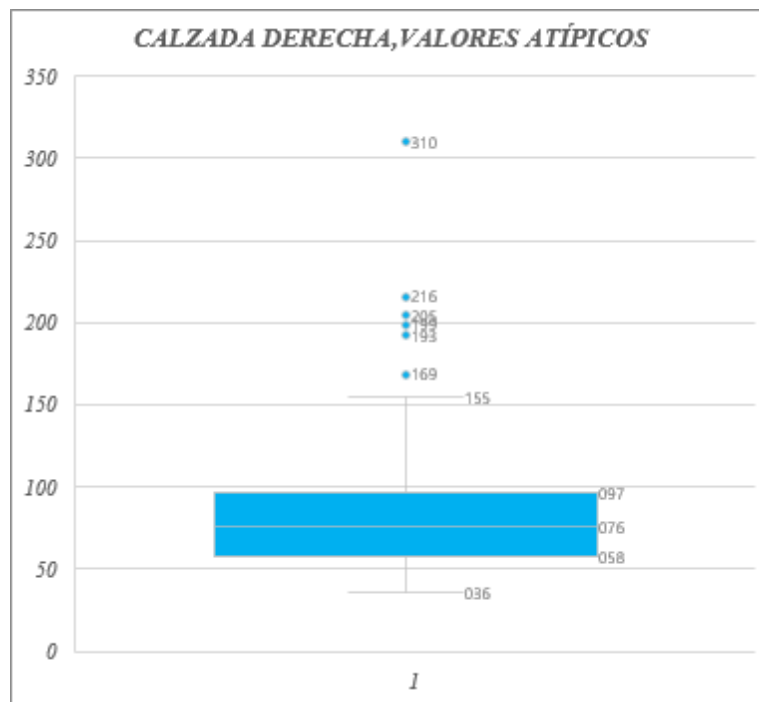
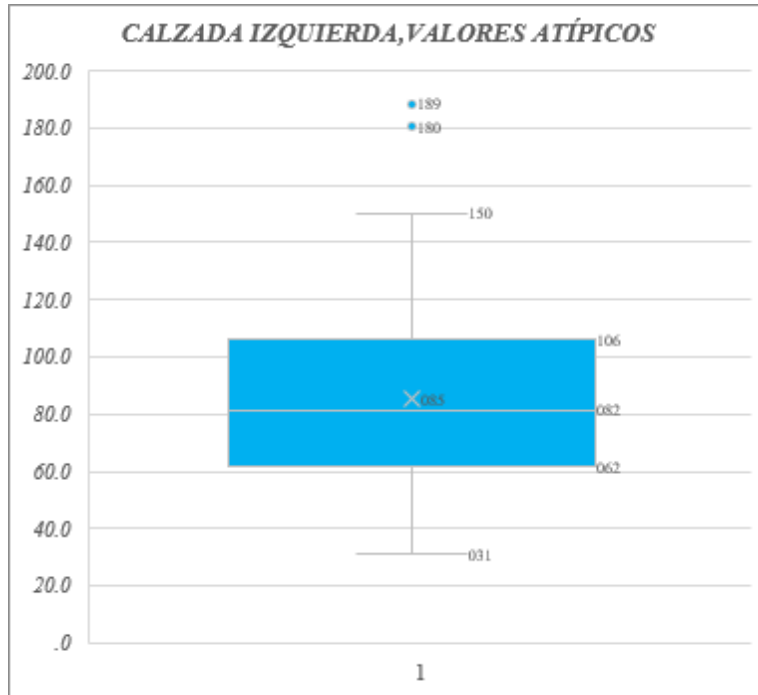


Figura 51

Valores Atípicos Calzada Izquierda



Luego de esta depuración se ejecutó el procedimiento descrito en la sección 3.10 y con un criterio acertado se obtuvieron secciones homogéneas lo más extensas posibles. Para cada sección determinamos un promedio y su desviación estándar; luego, con estos datos encontramos el coeficiente de variación que representa la relación entre la desviación estándar y el promedio expresado en porcentaje para un ajuste aceptable recordando que este coeficiente tiene que ser inferior a 30%. Por último, se calcula la deflexión característica que es igual al Promedio + 1.65 x la desviación estándar. La deflexión característica se utilizará en futuros cálculos ya que garantiza que el 90% de las deflexiones están dentro de este grupo característico y tan solo el 10% están fuera del él.

4.4 Proceso de Retrocálculo

Como se mencionó anteriormente en la actualidad hay una amplia variedad de programas que realizan el cálculo inverso con distintos planteamientos matemáticos para determinar los módulos elásticos, resiliente y respuestas en el pavimento. *Para el análisis de retrocálculo utilizaremos 4 métodos* con la finalidad de correlacionarlos y obtener los mejores resultados que representen las cualidades de los materiales que están en la estructura del pavimento del tramo vial. Utilizamos el método de la AASHTO y YONAPAVE para el cálculo del módulo de resiliente de la subrasante sabiendo que estos métodos tienen formulación

matemática directa como se explicó con anterioridad y para los cuales se utiliza hojas de cálculo en Excel. Se utiliza también programas avanzados como el EVERCALC y ELLEA1 que tienen un sistema de iteraciones de cálculo para llegar a obtener los módulos elásticos.

Se conformaron secciones homogéneas realizando un análisis de valores atípicos tomando en cuenta solo las deflexiones máximas. Antes de ejecutar el proceso de retrocálculo nos basamos en la sección 3.7 para determinar valores atípicos de cada sección y procesarlos sin que se presenten errores en los métodos de retrocálculo.

4.4.1 Estructura Vial

La estructura vial existente es típica para autopistas con gran volumen de tráfico que contempla espesores de capas asfálticas y granulométricas. La empresa que se encargó de realizar la última rehabilitación fue la constructora Hidalgo e Hidalgo (H e H).

Se realizaron perforaciones en el tramo El Salado – Guangarcucho bajo la responsabilidad de la consultora Caminosca & Promanvial en el año 2010 donde se constataron espesores promedio del paquete del diseño estructural de pavimentos realizado por ASTEC hace más de 20 años. Los espesores promedio de la capa de rodadura son 16 cm, superior a 15 cm que es el espesor de diseño donde se tiene una base asfáltica entre 10 cm y 15 cm, una capa granular de subbase con promedio de 30 cm superior al promedio de diseño de 26 cm (valores entre 15 cm y 40 cm), las capas granulares de mejoramiento se encuentran con un espesor promedio de 47 cm, versus 53 cm de espesor promedio de diseño (valores entre 10 cm y 110 cm). (MTOC Caminosca & Promanvial 2010).

Figura 52

Estratigrafía de perforación El Salado – Guangarcucho.

ELEVACIÓN (m)	PROFUNDIDAD (m)	MUESTRAS	ESTRATIGRAFÍA	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	REFERENCIA FOTOGRÁFICA
	0,15			Carpeta asfáltica	
	0,13			Base asfáltica	
	0,55			Subbase triturada	
	0,75			Gravas en matriz de arena limosa color café habana húmeda.	
	1,10			Bloques de piedras de hasta 0,20m.	
	1,50			Arena arcillosa de plasticidad media, medianamente color café habano con tintes amarillentos húmedo	

Fuente: MTOC Caminosca & Promanvial 2010

Cesar Mauricio Balarezo Durán

Página | 114

La asociación Caminosca & Promanvial contratada por el ministerio de transporte y obras públicas realiza el diseño del tramo El Salado – Guangarcucho donde analiza dos posibilidades de diseño de pavimentos en concreto Asfáltico y concreto Rígido y recomiendan firmemente optar por la alternativa de pavimento de concreto flexible mencionando que no hay que olvidar que la estructura cuenta con un espesor importante de concreto asfáltico (Base estabilizada con asfalto + Capa de rodadura asfáltica) de entre 25 cm y 30 cm; también, una subbase triturada clase I de buena calidad de 25 cm y espesores de capas de mejoramiento que sobrepasan los 50 cm de espesor.

Para determinar los espesores de refuerzo la consultora utiliza El Método del Instituto del Asfalto que se basa en el criterio de la deflexión admisible que permite establecer el espesor de refuerzo requerido de acuerdo a la deflexión característica medida a lo largo del tramo. Los espesores de refuerzo para el tramo El Salado – Guangarcucho son los siguientes:

Tabla 18

Espesores de Reforzamiento para el Tramo El Salado – Guangarcucho.

Calzada	Tramo	Abscisas (km)		Espesor de Diseño (mm), 20 años
		Desde	Hasta	
Derecha	El Salado - Gapal	0+000	5+200	169
	Gapal - Guangarcucho	5+200	20+800	83
Izquierda	Gapal - El Salado	0+000	3+050	141
		3+050	4+450	177
		4+450	5+200	102
	Guangarcucho - Gapal	5+200	8+800	96
		8+800	11+100	150
		11+100	12+450	62
		12+450	17+650	125
17+650	20+800	107		

Fuente: MTOP Caminosca & Promanvial 2010.

En el año 2013 el MTOP adjudica a la Constructora Hidalgo & Hidalgo la construcción de los trabajos de rehabilitación de la vía Cuenca – Azogues, la constructora cumple con los espesores de diseño previo el escarificado de la carpeta actual en 5 cm de profundidad. De los datos de calicatas, diseño anterior y capa de refuerzo se tiene una capa asfáltica que sería la suma del espesor de refuerzo (ver Tabla 18), más 15 cm de carpeta asfáltica y más 10 cm de base asfáltica menos 5 cm de escarificado; luego, el espesor de 26 cm de subbase y por último el espesor de 47 cm de mejoramiento como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 19

Espesores de Estructura de Pavimento, Tramo El Salado – Guangarcucho.

Calzada	Tramo	Abcisas (km)		Nueva Capa Asfáltica (cm)	Subbase Granular (cm)	Capa de Mejoramiento (cm)	Total Estructura de Pavimento (cm)
		Desde	Hasta				
Derecha	El Salado - Gapal	0+000	5+200	37	26	47	110
	Gapal - Guangarcucho	5+200	20+800	28	26	47	101
Izquierda	Gapal - El Salado	0+000	3+050	34	26	47	107
		3+050	4+450	38	26	47	111
		4+450	5+200	30	26	47	103
	Guangarcucho - Gapal	5+200	8+800	30	26	47	103
		8+800	11+100	35	26	47	108
		11+100	12+450	26	26	47	99
		12+450	17+650	33	26	47	106
		17+650	20+800	31	26	47	104

Fuente: MTOP Caminosca & Promanvial 2010.

4.4.2 Método de la AASHTO

Se encuentra detallado en la sección 3.17.1 producido en 1993 por la AASHTO y es un método tradicional que utiliza el modelo de Boussinesq para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante. Para su desarrollo se necesita la carga aplicada por el ensayo deflectométrico, la relación de Poisson, la deflexión medida y la distancia radial. Para la aplicación de cualquier método de retrocálculo la carga aplicada en el ensayo deflectométrico tiene que estar normalizada para 40 KN con la ecuación 43 descrita anteriormente. Se Calcula el M_{rr} , luego se obtiene el módulo elástico de toda la estructura (E_p) con el cual se puede calcular la distancia radial al bulbo de tensiones (a_e). Con la obtención de todos los parámetros mencionados anteriormente se puede comprobar que la distancia radial del sensor utilizado sea mayor a al 70 % de la distancia radial al bulbo de presiones (a_e).

Con la obtención de los datos anteriores y comprobaciones podemos obtener el número estructural efectivo (S_{Nef}) del pavimento.

4.4.3 Método YONAPAVE

Este método calcula directamente el módulo resiliente de la subrasante donde el primer paso es calcular el área del cuenco de deflexiones usando las deflexiones que se encuentren en las distancias radiales de 0 cm, 30 cm, 60 cm y 90 cm.

Se determina la longitud característica que está en función del área y de los coeficientes de la Tabla 7 que son valores de acuerdo al rango de valores del área. Seguido se calcula el módulo resiliente el cual está en función de la presión aplicada (ya normalizada), la deflexión bajo esta carga (0 cm), la longitud característica y los coeficientes de la Tabla 7. Al final se

calcula el número estructural (S_{Nef}) para el cual necesitamos la longitud característica y el módulo resiliente.

4.4.4 Método EVERCALC

Evercalc es un programa fácil de manejar, la versión utilizada es del año 2001; por esta razón, para utilizarlo se tuvo que instalar un emulador (Oracle VM VirtualBox) con el cual se puede trabajar con Windows XP que es el sistema operativo que acepta Evercalc para su funcionamiento.

Se realizó el análisis del retrocálculo de las dos calzadas de 21 km del tramo El Salado – Guangarcucho. Para este fin, Evercalc tiene dos escenarios donde el primero es el ingreso de datos generales y el segundo es el ingreso de las deflexiones tomadas.

Para el ingreso de datos generales se crea un archivo que identifique el proyecto con su extensión (GEN); en él se ingresa la descripción o título, el número de capas, número de sensores, radio del plato de carga, unidades, capa rígida, corrección por temperatura, medición de temperatura, módulos semilla, factor de peso del sensor, distancia radial de sensores, información de capas, coeficiente de Poisson, módulo inicial, módulo mínimo, módulo máximo, número de iteraciones, tolerancia del error cuadrático, tolerancia de diferencia de módulos, y localización de esfuerzos y tensiones. En la Figura 53 se indica la ventana de ingreso de datos generales.

Figura 53

Datos Generales, Programa Evercalc.

No	Layer ID	Poisson' Ratio	Initial Modulus (MPa)	Min. Modulus (MPa)	Max. Modulus (MPa)
1	0	0.35	3000.0	0.0	0.0

Fuente: Programa Evercalc

En la Tabla 20 se presenta los datos utilizados para modelar en el programa y son los siguientes:

Tabla 20

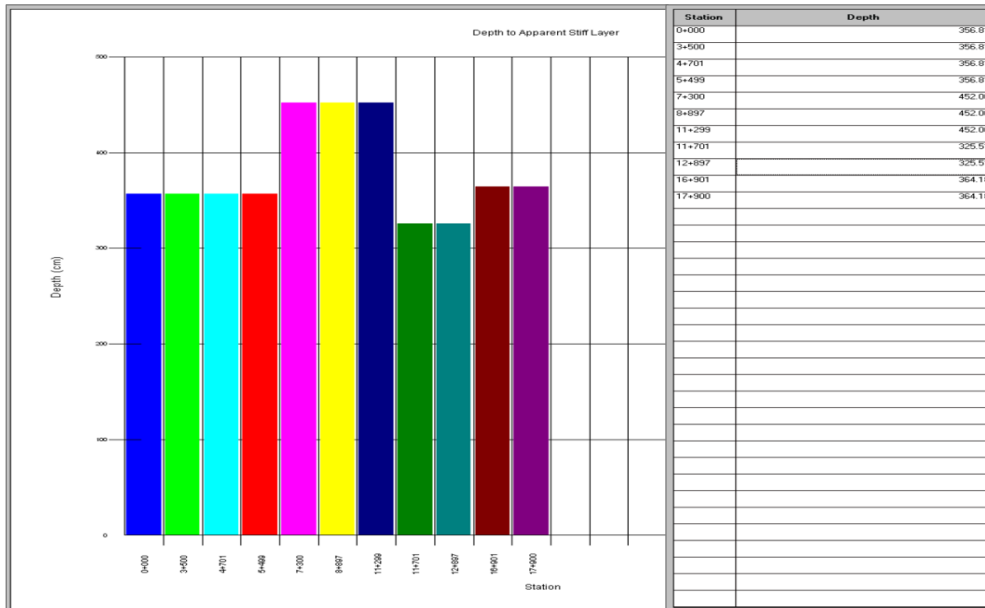
Ingreso de Datos Generales, para EVERCALC.

DESCRIPCIÓN DE DATOS	INGRESO
Numero de Capas	4
Numero de sensores	8
Radio del palto de carga	15 cm
Unidades	Métricas
Capa Rígida	Aplica
Corrección por temperatura	No Aplica
Módulos Semilla	Usuario
Factor de peso de sensor	Uniforme
Distancia radial de sensores	De 0 a 180 cm
Concreto Asfáltico	
Coefficiente de Poisson	0,30
Modulo Inicial	2000 MPa
Módulo mínimo	libre
Módulo máximo	libre
Capa Granular	
Coefficiente de Poisson	0,35
Modulo Inicial	400 MPa
Módulo mínimo	libre
Modulo máximo	libre
Capa Subrasante	
Coefficiente de Poisson	0,40
Modulo Inicial	100 MPa
Modulo mínimo	libre
Módulo máximo	libre
Capa Rígida	
Coefficiente de Poisson	0,30
Modulo Fijo	400 MPa
Iteraciones Máximas	20
Tolerancia RMS	2%
Tolerancia de Módulos	2%

Se realizó el análisis con 4 capas. En el manual del usuario recomienda realizar el retrocálculo con 3 capas y con un máximo de 4 para disminuir el error en los resultados. Se fusionaron las capas granulares como son de mejoramiento y subbase quedando la estructura de asfalto con el espesor de carpeta asfáltica (variable), espesor de capa granular (73 cm), capa de subrasante (finita) y capa rígida. El programa Evercalc calcula la capa rígida en cada punto de deflexiones como se indica en la Figura 54.

Figura 54

Profundidad de Capa Rígida (cm)



Fuente: Programa Evercalc.

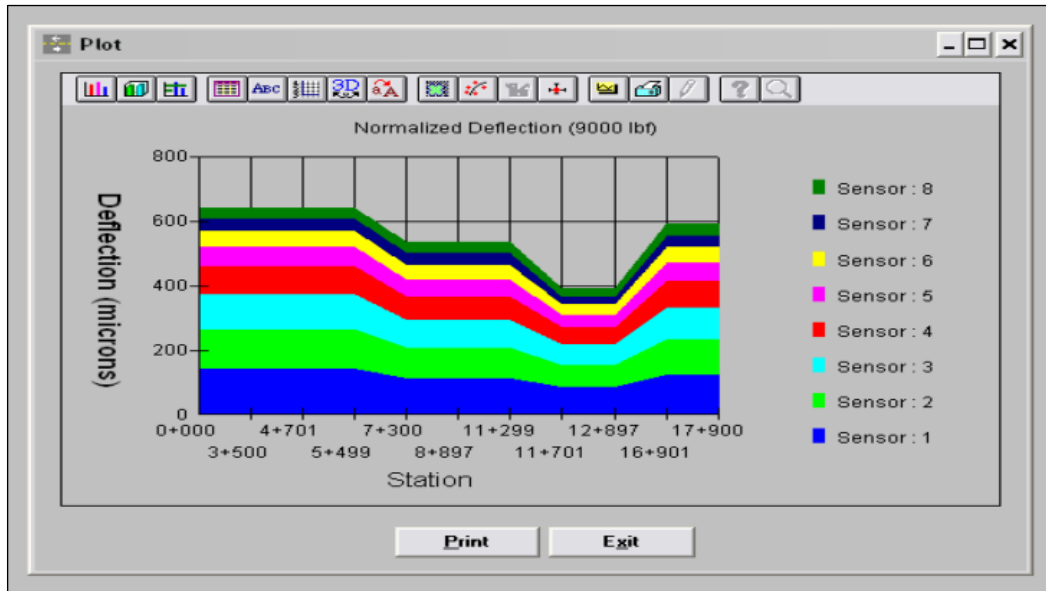
El segundo escenario es el ingreso de datos deflectométricos. Se crea el archivo con su respectiva identificación con su extensión (DEF), se ingresa la estación, el espesor de la carpeta asfáltica, espesor de capas granulares, el número de golpes, la carga actuante, las deflexiones de cada uno de los sensores utilizados, como se indica en la Figura 55. En esta ventana se cuenta con comandos para adición de estaciones, eliminación de estaciones e impresión de gráficos de deflexiones y espesores.

Figura 55

Ingreso de Datos Deflectometricos

Figura 56

Variación de Deflexiones.



4.4.5 Método ELLEA1

Como se mencionó anteriormente para el análisis de retrocálculo en el programa Evercalc se fusiono las capas granulares, pero lo que se necesita es determinar los módulos elásticos de cada una de las capas y con el menor error cuadrático medio RMS por lo que se utilizara el programa ELLEA1.

En el tramo en estudio de 21 km de longitud se analizan las dos calzadas en base a las secciones homogéneas determinadas. En este programa se realizó el análisis con 5 capas, carpeta asfáltica, capa de subbase, capa de mejoramiento, subrasante y capa rígida. Las profundidades de la capa rígida se ingresaron las mismas que se obtuvieron en el Evercalc como se indica en la Figura 54.

Los datos para el ingreso son los siguientes: deflexiones, distancias radiales, espesores de cada capa, coeficientes de Poisson, radio del plato de carga, presión aplicada, como se indica en Figura 57.

Figura 57

Ingreso de Datos ELLEA1.

Layer	Modulus	Poisson	Thickness	
1	5,298	0,30	312,0	
2	371	0,35	260,0	
3	302	0,40	470,0	
4	125	0,40	2600,0	
5	400	0,30	semi-inf	
Load#	Stress	Radius	X	Y
1	0,57	150,00	0,00	0,00
2	0,00	150,00	0,00	0,00
Evaluation Point	x	y	z	Layer=
	900,00	0,00	0,00	1
Direction	Stress	Strain (microstrains)	Displacement	
X	-1,29E-02	-5	-8,09E-03	
Y	4,38E-02	9	0,00E+00	
Z	-4,73E-05	-2	6,10E-02	
YZ	0,00E+00	0		
XZ	-1,05E-06	0		
XY	0,00E+00	0		

Fuente: Programa ELLEA1.

En la Tabla 21 se presenta los datos ingresados para el análisis del retrocálculo con el programa ELLEA1.

Tabla 21

Ingreso de Datos Generales ELLEA1

DESCRIPCIÓN DE DATOS	INGRESO
Numero de Capas	5
Numero de sensores	8
Radio del palto de carga	15 cm
Unidades	Métricas
Capa Rígida	Aplica
Corrección por temperatura	No Aplica
Módulos Semilla	Usuario
Distancia radial de sensores	De 0 a 180 cm
Concreto Asfáltico	
Coefficiente de Poisson	0,30
Modulo Inicial	3000 MPa
Capa Subbase	
Coefficiente de Poisson	0,35
Modulo Inicial	400 MPa
Capa Mejoramiento	
Coefficiente de Poisson	0,40
Modulo Inicial	200 MPa
Capa Subrasante	
Coefficiente de Poisson	0,40
Modulo Inicial	100 MPa

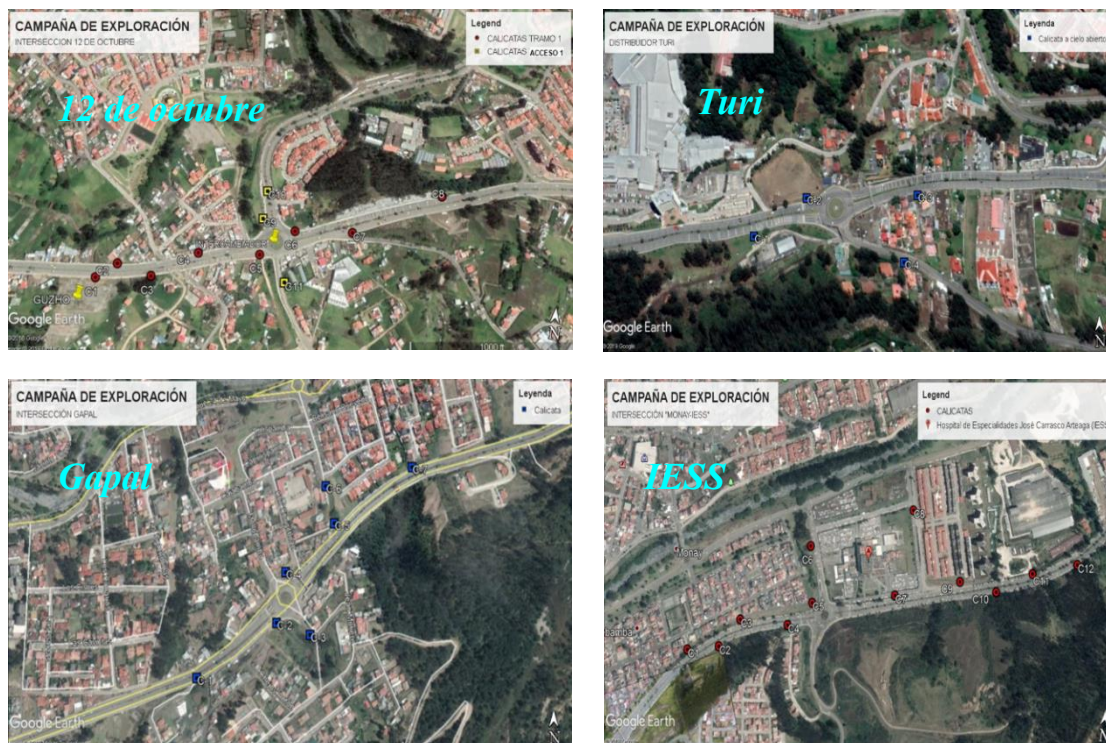
<i>Capa Rígida</i>	
Coefficiente de Poisson	0,30
Modulo Fijo	400 MPa
Iteraciones máximas	20
Tolerancia RMS	Mínimo

4.5 Correlación entre datos con deflectómetro y laboratorio

Los datos de laboratorio se obtuvieron de los estudios de los intercambiadores de tráfico que están previstos construir en la vía Cuenca – Azogues y fueron proporcionados por el ministerio de transporte y obras públicas (MTO), zonal 6. En la Figura 58 se observan las intersecciones donde se recolectaron los datos y son el redondel 12 de octubre, Turi, Gapal y redondel del IESS.

Figura 58

Calicatas Realizadas en Redondeles, Cuenca – Azogues



Fuente: MTO.

Los ensayos de laboratorio que se practicaron en cada una de las muestras recolectadas son: los límites de Atterberg (LL, LP, IP), humedad natural, granulometría, proctor modificado que incluye densidad seca, humedad óptima y CBR. Además, se determina la clasificación de suelos por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS.

Con el fin de saber si existe una correlación con los datos deflectométricos calculamos el Mr de la subrasante con los datos del CBR de laboratorio (ver Tabla 22 y Tabla 23) con las siguientes correlaciones, según la AASHTO 2002:

$$M_R(\text{Psi}) = 2555xC^{0.65}, CBR \leq 10\% \quad (44)$$

$$M_R(\text{Psi}) = 4326 \ln(\text{CBR}) + 241, CRR > 10\% \quad (45)$$

Tabla 22

Datos de Laboratorio Calzada Derecha

TRAMO EL SALADO - GUANGARCUCHO, CALZADA DERECHA										
Calicata	Estrato	Abscisas	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Humedad Optima (%)	CBR (95%)	SUCS	Descripción	Mr. (MPa)
C1	E3	0+991	44,34	26,06	18,28	12,90	31,00	GC	Grava arcillosa	104,09
C3	E3	1+202	38,96	21,58	17,38	15,50	2,65	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad	33,19
C5	E2	1+402	45,26	22,94	22,32	12,60	11,00	SC	Arena arcillosa	73,18
C7	E2	1+595	41,49	20,74	20,75	14,95	1,70	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad	24,87
C11	C3-E2	3+437	27,77	18,54	9,23	10,20	12,40	GC	Grava Arcillosa	76,76
C18	E4	8+394	49,03	22,50	26,53	14,90	2,05	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad	28,09
C20	E3	8+607	56,90	30,99	25,91	17,20	1,85	CH	Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad	26,28
C23	E2	9+256	49,82	27,29	22,53	16,00	2,70	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad	33,60

Fuente: MTOP.

Tabla 23

Datos de Laboratorio Calzada Izquierda

TRAMO GUANGARCUCHO - EL SALADO, CALZADA IZQUIERDA										
Calicata	Estrato	Abscisas	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Humedad Optima (%)	CBR (95%)	SUCS	Descripción	Mr. (MPa)
C2	E2	1+076	37,86	22,67	15,19	16,20	6,25	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad	57,97
C4	E3	1+262	44,33	23,12	21,21	20,00	2,20	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad	29,41
C6	E2	1+463	43,32	24,2	19,12	12,60	11,10	SC	Arena arcillosa	73,45
C15	C5-E2	5+492	37,74	21,48	16,26	13,80	4,60	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad	47,50
C16	C7-E2	5+703	36,23	25,09	11,14	13,50	3,80	ML	Limos inorgánicos de baja compresibilidad	41,95
C19	E3	8+440	29,94	19,06	10,88	12,90	15,90	SC	Arena arcillosa	84,17
C21	E2	8+921	50,41	18,14	32,27	14,90	1,45	CH	Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad	22,43
C22	E3	9+125	43,66	26,20	17,46	14,20	1,85	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad	26,28
C24	E2	9+352	47,02	26,69	20,33	14,90	3,35	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad	38,65

Fuente: MTOP.

Los módulos resilientes de la subrasante obtenidos por procesos de laboratorio como se observan en la Tabla 22 y Tabla 23 serán comparados con los datos retrocalculados provenientes de las pruebas deflectométricas más cercanas para comprobar su correlación.

4.6 Método Empírico – Mecanicista AASHTO MEPDG

El método empírico mecanicista de la AASHTO es un software muy importante puesto que contempla las cualidades mecánicas de los materiales y predicciones empíricas de los deterioros. La versión que se utiliza para el diseño de la rehabilitación es del año 2009 la cual fue calibrada con los datos de Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras NCHRP 20-07 para el año 2015.

4.6.1 Datos Generales

Para la propuesta de rehabilitación se inicia presentando el ingreso de datos en las diferentes ventanas que contiene el programa MEPDG. Para la información general se tiene: el nombre del proyecto, periodo de diseño en años, mes y año de construcción del pavimento existente, mes y año de la rehabilitación anterior y la apertura del tráfico. En el tipo de diseño escogemos sobre carpeta con concreto asfáltico, como se indica en la Figura 59.

Figura 59

Información General MEPDG

General Information

Project Name: Tramo_1.1Calzada_Derecha.dgp

Description: DISEÑO DE REHABILITACION TRAMO 1 CALZADA DERECHA AUTOPISTA CUENCA - AZOGUES

Design Life (years): 20

Existing pavement construction month: August Year: 1995

Pavement overlay construction month: June Year: 2014

Traffic open month: June Year: 2015

Type of Design

New Pavement

Flexible Pavement Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)

Restoration

Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP)

Overlay

Asphalt Concrete Overlay PCC Overlay

AC over AC

OK Cancel

4.6.2 Identificación del Proyecto

Los datos de ingreso para la identificación del proyecto son: la localización, identificación del proyecto, sección, fecha, el formato en millas, abscisa de inicio, abscisa final y dirección del tráfico, ver Figura 60.

Figura 60

Identificación del Proyecto

Site/Project Identification

Location: Cuenca - Azuay - Ecuador

Project ID: El Salado - Guangarcucho, Calzada Derecha

Section ID: TCD1 El Salado - Gapal

Date: 20/02/2022

Station/milepost format: Miles: 0.000

Station/milepost begin: 0+000

Station/milepost end: 5+350

Traffic direction: East bound

OK Cancel

4.6.3 Análisis de parámetros para deterioros

Para el análisis de parámetros es necesario indicar el nivel de confianza esperado para el tipo de vía, en este caso una autopista. En base a la Tabla 15 elegimos el nivel de confianza que resulta el 95%. Para los parámetros de límites de deterioros nos guiamos en la Tabla 14. En la figura 61 se indican los valores elegidos.

Figura 61

Parámetros Para Niveles de Deterioro, Pavimento Flexible.

Analysis Parameters

Project Name: Tramo_1.1Calzada_Derecha.dg

Initial IRI (in/mi): 127

Performance Criteria

Rigid Pavement Flexible Pavement

	Limit	Reliability
<input checked="" type="checkbox"/> Terminal IRI (in/mile)	222	95
<input checked="" type="checkbox"/> AC Surface Down Cracking Long Cracking (ft/mi)	800	95
<input checked="" type="checkbox"/> AC Bottom Up Cracking Alligator Cracking (%)	6	95
<input checked="" type="checkbox"/> AC Thermal Fracture (ft/mi)	300	95
<input checked="" type="checkbox"/> Chemically Stabilized Layer Fatigue Fracture(%)	25	95
<input checked="" type="checkbox"/> Permanent Deformation - Total Pavement (in)	0.40	95
<input checked="" type="checkbox"/> Permanent Deformation - AC Only (in)	0.20	95

OK Cancel

SECCIÓN TRANSVERSAL, EL SALADO – GUANGARCUCHO

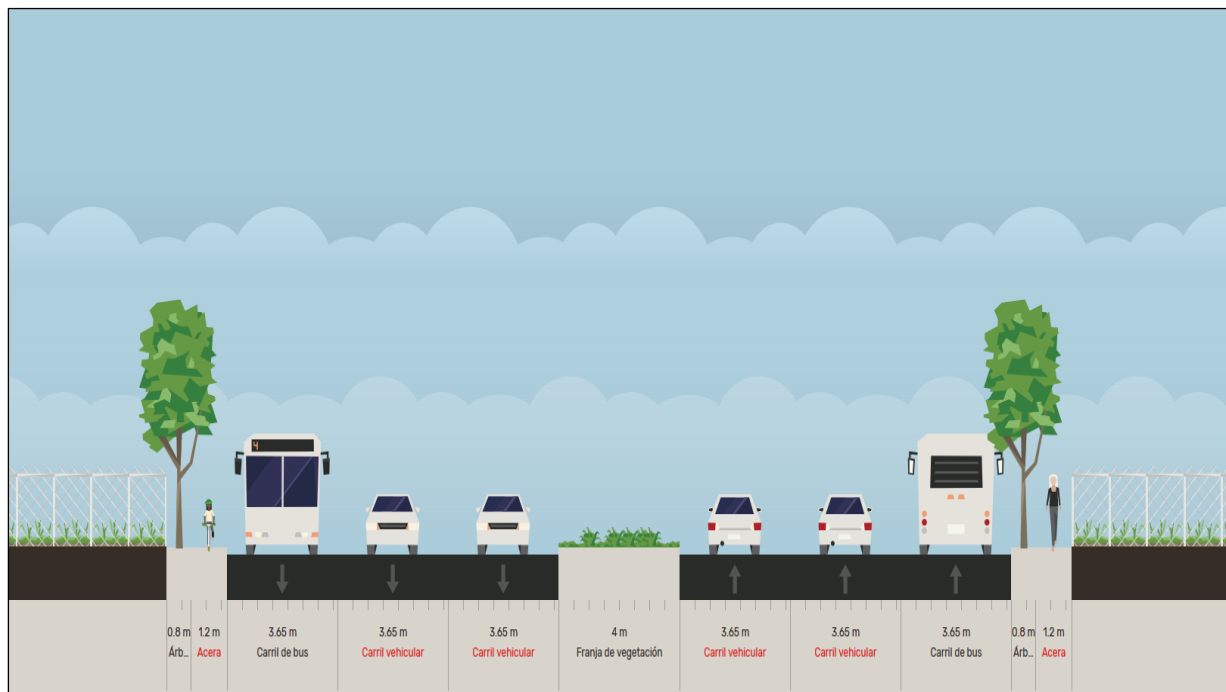
Tabla 24

Datos, Sección Transversal Autopista

<i>Elementos de Sección Transversal</i>	
Número de Calzadas	2,00 m
Número de Carriles	6,00 m
Ancho de Calzada	10,95 m
Ancho de Carril	3,65 m
Ancho de Parterre Central	4,00 m
Acera lateral en Corte	1,20 - 2,00
Acera lateral en Relleno	1,20 - 2,00
Pendiente Transversal Calzada %	2,00
Pendiente Transversal Espaldón %	2,00

Figura 62

Sección Transversal Autopista El Salado - Guangarcucho



Fuente: Programa Streetmix

4.6.4 Tráfico

Para el ingreso del tráfico se tiene una ventana principal en la cual se ingresa el tráfico promedio diaria anual de camiones (AADTT), el número de carriles que tiene la calzada, el

porcentaje de camiones en la dirección de diseño, porcentaje de camiones en el carril de diseño y la velocidad de operación. En esta ventana también se puede editar el ajuste de volúmenes de tráfico, factor de distribución de ejes de carga y entrada para tráfico general, como se indica en la Figura 63.

Figura 63

Ingreso de Datos de Tráfico

Para los factores que intervienen en el ajuste de volúmenes de tráfico se tiene los ajustes de factores mensuales de cada clase de camión como se ve en la Figura 64, pero como no se cuenta con tales registros el manual recomienda conservar los valores por defecto.

Figura 64

Factores Mensuales de Camiones

Month	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7	Class 8	Class 9	Class 10	Class 11	Class 12	Class 13
January	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
February	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
March	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
April	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
May	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
June	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
July	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
August	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
September	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
October	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
November	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
December	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

La clase de camiones de nuestro país tiene similitud con los camiones de la Administración Federal de Carreteras (FHWA). El Acuerdo Ministerial No. 036 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Artículo 1, establece los tipos de vehículos como se muestra en la Figura 65. Acotejando con la clase de camiones de la FHWA de la Figura 42, se crea la Tabla 25 para el ingreso en el MEPDG.

Figura 65

Tipos de Camiones, MTOP

TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA POR EJE	DESCRIPCIÓN	PESOS MÁXIMOS PERMITIDOS (t)	LONGITUDES MÁXIMAS PERMITIDAS (m)		
				LARGO	ANCHO	ALTO
2DA			10	7,50	2,60	3,50
2DB			17	12,00	2,60	4,10
3-A			26	12,20	2,60	4,10
4-C			30	12,20	2,60	4,10
4-0 OCTOPUS			32	12,00	2,60	4,10
2S1			28	18,50	2,60	4,10
2S2			37	18,50	2,60	4,10
2S3			41	18,50	2,60	4,10
3S1			37	18,50	2,60	4,10
3S2			46	18,50	2,60	4,10
3S3			48	18,50	2,60	4,10
2R2			39	18,50	2,60	4,10
2R3			48	18,50	2,60	4,10

Fuente: MTOP

Tabla 25

Clases de Camiones, MTOP vs FHWA

Clase de Camiones	
MTOP	FHWA
Bus	4
2DB	5
3A	6
2S2	8
3S2	9

La distribución de clase de vehículos para el sub tramo TCD1 de la calzada derecha pertenece a la estación de conteo Galpal escogida como la crítica por sus 2328 camiones para esta calzada de un total de 4971 para el año 2022, con un porcentaje de sentido de circulación de 46.83 % como se ingresó en la Figura 63. En la Tabla 26 se indican los porcentajes de distribución, así como su ingreso en el MEPDG, como se indica en la Figura 66.

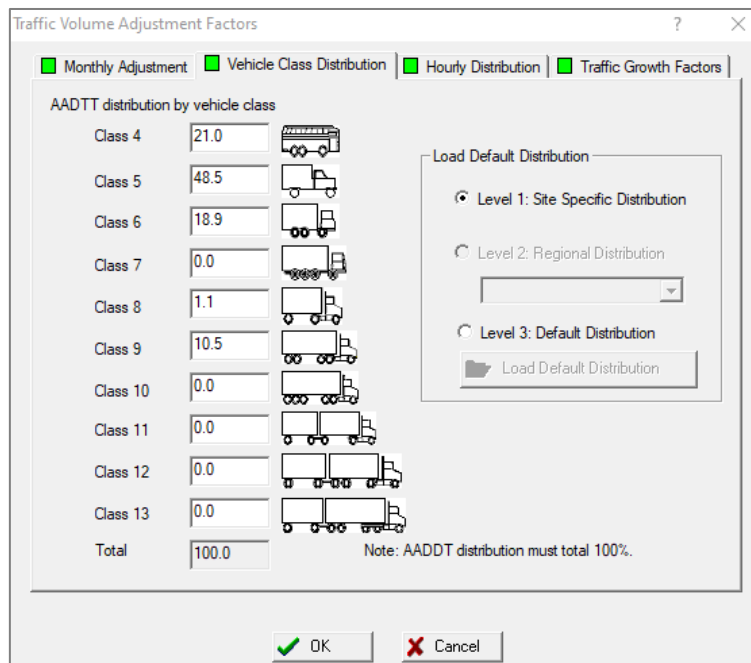
Tabla 26

Porcentaje de Camiones por su Clase

Estación de Conteo Galpal	Vehículos Conteo MTOP	AÑO 2022	Clase FHWA	Porcentaje
Estación de Conteo Sentido Este-Oeste (Cuenca-Guangarcucho)	Bus	489	4	21,37%
	2DB	1129	5	48,26%
	3A	440	6	18,83%
	2S2	25	8	1,07%
	3S2	245	9	10,47%
	TOTAL	2328		100%

Figura 66

Ingreso de Porcentajes de Distribución



La distribución horaria de camiones se obtiene del conteo vehicular el cual se contabilizo en intervalos de una hora; la distribución horaria para el diseño del subtramo TCD1 de la calzada derecha se muestran en la Figura 67.

Figura 67

Distribución Horaria de Camiones

Hourly truck traffic distribution by period beginning:

Midnight	1.6	Noon	6.2
1:00 am	0.8	1:00 pm	5.6
2:00 am	0.6	2:00 pm	5.5
3:00 am	0.3	3:00 pm	7.3
4:00 am	0.3	4:00 pm	6.1
5:00 am	0.8	5:00 pm	6.9
6:00 am	2.1	6:00 pm	6.2
7:00 am	4.4	7:00 pm	5.8
8:00 am	6.3	8:00 pm	5.0
9:00 am	6.6	9:00 pm	3.7
10:00 am	6.1	10:00 pm	2.4
11:00 am	6.3	11:00 pm	3.1

Note: The hourly distribution must total 100%

Total: 100

Fuente: Distribuidores de Trafico, MTOP

Para el factor de crecimiento de camiones se obtuvo de un promedio de la Tabla 11 se considera un crecimiento vehicular compuesto. En la Figura 68 se observa el factor de crecimiento ingresado.

Figura 68

Factor Horario de Crecimiento

Opening Date: June, 2015

Design Life (years): 20

AADTT: 4971

% Traffic Design Direction: 46.83

% Traffic Design Lane: 60

Vehicle-class specific traffic growth

	Rate (%)	Function
Class 4	3.08	Compound
Class 5	3.08	Compound
Class 6	3.08	Compound
Class 7	3.08	Compound
Class 8	3.08	Compound
Class 9	3.08	Compound
Class 10	3.08	Compound
Class 11	3.08	Compound
Class 12	3.08	Compound
Class 13	3.08	Compound

Default Growth Function

No Growth

Linear Growth

Compound Growth

Default growth rate (%)

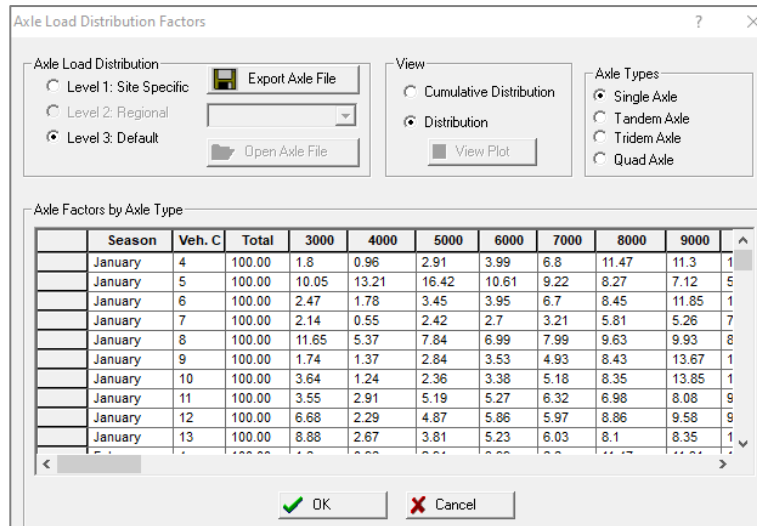
View Growth Plots

Note: Vehicle-class distribution factors are needed to view the effects of traffic growth.

Para los espectros de carga se utilizan los datos del nivel 3 que son valores incluidos en el MEPDG para una distribución de eje sencillo, tándem, tridem y cuádruple. El programa considera los cuatro ejes desde el simple hasta el cuádruple, como se ve en la Figura 69.

Figura 69

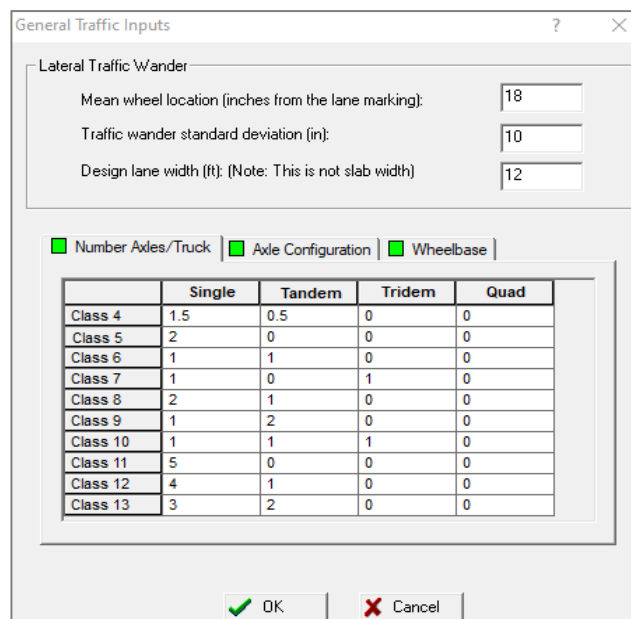
Factores de Distribución de Ejes de Carga.



Para los datos generales de tráfico, se ingresa la distancia desde el medio de la rueda hasta el filo del carril (18 in) con un ancho del carril de diseño (11.98 in). En una sub ventana se ingresa el número de ejes por camión; que, para el tipo de camiones especificados por el MTOP son los que se indican en la Figura 70.

Figura 70

Número de Ejes por Camión.



En esta misma ventana (Figura 70.) encontramos la configuración de ejes que contiene el ancho medio del eje en pies, espacio entre neumáticos dobles en pulgadas, presión de neumáticos en psi y espacio entre ejes en pulgadas. Todos estos datos mencionados se mantuvieron los valores por defecto del programa y se indican en la Figura 71.

Se ingresa dentro de la misma pestaña la distancia entre ejes, el promedio de espaciamiento entre ejes cortos, medios y largos. Acompañado de estos datos el porcentaje de camiones para estos espaciamientos. Como se indica en la Figura 71, se mantienen los valores por defecto para las medidas de ejes ya que los camiones de nuestro medio en gran parte son de origen norte americano.

Figura 71

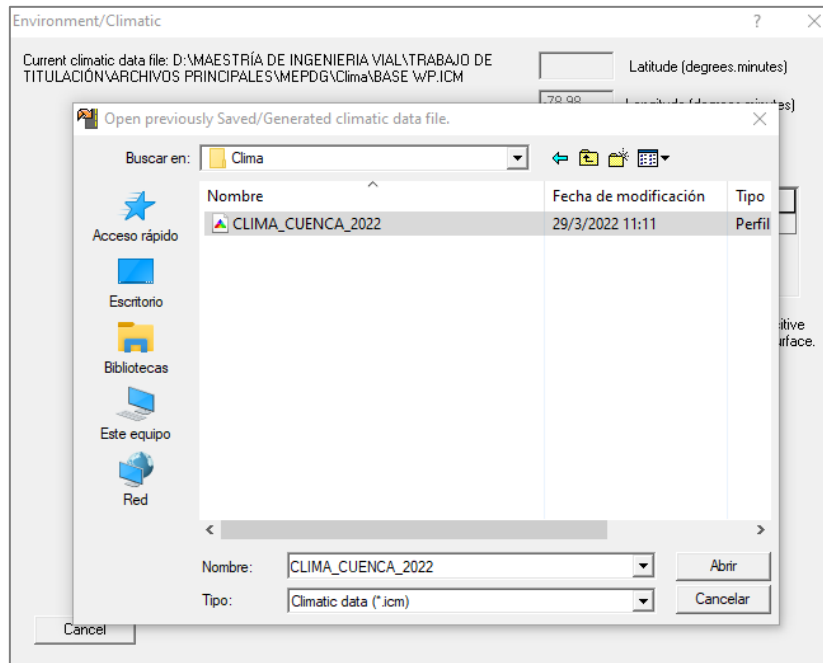
Configuración de Ejes y Espacio entre Ejes

	Short	Medium	Long
Average Axle Spacing (ft)	12	15	18
Percent of trucks (%)	33.0	33.0	34.0

El factor climático es muy importante para el desarrollo de las predicciones de deterioros puesto que el programa MEPDG cuenta con archivos de estaciones climáticas que están ubicadas en todo Estados Unidos de América. Ninguno de estos climas se compara con el clima de los Andes. Fue estrictamente necesario crear un archivo climático de nuestra zona y específicamente para el cantón Cuenca. El archivo climático (Figura 72) nos sirve para determinar las condiciones de temperatura y humedad en la estructura del pavimento que afecta de manera directa en los agrietamientos por condiciones térmicas y se reflejan en la formación de grietas transversales en el pavimento.

Figura 72

Ingreso del Archivo Climático de Cuenca

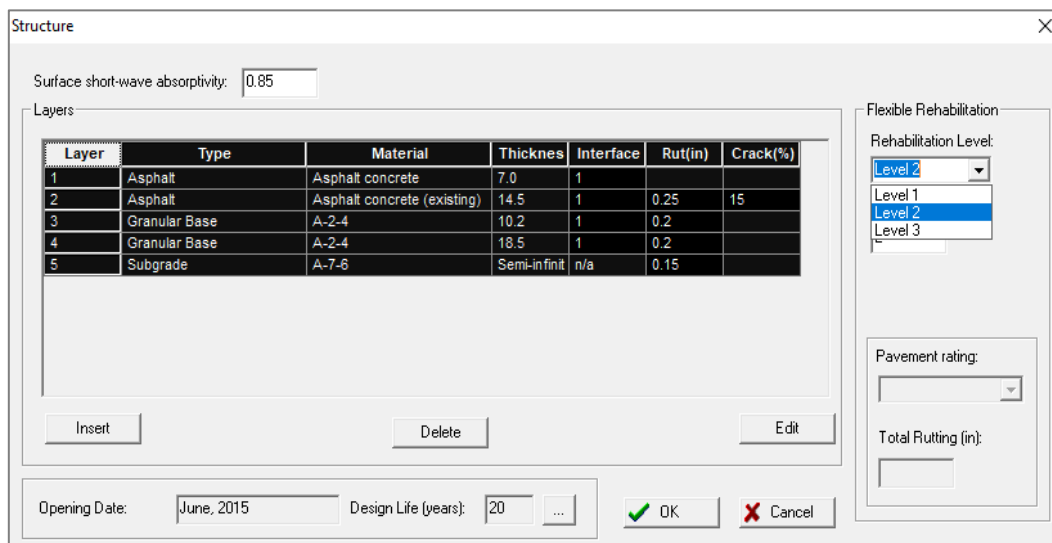


4.6.5 Ingreso de datos de estructura del pavimento

Para la información de la estructura a ser diseñada que en nuestro caso se trata de una rehabilitación se tiene tres niveles de ingreso de datos: para el análisis de nivel 1 se utiliza información de surcos o ahuellamiento para cada capa de la estructura del pavimento. Para el nivel 2 a más de lo que se ingresado en el nivel 1 se incluye el porcentaje de agrietamiento en la superficie de HMA existente, como se indica en la Figura 73.

Figura 73

Ingreso de Datos Nivel 1 y 2



En el nivel 3 se utiliza la profundidad general del surco (deformación permanente), no se utilizan las deformaciones de cada capa, también se utiliza el índice de condición del pavimento (PCI) que puede ser excelente, regular, aceptable, mala y muy mala, como se muestra en Figura 74. Para el tramo vial en estudio se realizó un recorrido de los 21 kilómetros de las dos calzadas y se observa un porcentaje muy bajo grietas en forma de piel de cocodrilo (abajo hacia la superficie), grietas longitudinales (abajo hacia la superficie), grietas transversales (térmicas), y de la misma manera no hay ahuellamiento notorio. En general el pavimento se encuentra en condiciones aceptables.

Figura 74

Ingreso de Datos Para el Nivel 3

Structure

Surface short-wave absorptivity: 0.85

Layers

Layer	Type	Material	Thicknes	Interface
1	Asphalt	Asphalt concrete	7.0	1
2	Asphalt	Asphalt concrete (existing)	14.5	1
3	Granular Base	A-2-4	10.2	1
4	Granular Base	A-2-4	18.5	1
5	Subgrade	A-7-6	Semi-infini	n/a

Flexible Rehabilitation

Rehabilitation Level: Level 3

Pavement rating: Fair

Total Rutting (in):

Opening Date: June, 2015 Design Life (years): 20

OK Cancel

Cuando seleccionamos el nivel 1 en el diseño general todas las entradas para las capas no ligadas serán por el nivel 1 también; no obstante, para las capas de HMA se puede ingresar a través de los niveles 1, 2 o 3. Cuando seleccionamos los niveles 2 o 3 para el diseño general las entradas para las capas no ligadas pueden ser a través de los niveles 2 o 3 y para las capas de HMA se puede ingresar a través de los niveles 1, 2 o 3.

Para el diseño general de la estructura del pavimento se ingresaron los datos a través del nivel 1. El ingreso de datos de las capas granulares y subrasante será por el nivel 1. Del estudio de suelos que realizó la consultora Caminosca, se obtiene el tipo de material (subrasante) para el primer sub tramo TCD1 el cual es un A-7-6; también, se ingresa los datos del coeficiente de poisson, el coeficiente lateral de presión K_0 , el módulo de la capa (psi) obtenido del *método no destructivo* que es el módulo obtenido del retrocálculo con el análisis

de deflexiones del FWD. El módulo ingresado ya está penalizado con el coeficiente de corrección de la Tabla 10; por tal motivo, aquí el factor de corrección es 1.

Figura 75

Ingreso de Datos en Capa de Subrasante

Tabla 27

Propiedades de la Subrasante

<i>Abscisa 3+010</i>	
<i>Descripción</i>	<i>Subrasante</i>
1/2"	100,00%
3/8"	100,00%
No. 4	98,82%
No. 10	94,01%
No. 40	84,74%
No. 200	74,78%
LL	66
IP	39
C. SUCS	CH
C. AASHTO	A-7-6
CBR	3,4
GS	2,6
Ko	0,7
C. Poisson	0,4

Fuente: Estudio Caminosca, MTOP

Cesar Mauricio Balarezo Durán

En la misma venta se encuentra el ingreso de las cualidades mecánicas de los materiales ICM donde se ingresa todo el análisis granulométrico para el material específico (porcentajes que pasan), índice de plasticidad, limite líquido (ver Tabla 27), y más cualidades de los materiales que si no se tienen como dato se pueden usar los valores por defecto. También se indica si es última capa y si la misma es compactada o no. Estos datos se indican en la Figura 76.

Figura 76

Cualidades de Materiales

The screenshot shows a software window titled "Unbound Layer - Layer #5". It contains several input fields and tables. At the top, "Unbound Material" is set to "A-7-6" and "Thickness(in)" is empty. There is a checked box for "Last layer". Below this, there are radio buttons for "Strength Properties" and "ICM", with "ICM" selected. There are also radio buttons for "Range" and "Mean", with "Mean" selected. To the right of these are "Export", "Import", and "Update" buttons. The main area is divided into two tables. The left table is a sieve analysis table with columns "Sieve" and "Percent Passing". The right table is a properties table with various fields and values.

Sieve	Percent Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	74.78
#100	
#80	
#60	
#50	
#40	84.74
#30	
#20	
#16	
#10	94.01
#8	
#4	98.82
3/8"	100
1/2"	100
3/4"	
1"	
1 1/2"	
2"	
2 1/2"	
3"	
3 1/2"	

Plasticity Index (PI)	39
Liquid Limit (LL)	66
Compacted Layer	<input checked="" type="checkbox"/> Yes
Index Properties from Sieve Analysis	
% Passing #200	74.8
% Passing #40	84.7
% Passing #4	98.8
D10 (mm)	0.000242
D20 (mm)	0.000587
D30 (mm)	0.001424
D60 (mm)	0.02027
D90 (mm)	1.023
User Overridable Index Properties	
Maximum Dry Unit Weight(pcf)	97.8
Specific Gravity, Gs	<input checked="" type="checkbox"/> 2.60
Sat. Hydraulic Conductivity(ft/hr)	2.9e-006
Optimum gravimetric water content(%)	22.1
Degree of Saturation at Optimum(%)	87.2
User Overridable Soil Water Characteristic Curve	
af	143.2
bf	0.4853
cf	0.03
hr	500

Para el ingreso de las propiedades de la capa de pavimento asfáltico (sobre carpeta) y para el análisis de rehabilitación tenemos que definir la carpeta existente considerando el ingreso de datos por el nivel 3. Aquí se ingresan el espesor de la capa más las propiedades granulométricas del material y el módulo dinámico del asfalto (E^*); sin embargo, para calcular E^* se puede ingresar el módulo de retrocálculo, la frecuencia y la temperatura en el momento de la prueba (FWD). La frecuencia se puede calcular con $F=1/(\text{duración del pulso FWD}) = 1/30(\text{promedio}) = 33.33$, esta fórmula es compatible con la frecuencia equivalente utilizada para calcular E^* en el MEPDG. Los datos mencionados se indican en la Figura 77.

Figura 77

Datos de Capa Existente de Asfalto

NDT Test	Modulus(psi)	Frequency(hz)	Temperature(°F)
1	593429	33.33	85.89
2			
3			
4			
5			
6			

La viscosidad del asfalto es tomada del AC 20 la cual es para una temperatura del aire entre 20-30 °C, en la Figura 78 se presentan los datos generales del asfalto como temperatura, la cantidad efectiva de asfalto, porcentaje de vacíos, peso unitario, conductividad térmica y capacidad de calor, los cuales se determinaron de las especificaciones técnicas del MTOP.

Figura 78

Datos Generales del Asfalto

Property	Value
Reference temperature (F)	70
Poisson's ratio	0.30
Thermal conductivity asphalt (BTU/hr-ft-F)	0.67
Heat capacity asphalt (BTU/lb-F)	0.23

Capítulo 5

Análisis de Resultados

5.1 Deflectometría

Los datos obtenidos con el deflectómetro de impacto FWD; como se mencionó en la sección 4.2, según las normas ASTM se tomaron cada 200 metros aproximadamente. Para la calzada derecha se obtuvieron 107 datos y para la calzada izquierda 106 datos. Estos son tabulados en forma automática por el software del propio equipo, como se indica en la Tabla 17. Luego de la tabulación ordenada se continúa con la normalización de la carga a 40 KN para lo cual se utiliza la ecuación 44 y se normaliza a todas las deflexiones obtenidas. La Tabla 28 muestra parte de los valores obtenidos.

Tabla 28

Normalización de la Carga a 40 KN o 566 KPa

Temperatura °C	Carga		Presión KPa	Espesor hi (cm)	Factor de Corrección	Esfuerzo Normalizado 566 KPa							
	KN	N				D(0) µm	D(1) µm	D(2) µm	D(3) µm	D(4) µm	D(5) µm	D(6) µm	D(7) µm
28,40	42,9	42900	607	36,9	0,93	310,21	274,69	246,25	168,67	108,44	75,43	53,43	41,96
28,48	42,55	42550	602	36,9	0,94	114,12	108,48	101,43	81,22	39,11	29,80	23,31	19,84
28,56	40,76	40760	577	36,9	0,98	87,54	76,74	70,85	56,82	40,04	34,35	26,89	23,85
28,64	38,87	38870	550	36,9	1,03	74,71	66,38	62,16	50,94	34,89	29,53	21,71	18,21
28,72	38,77	38770	548	36,9	1,03	88,32	79,65	74,28	61,18	42,51	36,32	27,75	23,63
28,80	40,91	40910	579	36,9	0,98	81,45	69,81	63,26	46,83	29,63	23,17	16,04	13,79
28,89	41,42	41420	586	36,9	0,97	94,64	82,76	72,72	45,29	24,24	20,38	15,74	14,78
28,97	38,89	38890	550	36,9	1,03	104,50	85,57	78,07	73,44	59,76	45,77	32,71	27,56
29,05	40,53	40530	573	36,9	0,99	102,54	92,18	84,97	66,03	44,91	36,02	26,45	21,81

5.2 Secciones Homogéneas

Durante la determinación de las secciones homogéneas para cada calzada de circulación se sigue el procedimiento descrito en la sección 4.3. Para los 21 kilómetros del tramo vial se presentan 4 secciones homogéneas en la calzada derecha y de igual manera para la calzada izquierda (Figura 80 y Figura 82). Se presentan los gráficos de diferencias acumuladas y secciones homogéneas con la deflexión característica respectiva. También se presentan las abscisas que limitan las secciones homogéneas, el promedio de la deflexión máxima, mínima, y el coeficiente de variación, que en ningún caso supera el 30%. Ver Tabla 29 y Tabla 30.

Figura 79

Diferencias Acumuladas Calzada Derecha

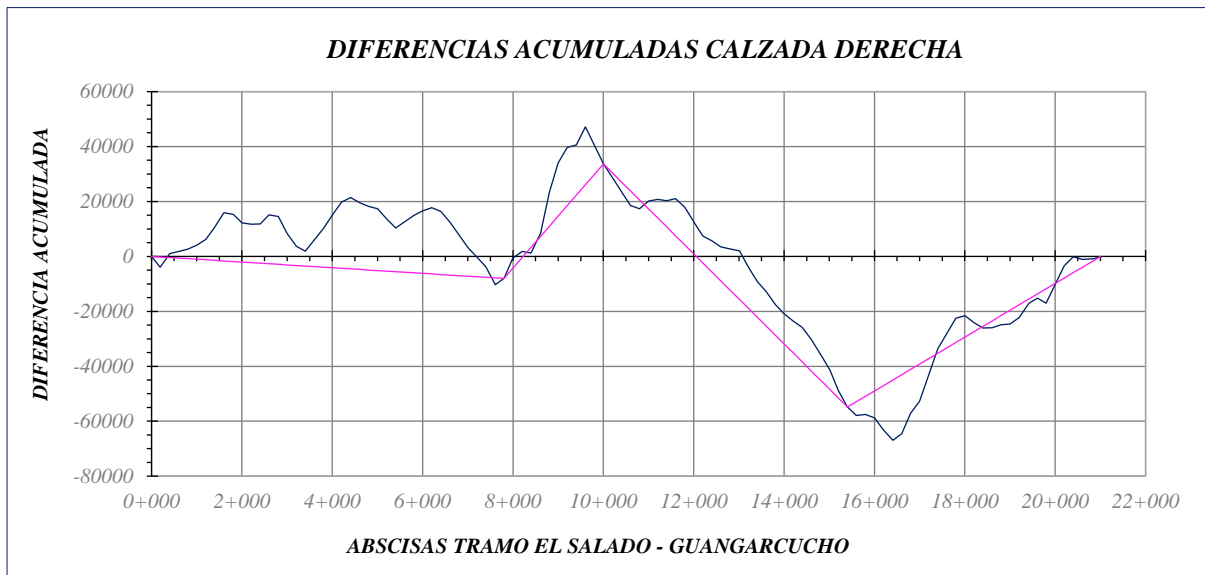


Figura 80

Secciones Homogéneas Calzada Derecha

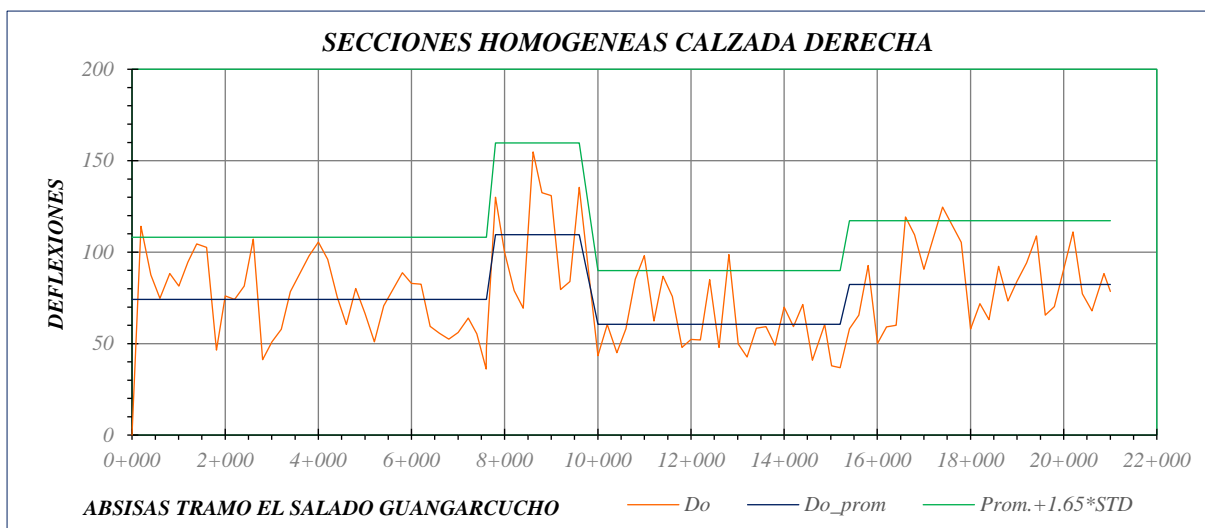


Tabla 29

Datos de Secciones Homogéneas Calzada Derecha

Sección	Abscisa Inicial	Abscisa Final	longitud Km	Deflexión promedio	Desviación Estándar	Deformación Característica	Deflexión máx	Deflexión min	Coefficiente de Variación %
1	0+000	7+801	7801	74	20,54	108	114	36	28
2	7+801	10+001	2200	110	30,40	160	155	69	28
3	10+001	15+402	5401	61	17,80	90	99	37	29
4	15+402	21+003	5601	82	21,14	117	125	50	26

Figura 81

Diferencias Acumuladas Calzada Izquierda

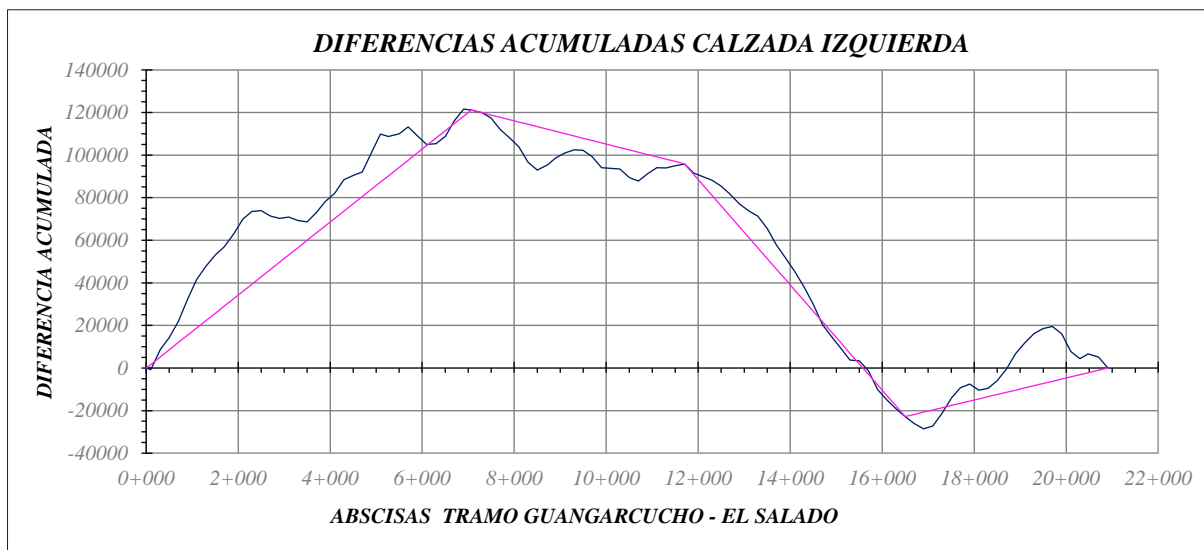


Figura 82

Secciones Homogéneas Calzada Izquierda

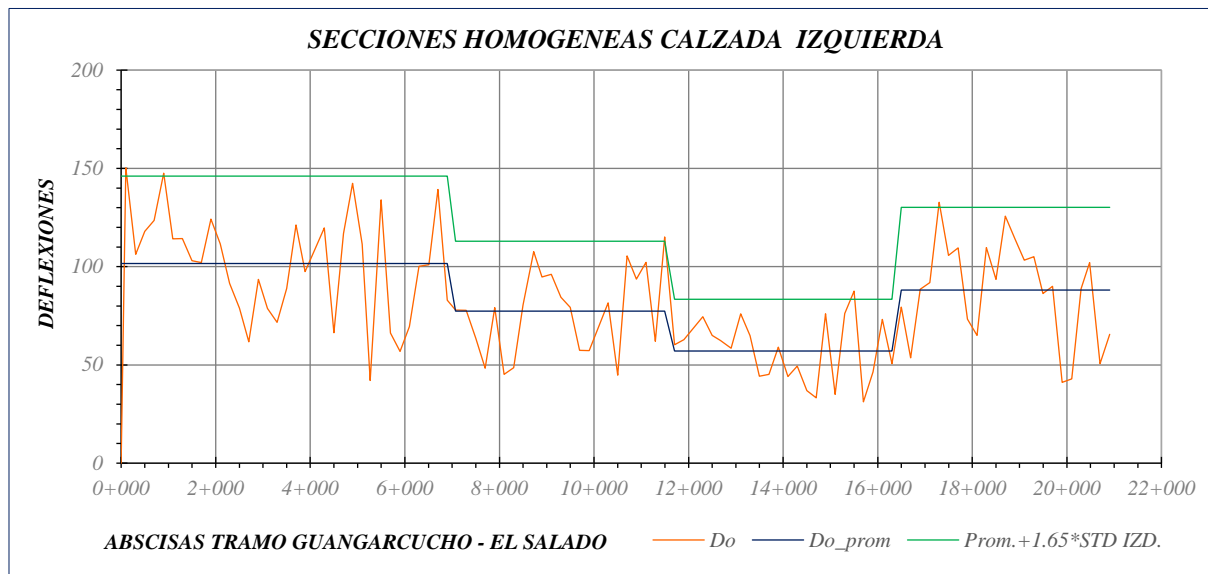


Tabla 30

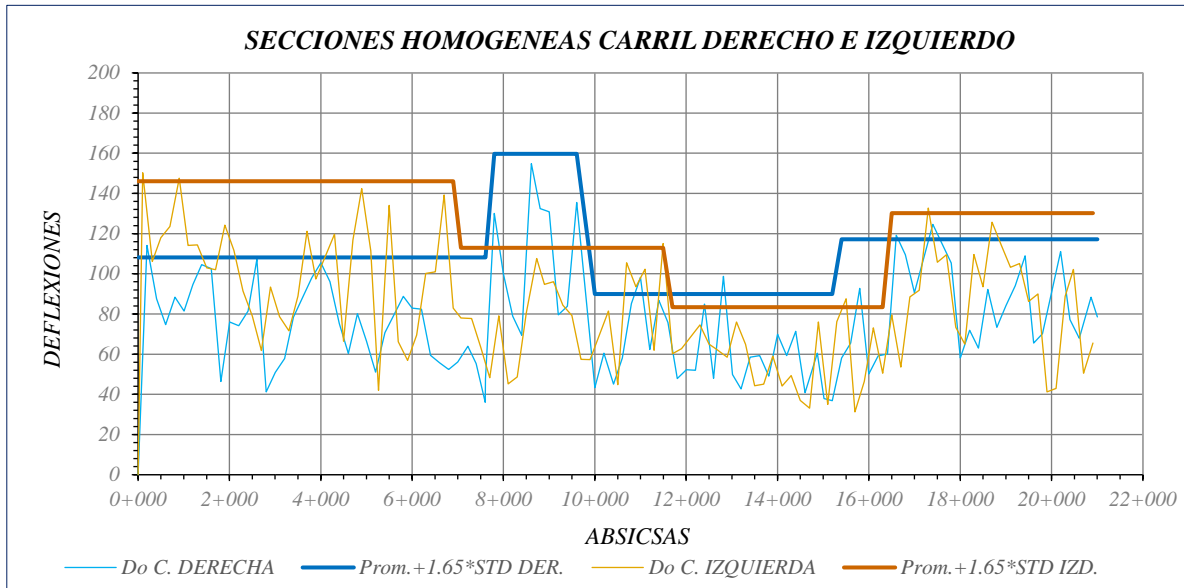
Datos de Secciones Homogéneas Calzada Izquierda

Sección	Abscisa Inicial	Abscisa Final	longitud Km	Deflexión promedio	Desviación Estándar	Deformación Característica	Deflexión máx.	Deflexión min	Coefficiente de Variación %
1	0+000	7+070	7070	102	26,95	146	150	42	27
2	7+070	11+701	4631	77	21,54	113	115	45	28
3	11+701	16+500	4799	57	15,95	83	88	31	28
4	16+500	20+906	4406	88	25,46	130	133	41	29

En la Figura 83 se presenta las deflexiones en las calzadas derecha e izquierda y su deflexión característica. En los primeros 7 kilómetros existe una diferencia de 40 micras entre datos de calzadas; luego, hasta el kilómetro 11.80 hay un desfase entre deflexiones y por último hasta llegar a los 21 kilómetros se presentan valores similares de deflexiones.

Figura 83

Deformaciones Características, Calzada Derecha e Izquierda



Para cada sección homogénea se realizó un promedio entre las deflexiones para simplificar el análisis del retrocálculo. A continuación, presentamos las gráficas del cuenco de deflexiones por calzada.

Figura 84

Cuenca de deflexiones Calzada Derecha

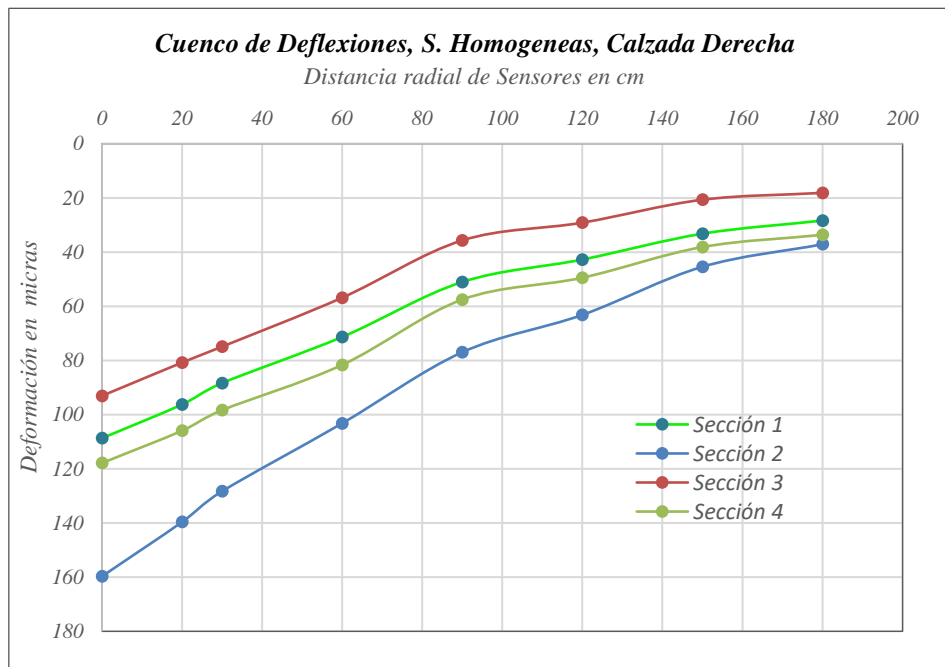
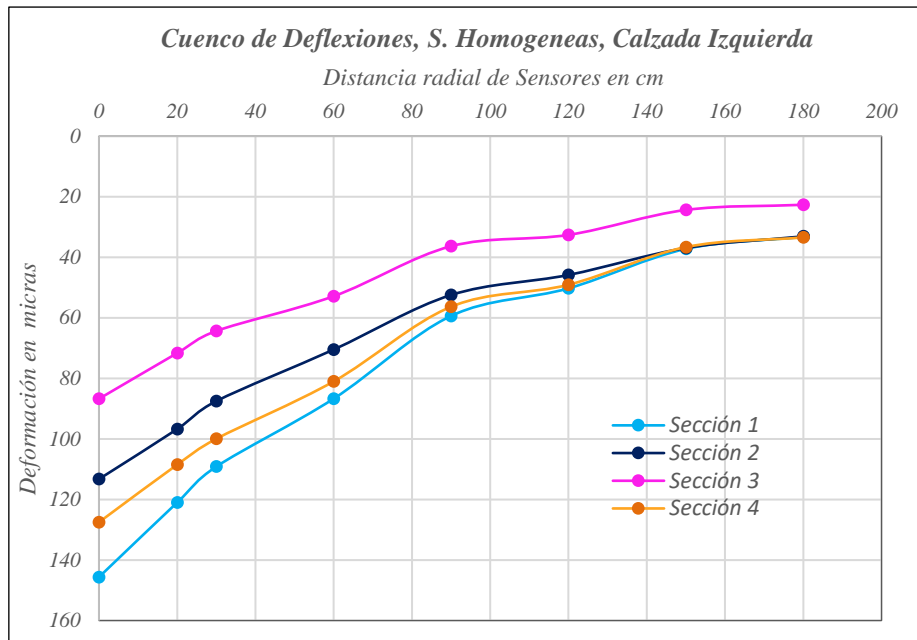


Figura 85

Cuenca de deflexiones Calzada Izquierda



No se puede realizar una comparación de cuencos de deflexión entre secciones homogéneas de las calzadas ya que las abscisas no coinciden entre secciones, pero se observa que las dos tienen valores similares mínimos y máximos de 90 y 150 micrones respectivamente.

5.3 Tráfico.

De los estudios de tráfico entregados por el MTOP con el conteo vehicular realizado en el año 2018 se pudo obtener el TPDA. En base a la Tabla 11 se calculó la proyección de tráfico para el año 2022 para cada redondel del tramo El Salado – Guangarcucho, como se indica a continuación:

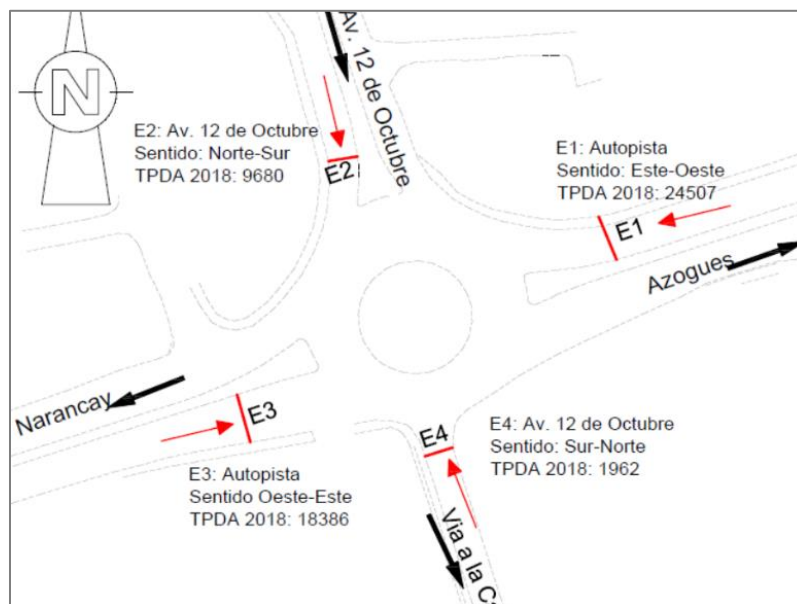
Tabla 31

Datos de Tráfico Redondel 12 de Octubre

TPDA; Intercambiador de Trafico, Redondel 12 de Octubre									
Calzada Izquierda					Calzada Derecha				
Estación de Conteo E1	Vehículos Conteo	Año 2022	Clase FHWA	%	Estación de Conteo E3	Vehículos Conteo	Año 2022	Clase FHWA	%
	Bus	494	4	22,0%		Bus	573	4	25,9%
Estación de Conteo Sentido Este-Oeste (Cuenca - Guangarcucho)	2DB	1200	5	53,5%	Estación de Conteo Sentido Oeste - Este (Guangarcucho - Cuenca)	2DB	1114	5	50,4%
	3A	249	6	11,1%		3A	298	6	13,5%
	2S2	30	8	1,3%		2S2	15	8	0,7%
	3S2	271	9	12,1%		3S2	210	9	9,5%
TOTAL		2243		100,0%	TOTAL		2210		100,0%

Figura 86

Redondel 12 de Octubre



Fuente: MTOP Zonal 6

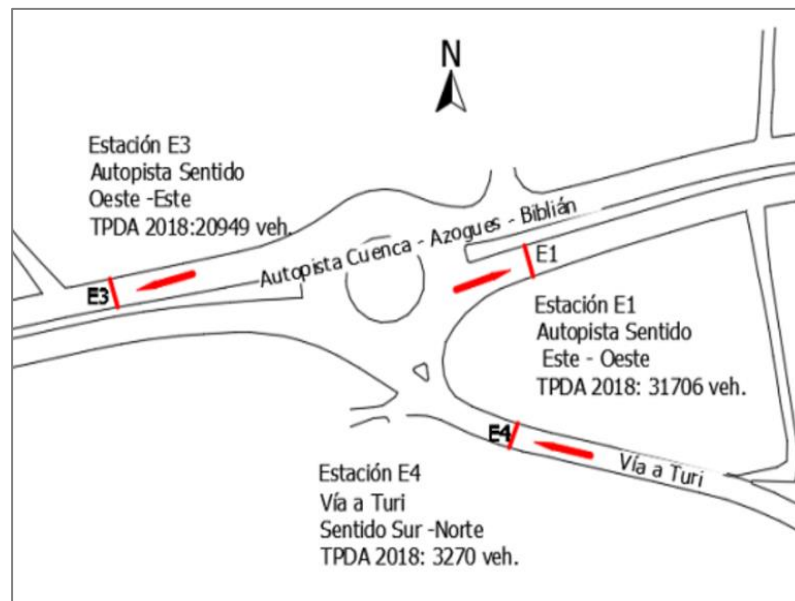
Tabla 32

Datos de Tráfico Redondel Turi

TPDA, Intercambiador de Trafico, Redondel Turi									
Calzada Izquierda					Calzada Derecha				
Estación de Conteo E1	Vehículos Conteo	Año 2022	Clase FHWA	%	Estación de Conteo E3	Vehículos Conteo	Año 2022	Clase FHWA	%
	Bus	606	4	22,9%		Bus	641	4	27,8%
Estación de Conteo Sentido Este-Oeste (Cuenca - Guangarcucho)	2DB	1382	5	52,3%	Estación de Conteo Sentido Oeste - Este (Guangarcucho - Cuenca)	2DB	1130	5	49,0%
	3A	329	6	12,5%		3A	295	6	12,8%
	2S2	22	8	0,8%		2S2	22	8	0,9%
	3S2	303	9	11,5%		3S2	217	9	9,4%
TOTAL		2643		100,0%	TOTAL		2305		100,0%

Figura 87

Redondel 12 de Turi



Nota: En el gráfico se observa un error en E3 está en lugar de E1.

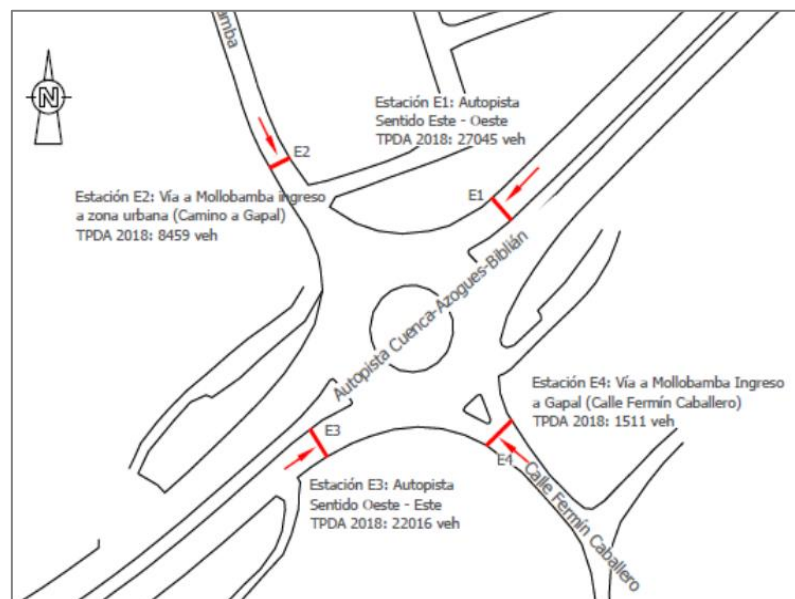
Tabla 33

Datos de Tráfico Redondel Gapal

TPDA, Intercambiador de Trafico, Redondel Gapal									
Calzada Izquierda					Calzada Derecha				
Estación de Conteo E1	Vehículos Conteo	Año 2022	Clase FHWA	%	Estación de Conteo E3	Vehículos Conteo	Año 2022	Clase FHWA	%
	Bus	523	4	20,7%		Bus	489	4	21,0%
Estación de Conteo Sentido Este-Oeste (Cuenca - Guangarcucho)	2DB	1288	5	51,1%	Estación de Conteo Sentido Oeste - Este (Guangarcucho - Cuenca)	2DB	1129	5	48,5%
	3A	402	6	15,9%		3A	440	6	18,9%
	2S2	26	8	1,0%		2S2	25	8	1,1%
	3S2	283	9	11,2%		3S2	245	9	10,5%
TOTAL		2522		100,0%	TOTAL		2328		100,0%

Figura 88

Redondel Gapal



Fuente: MTOP Zonal 6

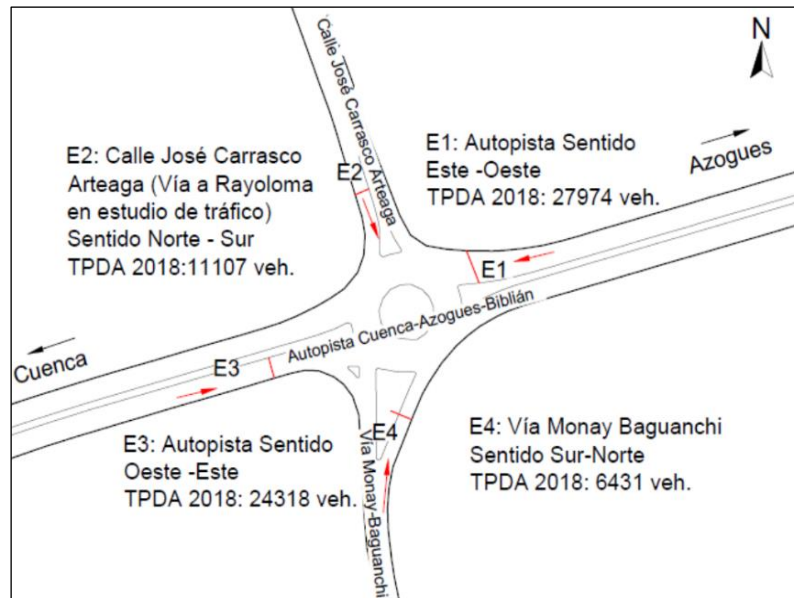
Tabla 34

Datos de Trafico Redondel Gapal

TPDA, Intercambiador de Trafico, Redondel IESS									
Calzada Izquierda					Calzada Derecha				
Estación de Conteo E1	Vehículos Conteo	Año 2022	Clase FHWA	%	Estación de Conteo E3	Vehículos Conteo	Año 2022	Clase FHWA	%
	Bus	493	4	17,7%		Bus	468	4	19,2%
Estación de Conteo Sentido Este-Oeste (Cuenca - Guangarcucho)	2DB	1514	5	54,4%	Estación de Conteo Sentido Oeste - Este (Guangarcucho - Cuenca)	2DB	1301	5	53,3%
	3A	376	6	13,5%		3A	387	6	15,9%
	2S2	52	8	1,9%		2S2	37	8	1,5%
	3S2	347	9	12,5%		3S2	247	9	10,1%
TOTAL		2781		100,0%	TOTAL		2439		100,0%

Figura 89

Redondel IESS



Fuente: MTOP Zonal 6

Los datos de tráfico (TPDA) de los redondeles mencionados son analizados para utilizar en el diseño de la sobrecarpeta. Los datos completos de tráfico se encuentran en los respectivos anexos que nos servirán para el ingreso en el programa MEPDG.

5.4 Retrocálculo.

Para la obtención de los módulos elásticos de la estructura del pavimento existente se analizó con cuatro métodos de retrocálculo descritos anteriormente los cuales son AASHTO 93, YONAPAVE, EVERCALC Y ELLEA1. Los valores obtenidos del Mrr de la subrasante se detallan en la Tabla 35. Los valores más altos son los obtenidos por el método AASHTO 93 y los más bajos son obtenidos por el software EVERCALC, pero entre los tres métodos YONAPAVE, EVERCALC Y ELLEA1 presentan valores relativamente similares.

Tabla 35

Resultado de Módulos de la Subrasante

CALZADA	ABSCISA		MODULO Mrr, DE LA SUBRASANTE			
			YONAPAVE	AASHTO 93	EVERCALC	ELLEAI
DERECHO	0+000	7+801	57	73	49	56
	7+801	10+001	40	55	35	41
	10+001	15+602	74	121	62	74
	15+602	21+003	49	65	40	47
IZQUIERDO	0+000	7+300	51	67	36	40
	7+300	11+701	60	68	38	49
	11+701	16+901	84	102	56	79
	16+901	20+906	52	68	34	42

En varios estudios realizados se ha observado que utilizan el método AASHTO 93 considerando el sensor con una distancia radial de 180 cm, pero no realizan la comprobación de $r \geq a_e$. Se ha seguido minuciosamente los procedimientos para los dos métodos directos AASHTO 93 y YONAPAVE que determinan los módulos de la subrasante, su correlación se observa en la Figura 90 y Figura 91.

Figura 90

Correlación YONAPAVE vs AASHTO, C. Der.

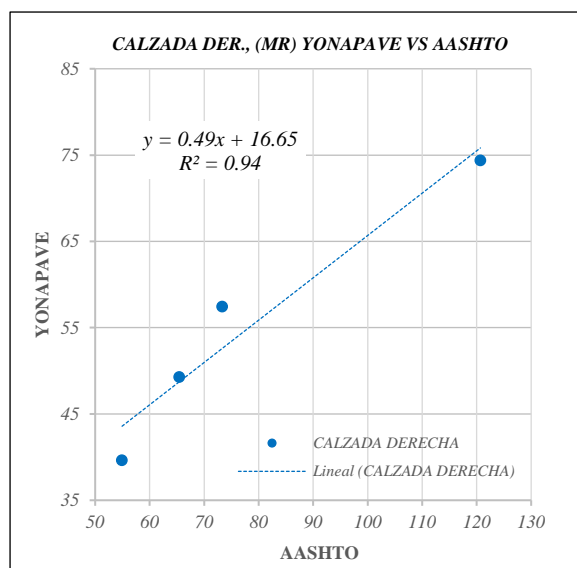
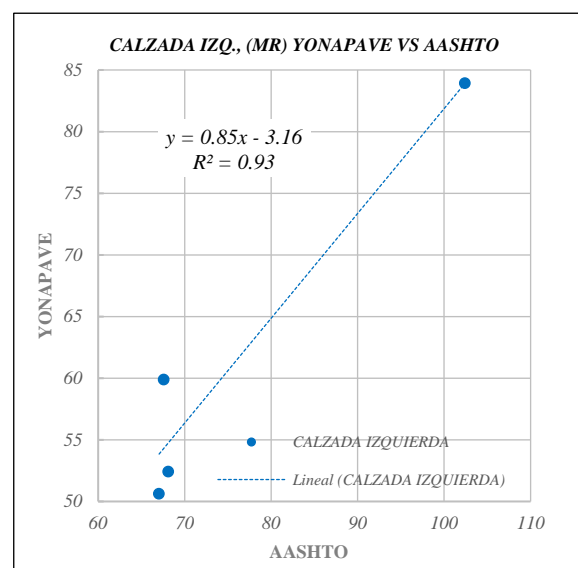


Figura 91

Correlación YONAPAVE vs AASHTO, C. Izq.



Con el programa EVERCALC se calculó los módulos elásticos considerando una capa rígida; este programa utiliza el procedimiento del método AASHTO 93 para la evaluación del módulo de la subrasante. En la Figura 93 y Figura 92 se observa su correlación.

Figura 93

Correlación EVERCALC vs AASHTO, C. Der.

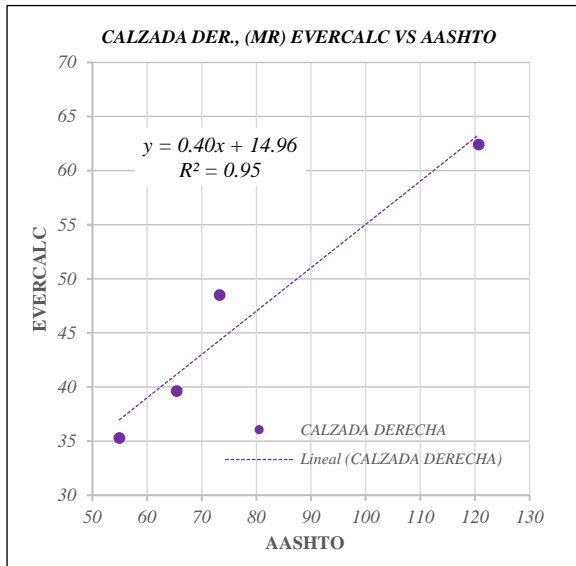
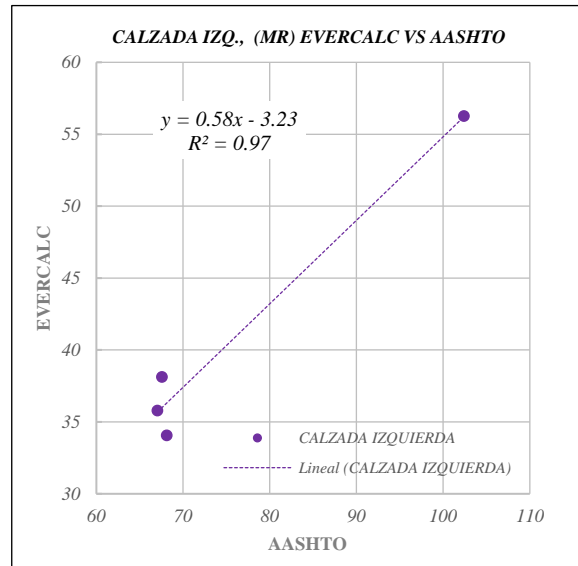


Figura 92

Correlación EVERCALC vs AASHTO, C. Izq.



Entre los métodos AASHTO 93 y ELLEA1 hay una muy buena correlación de módulos de la subrasante, como se observa en las Figura 94 y Figura 95.

Figura 94

Correlación ELLEA1 vs AASHTO, C. Der.

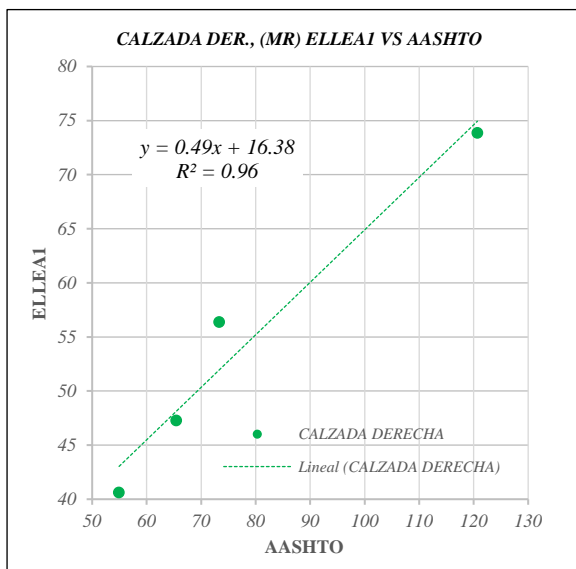
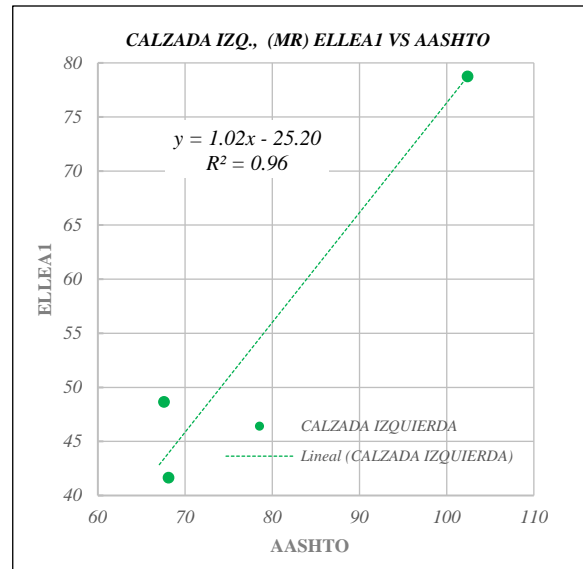


Figura 95

Correlación ELLEA1 vs AASHTO, C. Izq.



Con el programa ELLEA1 se realizó el cálculo considerando una capa rígida con la misma profundidad obtenida en EVERCALC obteniendo una correlación perfecta entre módulos de la subrasante, como se observa en la Figura 96 y Figura 97.

Figura 96

Correlación ELLEA1 vs EVERCALC, C. Der.

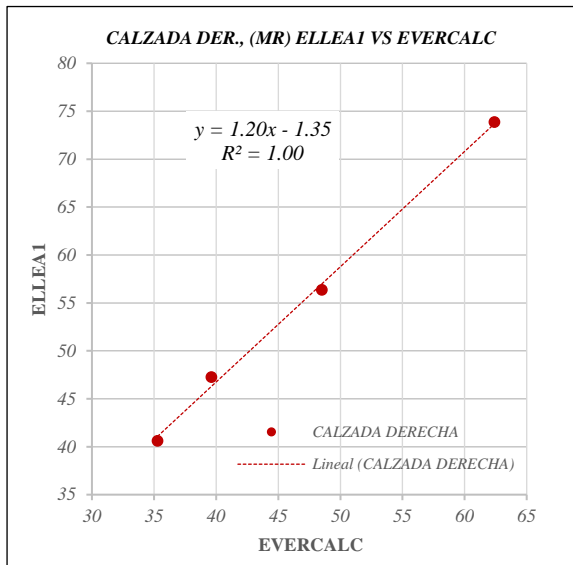
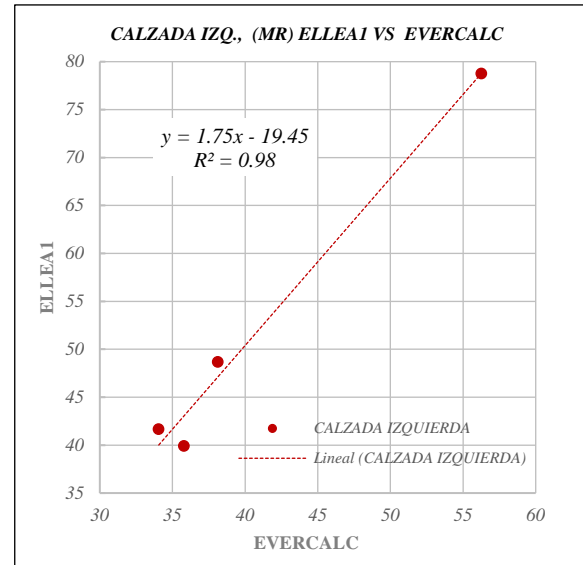


Figura 97

Correlación ELLEA1 vs EVERCALC, C. Izq.



En cuanto a los errores obtenidos en el cuenco de deflexiones que pertenecen a las deflexiones teóricas o calculadas, EVERCALC para la calzada derecha tiene un error promedio de 13 % y para la izquierda de un 11%. El programa ELLEA1 disminuye el error para la calzada derecha se tiene un promedio de 8% y para la izquierda 9%. Según la FWHA los módulos confiables se dicen que son cuando el error de las deflexiones teóricas es inferior al 3%. El programa ELLEA1 trabaja en tiempo real y automático por lo que nos presenta los errores por cada sensor sísmico. Como se observa en la Tabla 36. El sensor D0 corresponde al módulo de la carpeta asfáltica donde para ajustar la deflexión calculada se necesita un módulo más alto, pero aún hay que ajustar el módulo de la carpeta asfáltica por temperatura y es necesario tener en consideración valores de módulos dentro del rango normal para cada material.

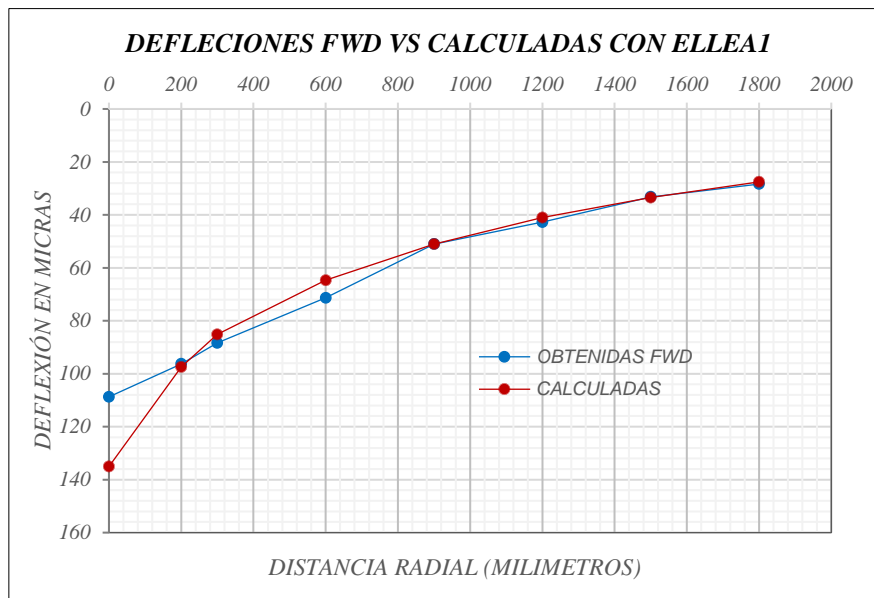
Tabla 36

ELLEA1, Deflexiones y Errores

Sensor #	FWD Medida (micrón)	Desplazamiento Radial (mm)	Calculados (micrón)	Error
D0	108,73	0	135,06	24,22%
D1	96,27	200	97,46	1,24%
D2	88,37	300	85,14	3,65%
D3	71,33	600	64,71	9,28%
D4	51,03	900	51,04	0,02%
D5	42,75	1200	41,04	3,99%
D6	33,22	1500	33,46	0,71%
D7	28,37	1800	27,54	2,92%
Error Total				5,75%

Figura 98

Deflexiones Medidas FWD vs Calculadas con ELLEA1



En la Figura 98 se observa que las deflexiones calculadas de las capas granulares y subrasante tienen un muy buen ajuste. Condición aceptable para ser utilizadas en el análisis de rehabilitación.

5.5 Número estructural efectivo *S_{Nef}*.

El número estructural efectivo se obtuvo para cada sección homogénea se calculó con los métodos de YONAPAVE y AASHTO 93 usando las ecuaciones 33 y 38. Los valores obtenidos comparados entre sí varían en un 20% aproximadamente y sus resultados se pueden observar en la Tabla 37. El análisis de la rehabilitación de la estructura del pavimento se la realiza con el MEPDG, por lo que no se necesita el *S_{Nef}* para este fin.

Tabla 37

Número Estructural SNef

CALZADA	ABSCISA		NÚMERO ESTRUCTURAL SNef	
			YONAPAVE	AASTHO 93
DERECHO	0+000	7+801	6,68	8,22
	7+801	10+001	5,74	6,89
	10+001	15+602	6,44	8,04
	15+602	21+003	6,92	7,75
IZQUIERDO	0+000	7+300	5,17	7,54
	7+300	11+701	6,11	8,02
	11+701	16+901	6,31	8,51
	16+901	20+906	5,93	7,60

5.6 Correlación pruebas no destructivas vs destructivas.

Para realizar la comparación de datos entre los módulos retrocalculados y los obtenidos con los datos de laboratorio se escogió abscisas similares para que los datos sean del mismo sitio con el detalle de que en algunos casos hay varios metros de diferencia.

Tabla 38

Valores de Mr Calzada Derecha

CALZADA	LABORATORIO		RETROCÁLCULO	
	Abscisas	Mr	Abscisas	Mrr
DERECHA	0+991	104,09	1+008	201,22
	1+202	33,19	1+201	167,86
	1+402	73,18	1+390	44,07
	1+595	24,87	1+600	65,17
	3+437	76,76	3+401	26,74
	8+394	28,09	8+400	69,34
	8+607	26,28	8+608	10,54
	9+256	33,60	9+200	75,92

Tabla 39

Valores de Mr Calzada Izquierda

CALZADA	LABORATORIO		RETROCÁLCULO	
	Abscisas	Mr	Abscisas	Mrr
IZQUIERDA	1+076	57,97	1+095	117,85
	1+262	29,41	1+298	83,37
	1+463	73,45	1+501	49,84
	5+492	47,50	5+499	36,16
	5+703	41,95	5+697	160,27
	8+440	84,17	8+500	55,30
	8+921	22,43	8+897	34,79
	9+125	26,28	9+098	48,30
	9+352	38,65	9+300	47,15

Como se observa Figura 99 y Figura 100 no hay correlación entre datos con el FWD y laboratorio puesto que es difícil conseguir correlación si los módulos obtenidos son determinados con conceptos diferentes o el lugar donde se tomó las deflexiones no coincide con el lugar que se tomaron las muestras para examinarlas en el laboratorio.

Figura 99

Correlación Carril Derecho

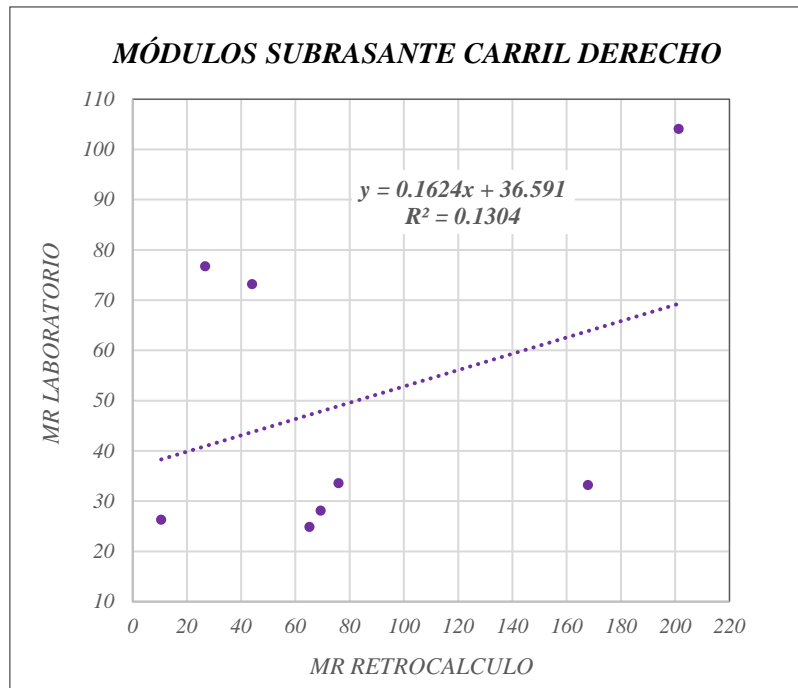
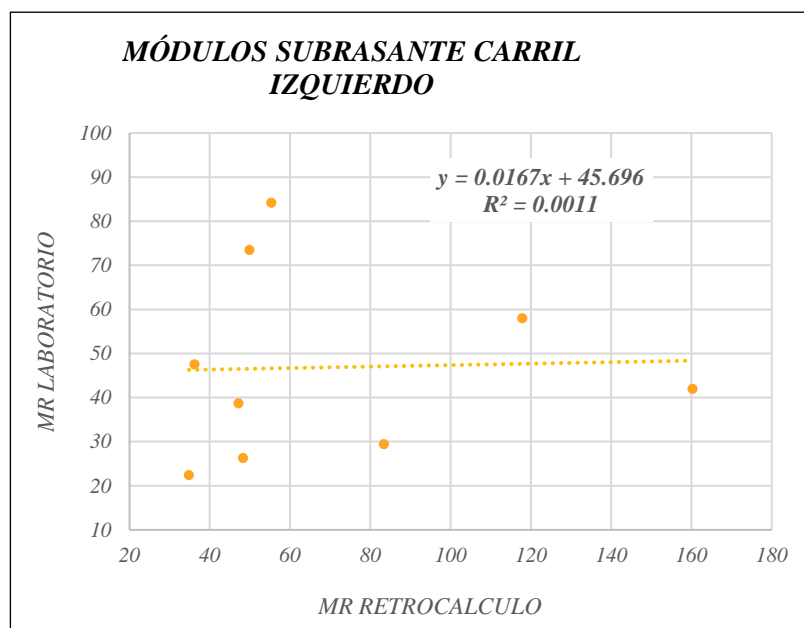


Figura 100

Correlación Carril Izquierdo



5.7 Diseño Empírico Mecanicista MEPDG AASHTO 2008

Para los 21 kilómetros de longitud que tiene el tramo El Salado – Guangarcucho se analizaron los datos de tráfico de cada redondel (12 de octubre, Turi, Gapal e IESS), espesores de capa asfáltica y secciones homogéneas. Esto llevo a realizar 2 sub tramos por calzada y en total 4 sub tramos para el diseño de la rehabilitación. Se ven los valores del TPDA de cada sub tramo y sus porcentajes, como se indica en la Tabla 40. En la Tabla 41 nos indica los espesores, temperatura y módulos de los sub tramos.

Tabla 40

TPDA Para Diseño de Rehabilitación

Calzada	Tramos	Descripción	Abcisas (km)		Tráfico Calzadas		Total	Porcentaje	
			Desde	Hasta	Izquierda	Derecha		Izquierda	Derecha
Derecha	TCD1	El Salado - Gapal	0+000	5+350	2643	2328	4971	53,17%	46,83%
	TCD2	Gapal - Guangarcucho	5+350	20+800	2522	2439	4961	50,83%	49,17%
Izquierda	TCI1	Gapal - El Salado	0+000	5+350	2643	2328	4971	53,17%	46,83%
	TCD2	Guangarcucho - Gapal	5+350	20+800	2781	2439	5221	53,28%	46,72%

Tabla 41

Espesores y Módulos para el Diseño de rehabilitación

Calzada	Tramos	Espesores de Capas			T. °F	Módulos de Pavimento Existente PSI			
		Carpeta A.	Subbase	Mejoramiento		Carpeta A.	Subbase	Mejoramiento	Subrasante
Derecha	TCD1	36,90	26,00	47,00	85,89	593429	52156	21828	8173
	TCD2	28,30	26,00	47,00	89,62	573369	52965	11929	5889
Izquierda	TCI1	33,11	26,00	47,00	97,41	638878	53594	16244	5787
	TCI2	31,23	26,00	47,00	104,69	698349	61598	24113	6041

5.7.1 Diseño Sub Tramo TCD1

El Sub Tramo TCD1 inicia en la abscisa 0+000 hasta la abscisa 5+350 donde se plantea una sobrecarpeta de 7 pulgadas (17.78 cm) y los valores de confiabilidad son aprobados ya que todos superan el 95%. En la Figura 101 se presenta los espesores de la estructura final.

Figura 101

Estructura Diseñada, Tramo TCD1

Structure X

Surface short-wave absorptivity:

Layers

Layer	Type	Material	Thicknes	Interface	Rut(in)	Crack(%)
1	Asphalt	Asphalt concrete	7.0	1		
2	Asphalt	Asphalt concrete (existing)	14.5	1	0.25	
3	Granular Base	A-2-4	10.2	1	0.2	
4	Granular Base	A-2-4	18.5	1	0.2	
5	Subgrade	A-7-6	Semi-infini	n/a	0.15	

Opening Date: Design Life (years):

Flexible Rehabilitation

Rehabilitation Level:

Milled thickness (in):

Pavement rating:

Total Rutting (in):

Tabla 42

Resumen de Confiabilidad y Deterioros

Reliability Summary

<i>Performance Criteria</i>	<i>Distress Target</i>	<i>Reliability Target</i>	<i>Distress Predicted</i>	<i>Reliability Predicted</i>	<i>Acceptable</i>
Terminal IRI (in/mi)	222	95%	154,80	95,07%	221,72 Pass
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) (ft/mile):	800	95%	133,00	99,96%	462,27 Pass
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	6	95%	2,80	99,76%	4,67 Pass
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	300	95%	1,00	99,99%	108,00 Pass
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture)	25	95%			N/A
Permanent Deformation (AC Only) (in):	0,20	95%	0,05	99,99%	0,09 Pass
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	0,40	95%	0,05	99,99%	0,09 Pass

Figura 102

Índice de Regularidad Internacional

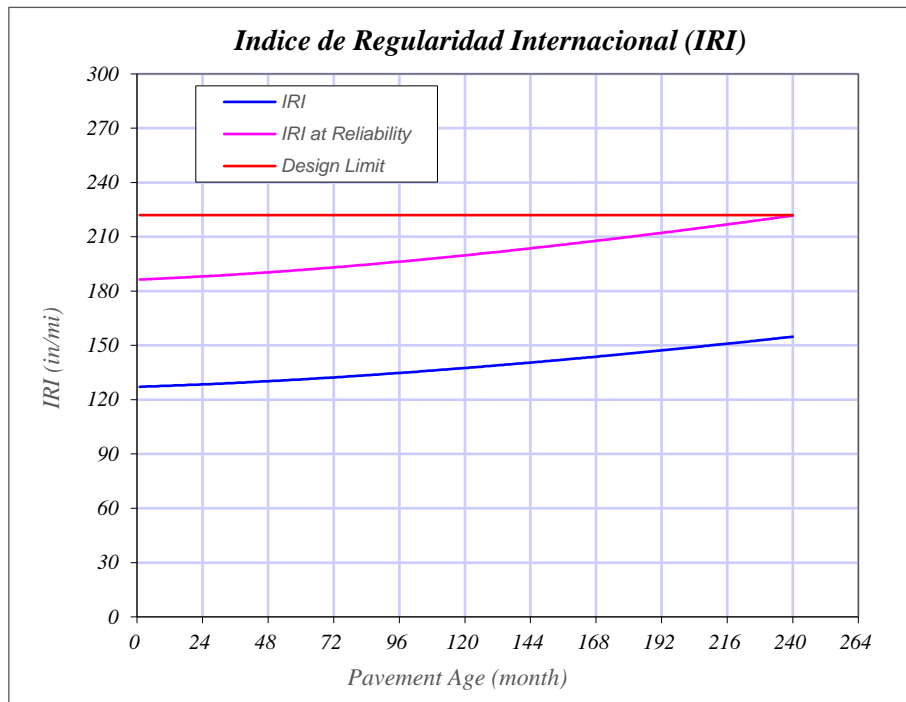


Figura 103

Agrietamiento de Arriba hacia Abajo

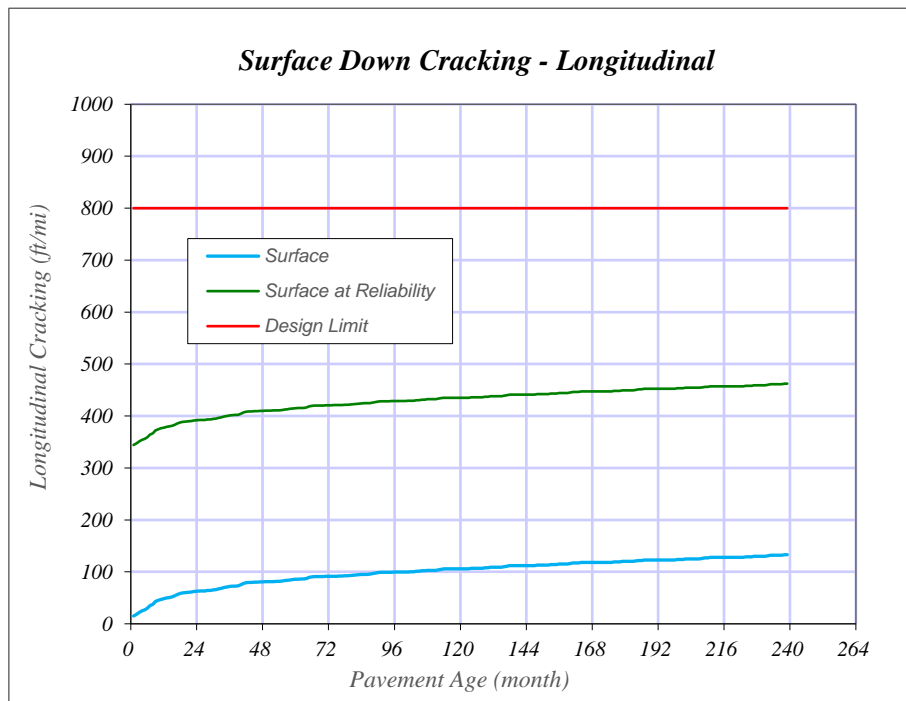


Figura 104

Agrietamiento de Abajo hacia Arriba

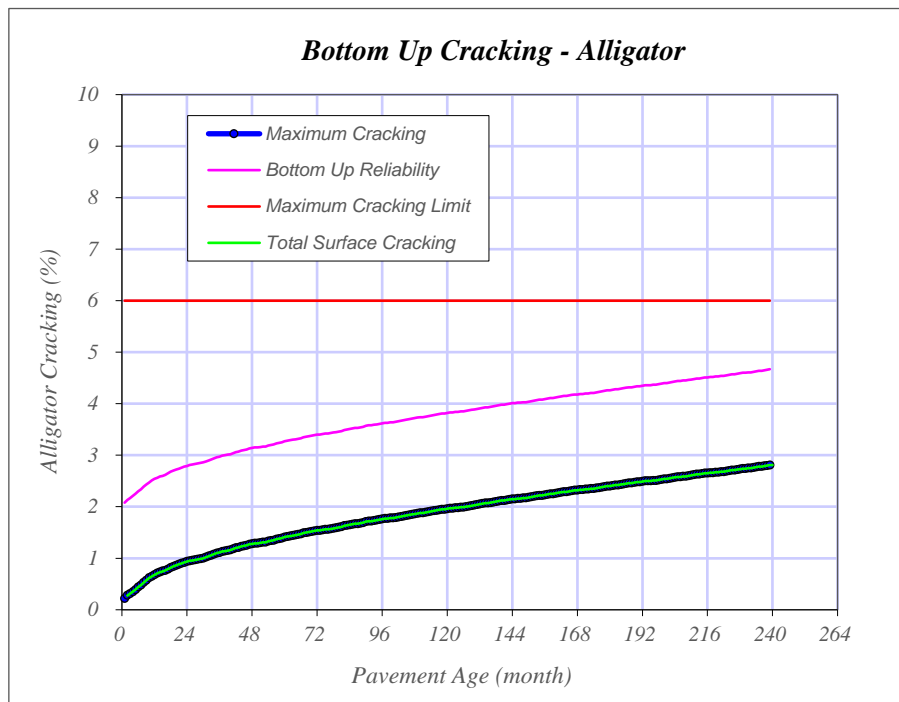


Figura 105

Agrietamiento Térmico

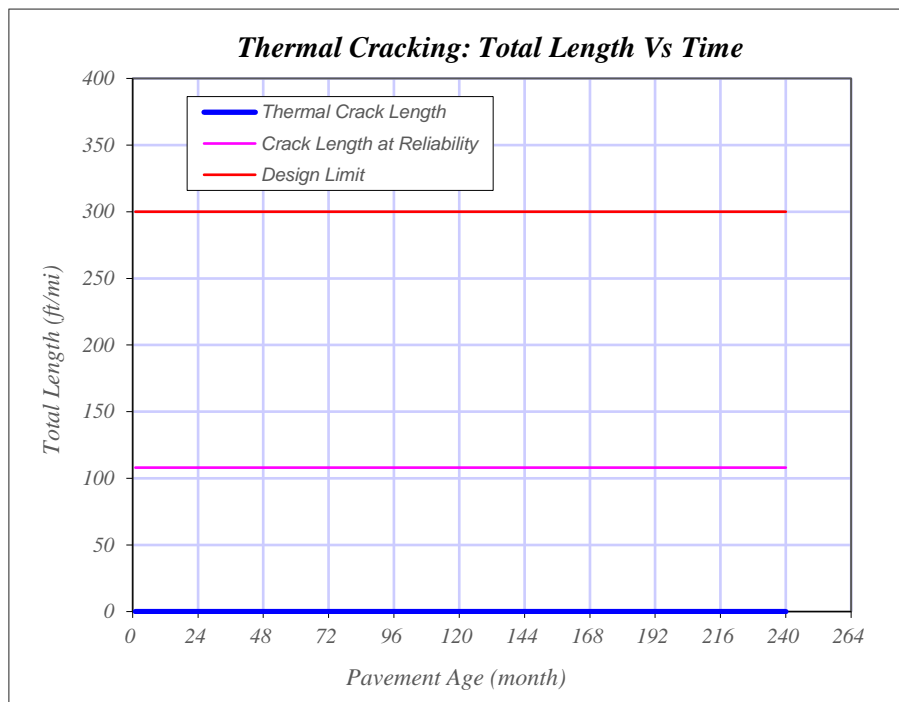
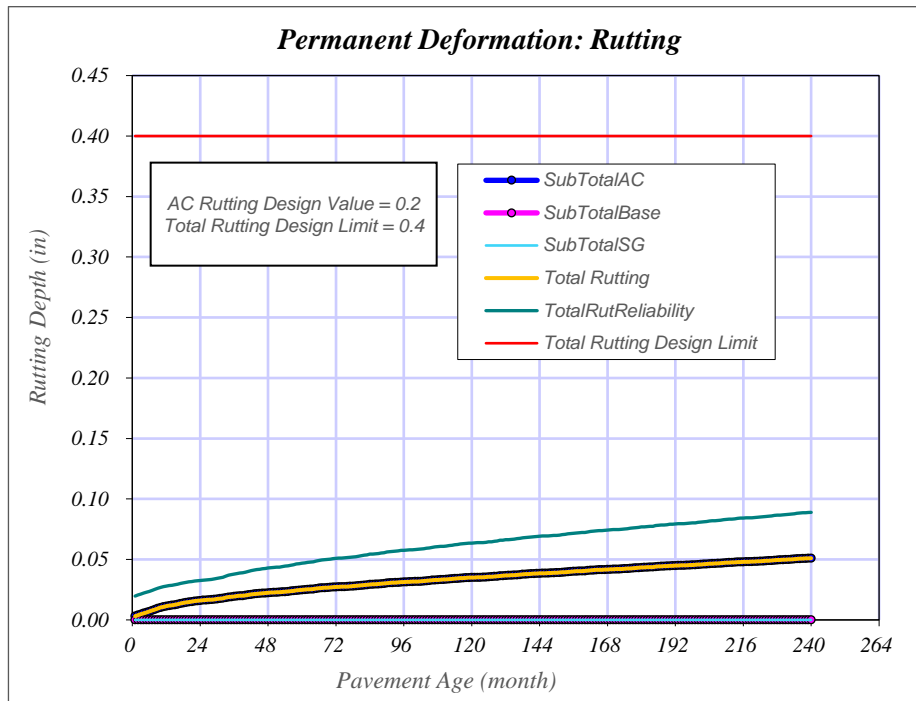


Figura 106

Deformación Permanente, Ahuellamiento.



5.7.2 Diseño Sub Tramo TCD2

El Sub Tramo TCD2 inicia en la abscisa 5+350 hasta la abscisa 20+800 donde se plantea una sobrecarpeta de 7 pulgadas (17.78 cm) y los valores de confiabilidad son aprobados ya que todos superan el 95%. En la Figura 101 se presenta los espesores de la estructura final.

Figura 107

Estructura Diseñada, Tramo TCD2

Structure ✕

Surface short-wave absorptivity:

Layers

Layer	Type	Material	Thicknes	Interface	Rut(in)	Crack(%)
1	Asphalt	Asphalt concrete	7.0	1		
2	Asphalt	Asphalt concrete (existing)	11.1	1	0.25	
3	Granular Base	A-2-4	10.2	1	0.2	
4	Granular Base	A-2-4	18.5	1	0.2	
5	Subgrade	A-7-6	Semi-infinit	n/a	0.15	

Opening Date: Design Life (years):

Flexible Rehabilitation

Rehabilitation Level:

Milled thickness (in):

Pavement rating:

Total Rutting (in):

Tabla 43

Resumen de Confiabilidad y Deterioros

Reliability Summary						
<i>Performance Criteria</i>	<i>Distress Target</i>	<i>Reliability Target</i>	<i>Distress Predicted</i>	<i>Reliability Predicted</i>		<i>Acceptable</i>
Terminal IRI (in/mi)	222	95,00%	154,40	95,21%	221,16	Pass
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) (ft/mile):	800	95,00%	57,40	99,99%	386,60	Pass
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	6	95,00%	2,40	99,94%	4,21	Pass
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	300	95,00%	1,00	99,99%	108,00	Pass
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture)	25	95,00%				N/A
Permanent Deformation (AC Only) (in):	0,2	95,00%	0,05	99,99%	0,09	Pass
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	0,4	95,00%	0,05	99,99%	0,09	Pass

Figura 108

Índice de Regularidad Internacional

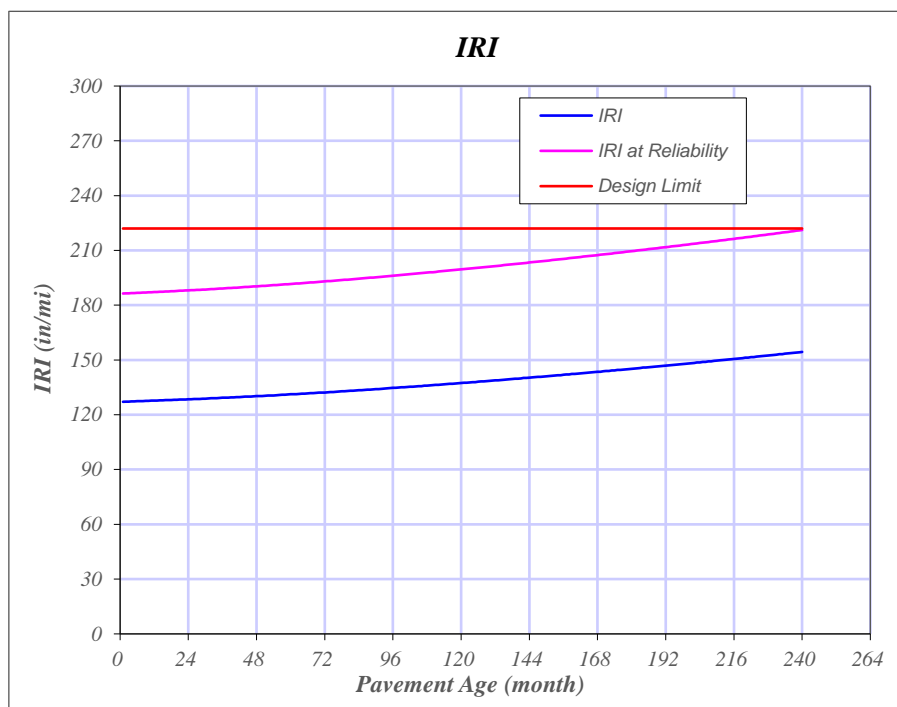


Figura 109

Agrietamiento de Arriba hacia Abajo

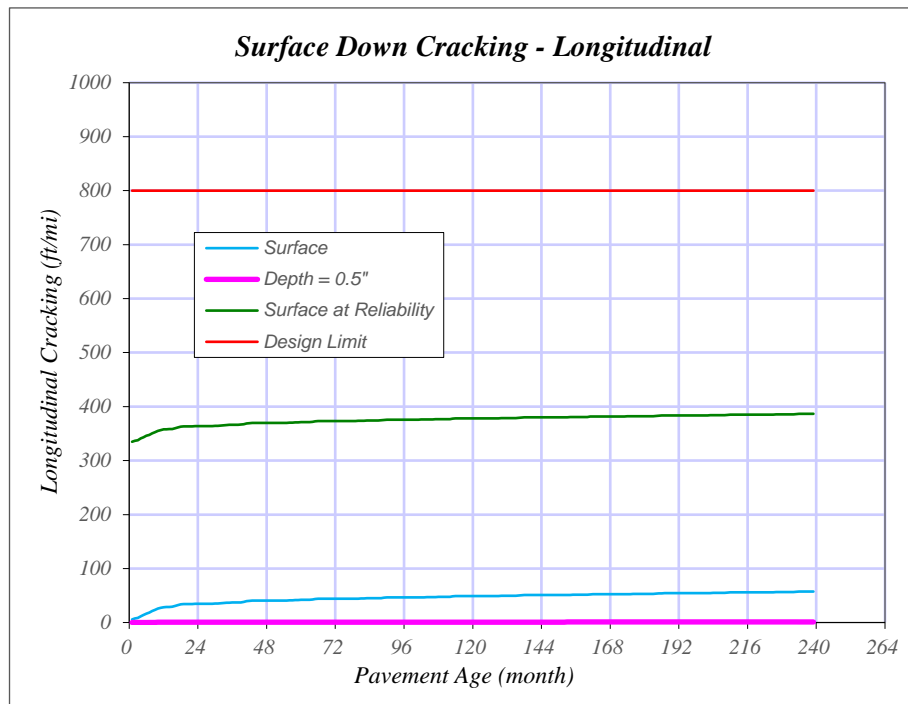


Figura 110

Agrietamiento de Abajo hacia Arriba

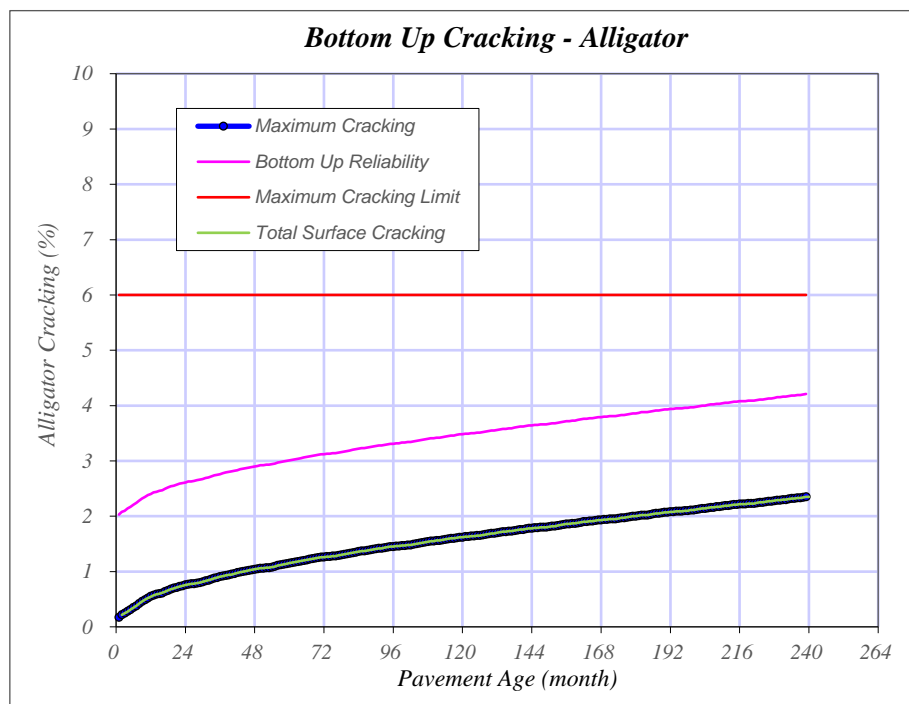


Figura 111

Agrietamiento Térmico

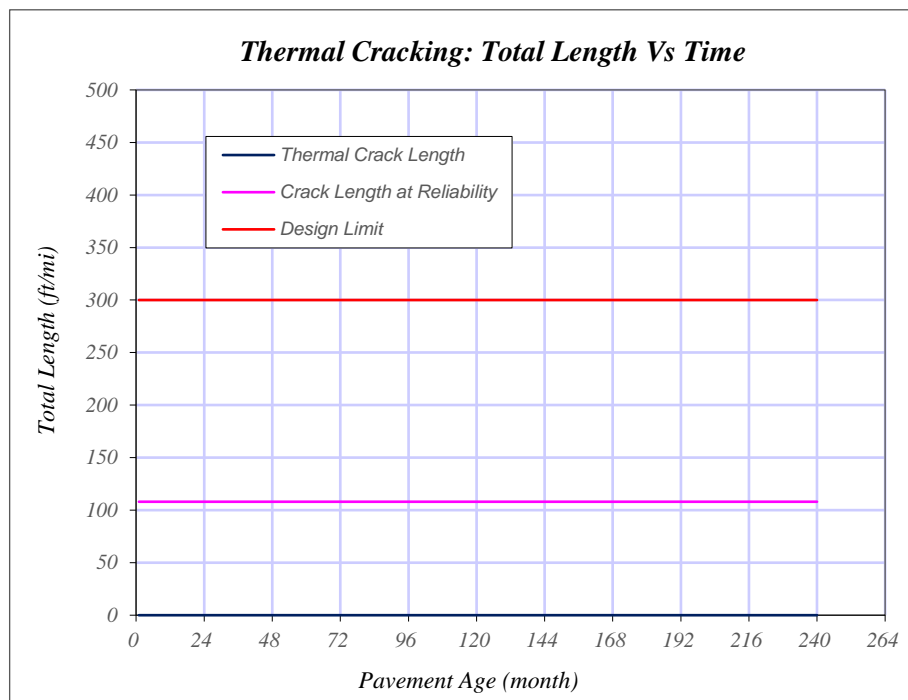
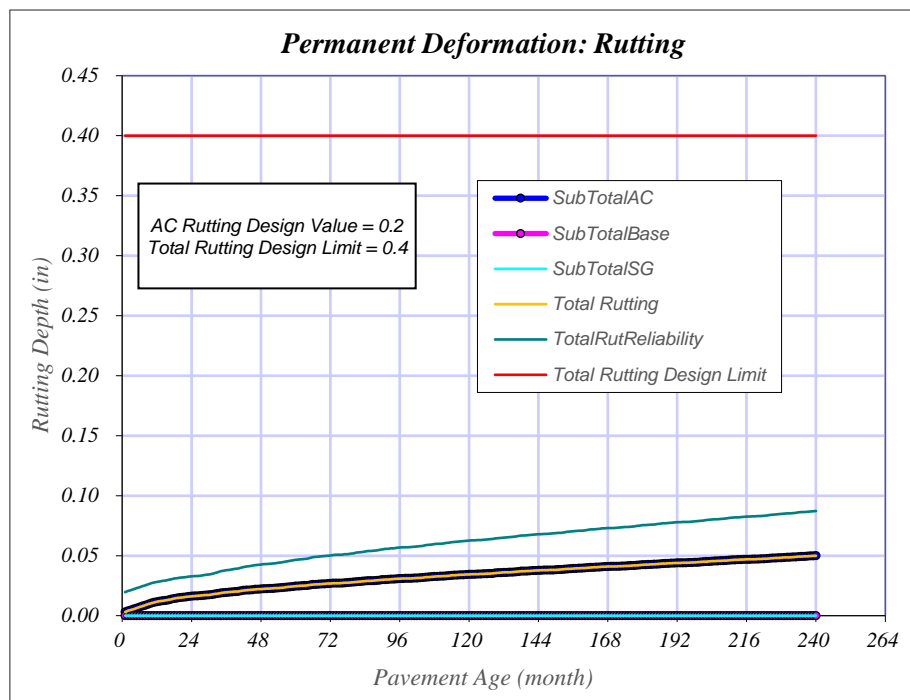


Figura 112

Deformación Permanente, Ahuellamiento



5.7.3 Diseño Sub Tramo TCI1

El Sub Tramo TCI1 inicia en la abscisa 0+000 hasta la abscisa 5+350 donde se plantea una sobrecarpeta de 7 pulgadas (17.78 cm) y los valores de confiabilidad son aprobados ya que todos superan el 95%. En la Figura 113 se presenta los espesores de la estructura final.

Figura 113

Estructura Diseñada, Tramo TCI1

The screenshot shows a software window titled 'Structure' with a close button (X) in the top right corner. It contains several input fields and a table:

- Surface short-wave absorptivity:
- Layers table:

Layer	Type	Material	Thicknes	Interface	Rut(in)	Crack(%)
1	Asphalt	Asphalt concrete	7.0	1		
2	Asphalt	Asphalt concrete (existing)	13.0	1	0.25	
3	Granular Base	A-2-4	10.2	1	0.2	
4	Granular Base	A-2-4	18.5	1	0.15	
5	Subgrade	A-7-6	Semi-infinit	n/a	0.2	
- Buttons: Insert, Delete, Edit
- Opening Date: Design Life (years): ...
- OK (green checkmark) and Cancel (red X) buttons.
- Flexible Rehabilitation section:
 - Rehabilitation Level:
 - Milled thickness (in):
 - Pavement rating:
 - Total Rutting (in):

Tabla 44

Resumen de Confiabilidad y Deterioros

Reliability Summary						
Performance Criteria	Distress Target	Reliability Target	Distress Predicted	Reliability Predicted	Acceptable	
Terminal IRI (in/mi)	222	95%	155,00	95,00%	221,99 Pass	
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) (ft/mile):	800	95%	267,00	99,61%	596,74 Pass	
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	6	95%	0,90	99,99%	2,75 Pass	
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	300	95%	1,00	99,99%	108,00 Pass	
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture)	25	95%			N/A	
Permanent Deformation (AC Only) (in):	0,2	95%	0,06	99,99%	0,10 Pass	
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	0,4	95%	0,06	99,99%	0,10 Pass	

Figura 114

Índice de Regularidad Internacional

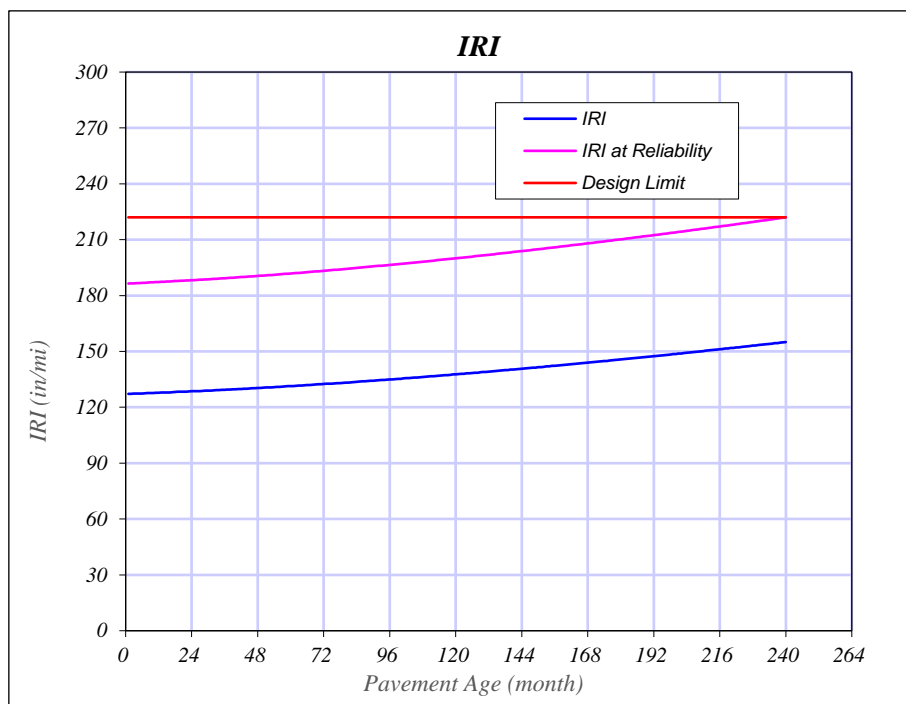


Figura 115

Agrietamiento de Arriba hacia Abajo

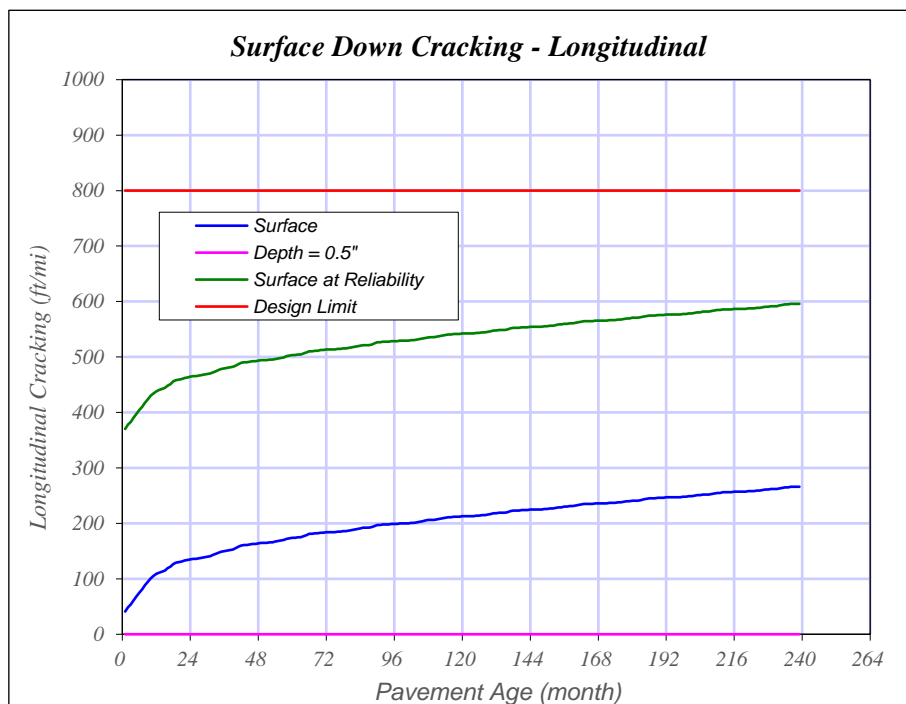


Figura 116

Agrietamiento de Abajo hacia Arriba

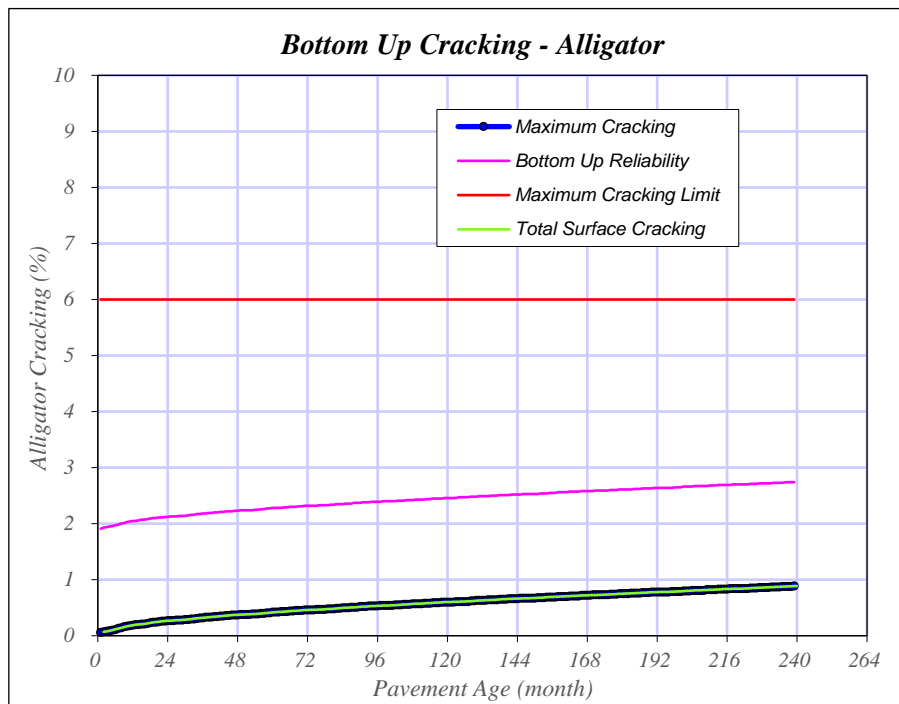


Figura 117

Agrietamiento Térmico

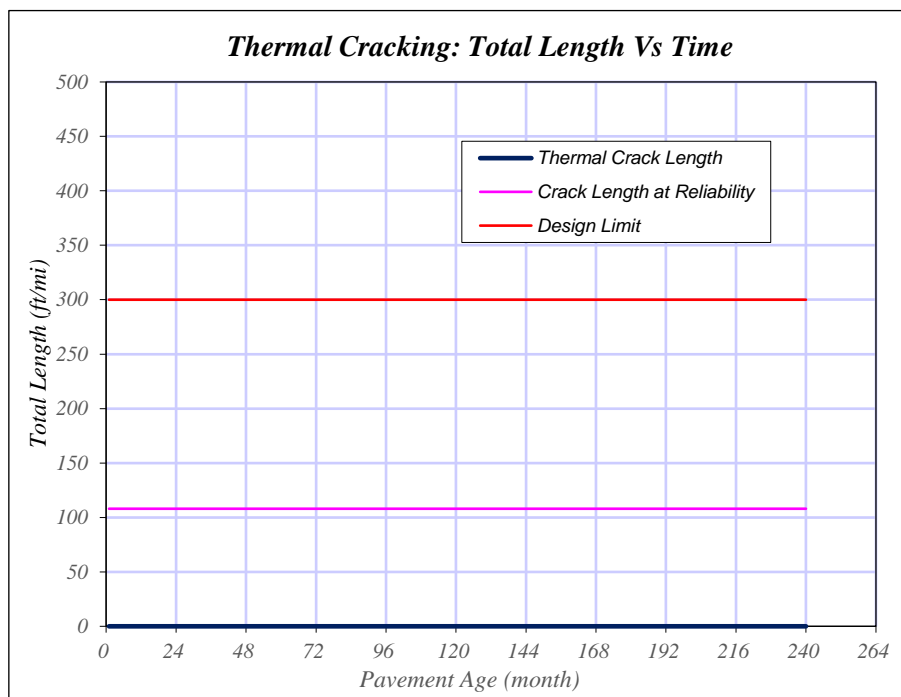
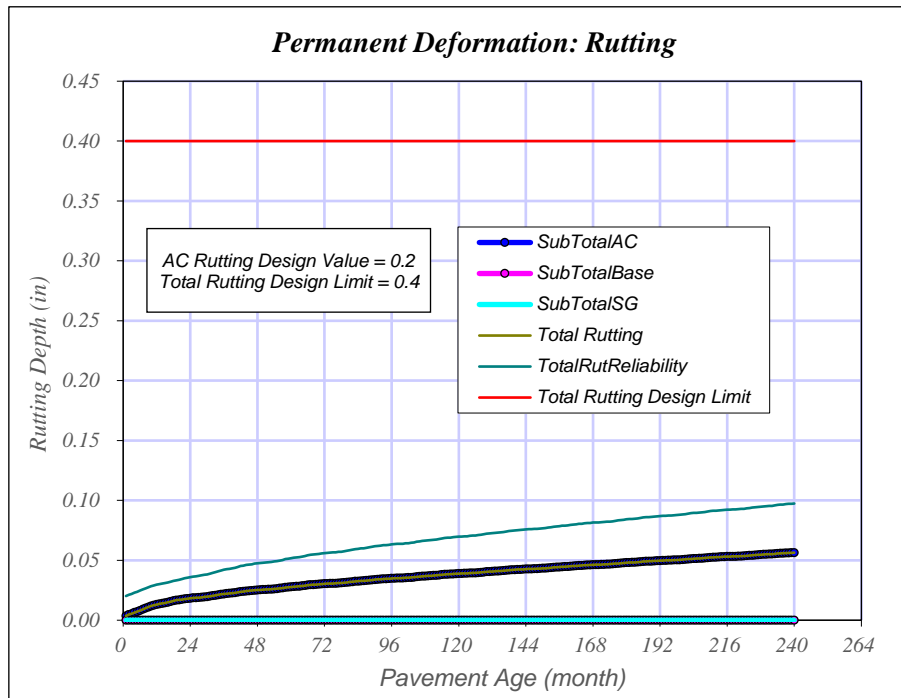


Figura 118

Deformación Permanente, Ahuellamiento



5.7.4 Diseño Sub Tramo TCI2

El Sub Tramo TCI2 inicia en la abscisa 5+350 hasta la abscisa 20+800 donde se plantea una sobrecarpeta de 8 pulgadas (20.32 cm) y los valores de confiabilidad son aprobados ya que todos superan el 95%. En la Figura 119 se presenta los espesores de la estructura final.

Figura 119

Estructura Diseñada, Tramo TCI2

Structure

Surface short-wave absorptivity:

Layers

Layer	Type	Material	Thicknes	Interface	Rut(in)	Crack(%)
1	Asphalt	Asphalt concrete	8.0	1		
2	Asphalt	Asphalt concrete (existing)	12.3	1	0.25	
3	Granular Base	A-2-4	10.2	1	0.2	
4	Granular Base	A-2-4	18.5	1	0.2	
5	Subgrade	A-7-6	Semi-infnit	n/a	0.15	

Insert Delete Edit

Opening Date: Design Life (years): ...

OK Cancel

Flexible Rehabilitation

Rehabilitation Level:

Milled thickness (in):

Pavement rating:

Total Rutting (in):

Tabla 45

Resumen de Confiabilidad y Deterioros

Reliability Summary						
<i>Performance Criteria</i>	<i>Distress Target</i>	<i>Reliability Target</i>	<i>Distress Predicted</i>	<i>Reliability Predicted</i>		<i>Acceptable</i>
Terminal IRI (in/mi)	222	95%	154,80	95,08%	221,66	Pass
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) (ft/mile):	800	95%	347,00	98,77%	678,74	Pass
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	6	95%	0,20	99,99%	2,09	Pass
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	300	95%	1,00	99,99%	108,00	Pass
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture)	25	95%				N/A
Permanent Deformation (AC Only) (in):	0,2	95%	0,06	99,99%	0,10	Pass
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	0,4	95%	0,06	99,99%	0,10	Pass

Figura 120

Índice de Regularidad Internacional

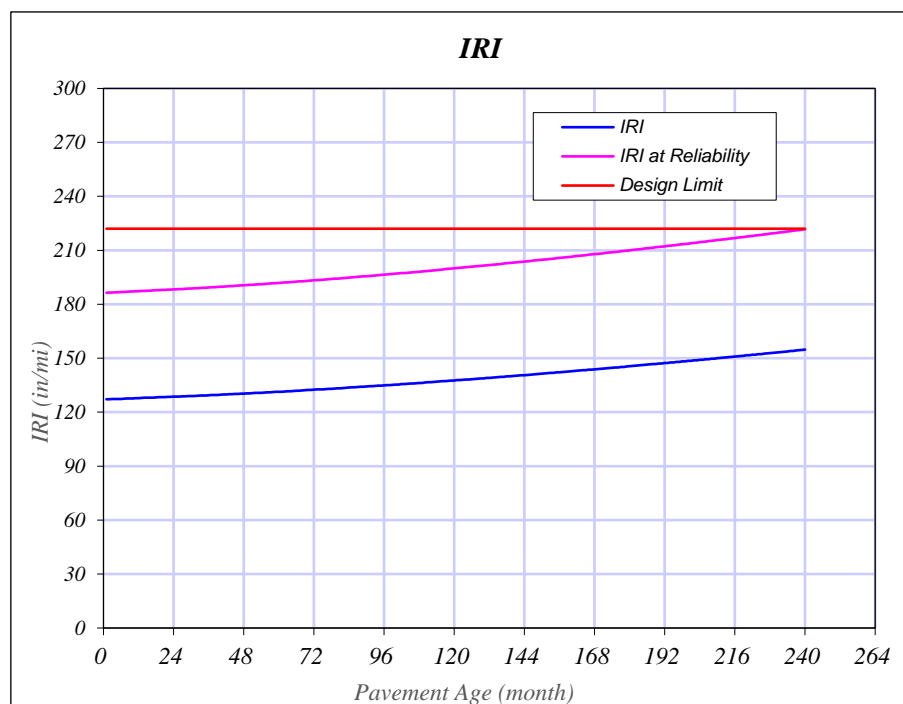


Figura 121

Agrietamientos desde Arriba hacia Abajo

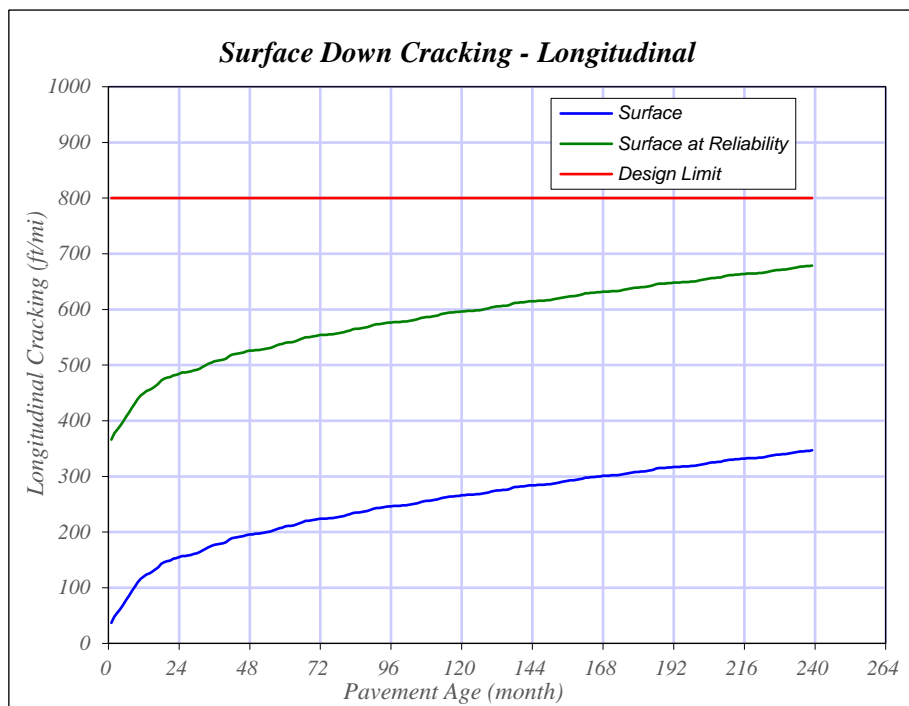


Figura 122

Agrietamientos desde Abajo hacia Arriba

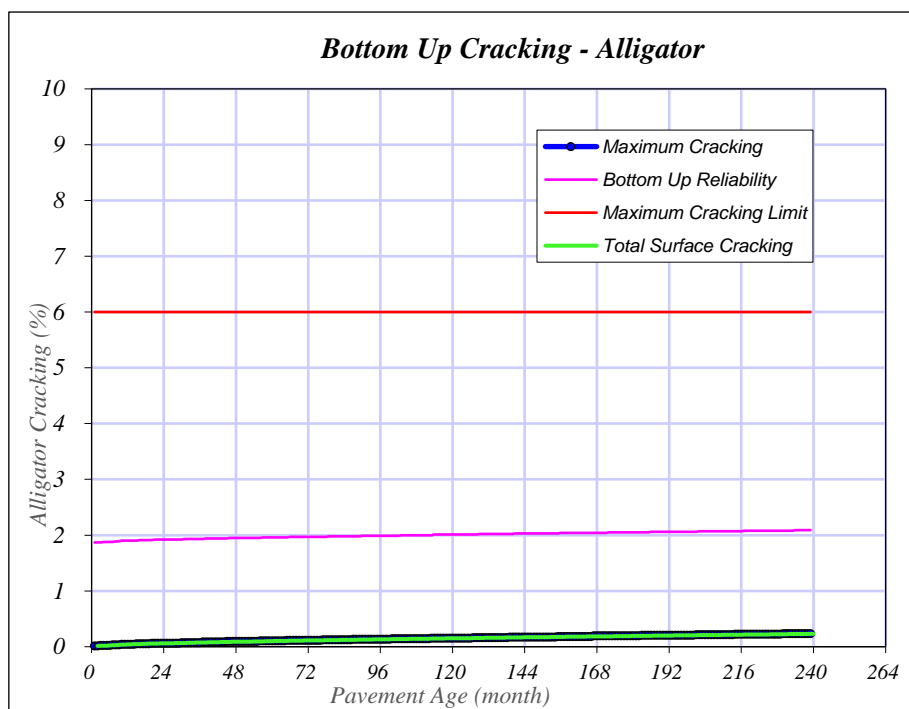


Figura 123

Agrietamientos Térmicos

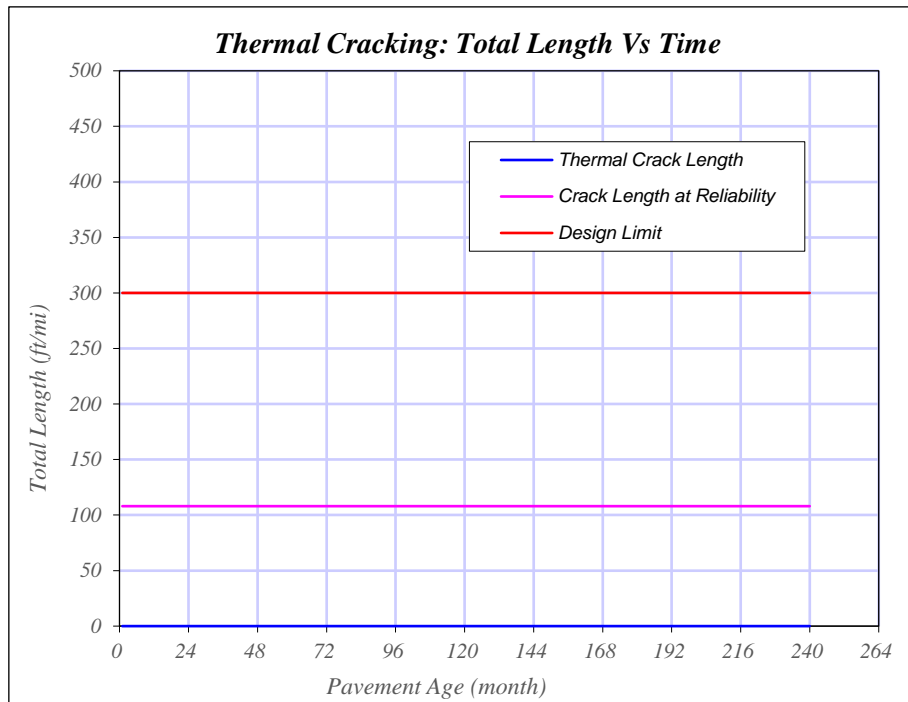
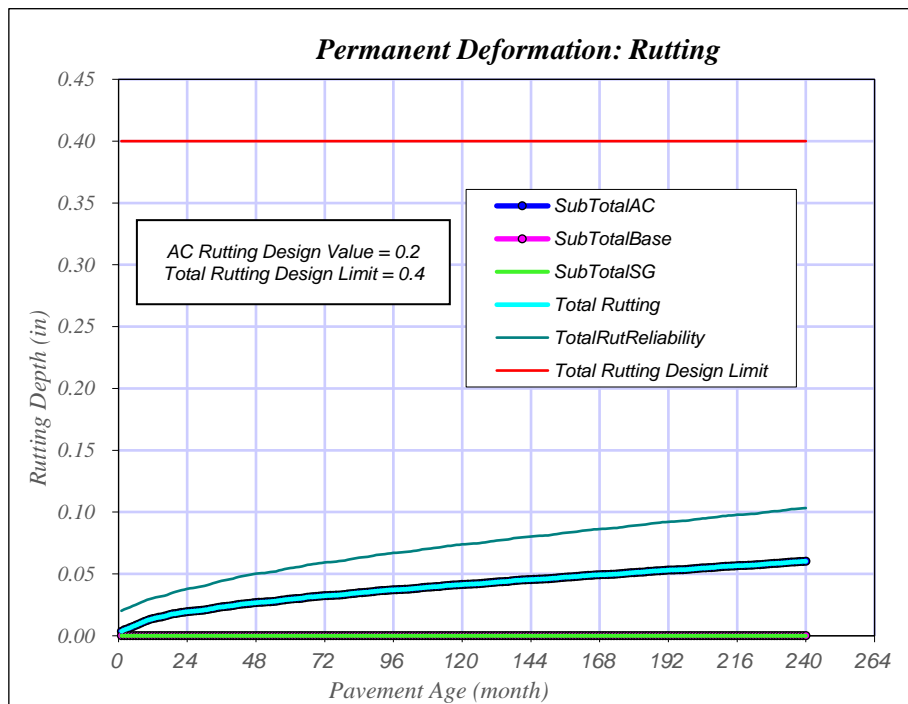


Figura 124

Deformación Permanente, Ahuellamientos



Los cuatro sub tramos diseñados tienen resultados generales similares. Para la predicción del índice de regularidad internacional (IRI) hay valores entre 154 a 155 pulgada por milla (2.43 a 2.45 m/Km). Para una confiabilidad del 95% tenemos valores similares de 221 pulgada por milla (349 m/km) inferiores al objetivo de 222 pies por milla. Recordamos que este parámetro está en función del IRI inicial, los agrietamientos y el ahuellamiento.

Los valores del agrietamiento longitudinal (arriba hacia abajo) van desde los 57 hasta 439 pies por milla (11 m/km a 83 m/km). Para una confiabilidad del 95% tenemos valores entre 386 a 770 pies por milla (73 m/km a 146 m/km); este deterioro está relacionado directamente con el número de repeticiones (fatiga) y las cualidades elásticas de la carpeta asfáltica (EHMA).

Los valores del agrietamiento en forma de piel de cocodrilo (alligator, de abajo hacia arriba) van desde los 0.30 hasta 2.80 por ciento. Para una confiabilidad del 95% tenemos valores entre 2.13 a 4.67 por ciento. Al igual que el agrietamiento longitudinal este deterioro está relacionado directamente con la fatiga del pavimento y las cualidades elásticas de la carpeta asfáltica (EHMA).

El agrietamiento transversal está relacionado directamente con las bajas temperaturas. En el cantón Cuenca no se registran temperaturas extremadamente bajas o ciclos de congelamiento o deshielo; por este motivo no existe predicción de agrietamiento transversal. El programa MEPDG calcula para la confiabilidad ingresada del 95%, un agrietamiento con un valor constante de 108 pies por milla (20 m/km).

La deformación permanente o plástica se mantienen en valores bajos con un un máximo de 0.06 pulgadas; esta deformación representa la deformación de la sobre carpeta porque la deformación de las capas granulares y subrasante ya está ingresada como dato asumido. La deformación calculada por el programa para una confiabilidad del 95% es de 0.10 pulgadas.

El IRI y los deterioros predichos cumplen con la confiabilidad propuesta para los cuatros diseños de los sub tramos del segmento El Saldo – Guangarcucho. Con esto se cumple el objetivo de una propuesta de rehabilitación para los próximos 20 años.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

Con el diseño de la sobre carpeta se cumple el objeto principal de este trabajo de titulación el cual es la propuesta de rehabilitación del tramo vial El Salado - Guangarcucho. No se ha realizado la consideración de una sobre carpeta de menor espesor para realizar un análisis de rehabilitación por etapas. Se tiene una idea clara de las dimensiones de la estructura vial propuesta que soportará el tráfico de camiones durante los próximos 20 años. Sin embargo, se tienen las siguientes conclusiones y recomendaciones a tomar en cuenta en futuros estudios viales.

El proyecto en estudio se encuentra en una cuenca intramontañosa la cual se ajusta paralelamente al margen de ríos que atraviesan el cantón de Cuenca razón por la cual está situada sobre depósitos aluviales (material por arrastre de ríos); también está constituida sobre depósitos coluviales (alteración y desprendimiento de los macizos rocosos). En sí, su trazado esta sobre una zona regular sin depresiones ni pendientes pronunciadas por lo se puede definir a la zona como topográficamente homogénea.

Se aplicaron las normas ASTM las cuales indican que, a nivel de proyecto, las pruebas deflectométricas se realicen de 50 a 200 metros. Por lo que, se recomienda determinar con anterioridad cada lugar donde se va a realizar el golpe con el deflectómetro observando que la superficie sea regular, limpia, sin obstáculos y que garantice datos precisos y confiables para poder pasar de tener que repetir la prueba a simplemente eliminarlos de los demás.

Se recomienda obtener las muestras deflectométricas cuando la temperatura del pavimento este a 21 °C o 70 °F aproximadamente para no tener que corregir los módulos de la carpeta asfáltica ya que existen varias formulaciones empíricas con resultados distantes.

Se determinaron 4 secciones homogéneas por calzada; el parámetro que asevera esta selección es el *coeficiente de variabilidad* que en todos los casos fue inferior al 30%. Dentro de las secciones homogéneas se eliminaron pruebas con valores erróneos en deflexiones o valores con ceros. En estas zonas se necesita un nuevo muestreo con intervalos más cortos donde se pueda analizar el problema y realizar una nueva interpretación de resultados.

Se utilizó el software EVERCALC para determinar los módulos las capas del pavimento el cual funciona con el ingreso de módulos semillas, recomendando realizar el retrocálculo por secciones homogéneas independientes para que no se mezclen secciones con materiales de diferentes cualidades elásticas.

Al modelar en primera instancia en el software EVERCALC se observan valores con módulos fuera de su rango normal y módulos de la subrasante mayores que los módulos de las capas granulares. Modelando con la opción de “Capa Rígida, Capa Saturada o Nivel Freático”, se obtiene valores de módulos normales que pertenecen a los materiales del pavimento.

Se determinaron los módulos de la subrasante con los métodos manuales YONAPAVE y AASHTO los cuales tienen una correlación con un R^2 de 0.93 (93%). El software EVERCALC y AASHTO tiene una correlación con un R^2 de 0.95 (95%). El software ELLEA1 con AASHTO tiene una correlación con un R^2 de 0.96 (96%). ELLEA1 comparando EVERCALC tiene menos error cuadrático; por esta razón se utilizó el primero para calcular todos los módulos de las capas que conforman la estructura del pavimento. Cabe recalcar que la correlación entre estos dos softwares tiene un R^2 igual a 1, perfecto.

Se utilizó ELLEA1 para obtener los módulos elásticos retrocalculados de la estructura del pavimento, pero EVERCALC es de gran ayuda al determinar la profundidad de la capa rígida.

El número estructural SN_{ef} se calculó con los métodos de YONAPAVE con valores entre 5 y 6 con el método AASHTO 93 los valores están entre 7 y 8; el segundo método es superior en un 20% aproximadamente ya que los valores aumentan y disminuyen de la misma manera que módulo resiliente de la subrasante de cada método. No existe una proporcionalidad entre el número estructural y módulos.

Para la calzada derecha e izquierda se realizó un análisis de datos destructivos y datos de laboratorio considerando que los datos tomados con FWD distan de los datos de laboratorio concluyendo que no existe correlación alguna. Para tener condiciones con fundamento se deben tomar datos con FWD y laboratorio sobre el mismo lugar. No se cumplió con esta condición por lo que todavía queda dudas en la correlación.

El periodo de diseño es importante ya que en este tiempo la estructura asfáltica debe estar en condiciones aceptables para la circulación vehicular y comodidad de los usuarios; en base a lo dicho no es necesario esperar que una vía se encuentre con deterioros máximos para considerar su rehabilitación. En los métodos empíricos lo más considerable en el desarrollo de su diseño es el número de ejes equivalentes. Para lograr un ajuste integro más cercano a la realidad es necesaria la inclusión de una solución mecanicista. Por tal motivo se propone una rehabilitación usando el método Empírico – Mecanicista MEPGD de la AASHTO 2008.

Para el ingreso de los módulos de la estructura del pavimento en el MEPDG se ingresaron los valores de la subrasante y capa de mejoramiento producto del proceso de retrocálculo. Los resultados de los módulos que corresponden a la subbase y capa asfáltica resultaron ligeramente elevados que los rangos normales, por tal motivo se ingresaron los recomendados en el programa 37000 psi (255 MPa) para la subbase y 435114 psi (3000 MPa) para la carpeta asfáltica existente.

El programa MEPDG es ampliamente utilizado por su versatilidad; sin embargo, su uso se limita a la obtención de todas las condiciones necesarias para su funcionamiento. Se utilizaron variables con valores predeterminados como: ajuste mensual de camiones, ajuste de espectro de carga (distribución de carga por ejes), entre otros. El ajuste más significativo es el climático del cual se realizó un archivo completo que refleje la realidad ambiental de la zona (Cuenca) el cual quizás es el limitante para que este método no sea utilizado a nivel de la ciudad o incluso a nivel nacional. Para futuras investigaciones se pueden hacer ajustes en la calibración del MEPDG que reflejen cada realidad vial.

Con el programa MEPDG se obtienen resultados de predicción de deterioros los cuales pueden ser calculados por etapas dentro de un periodo de diseño. Estos deterioros se pueden considerar en un programa de gestión de pavimentos para organizar su mantenimiento con una asignación muy exacta de fondos.

El programa MEPDG no pronostica la durabilidad y desintegración del material. Se recomienda que en la etapa de construcción o rehabilitación se cumpla estrictamente con las especificaciones técnicas del proyecto.

El MEPDG no predice la pérdida de características superficiales relacionadas con la resistencia al deslizamiento (IFI). En nuestro país hay vías muy peligrosas por su pronunciada pendiente donde se ocasionan graves accidentes con pérdida de vidas humanas. El MTOP necesariamente y de manera inmediata debe dar soluciones íntegras con la aplicación mediante un SISTEMA DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS.

Referencias Bibliográficas

- Juárez Badillo/Rico Rodríguez (2005) Mecánica de Suelos, Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Limusa, Recuperado de: https://suelos.milaulas.com/pluginfile.php/128/mod_resource/content/1/Mecanica%20de%20suelos%20-%20Juarez%20Badillo.pdf
- Díaz H.P., Suarez J.H.P., Melgarejo Y.H.M., Rodríguez J.M.P. Sistemas automáticos de para la adquisición de datos enfocados a examinar pavimentos flexibles. Ciencia e Ingeniería Neogra-nadina, volumen 24(numero 1), 2014; 79-98
- Rico A., Orozco J., Téllez R., Damián S., López D., Solorio R., Sánchez M. Sistemas de Evaluación de Pavimentos versión 1.0. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica N° 208, Sanfandila., 2002.
- Michael W. Sayers, Steven M. Karamihis, The Little Book of Profiling, Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles, Universidad de Michigan, 1998.
- Mario C. Arriaga Patiño, Paul Garnica Anguas, Alfonso Rico Rodríguez., Índice internacional de rugosidad en la red carretera de México., Instituto Mexicano del Transporte., Publicación Técnica No. 108 Sanfandila, Qro., 1998.
- López Diana Valdés, Paul Garnica Anguas, Condiciones para la Aplicación del Índice de Fricción Internacional en las Carreteras de México., Instituto Mexicano del Transporte., Publicación Técnica No. 170 Sanfandila, Qro., 199.
- U.S. Department of Transportation, DISTRESS IDENTIFICATION MANUAL, for the Long-Term Pavement Performance Program, Publication N° FHWA-HRT-13-092, May 2014.
- U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA)., Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume I: Final Report., Publication N°FHWA-HRT-16-009, March 2017
- Pavement Tools Consortium, a partnership between several state DOTs, the FHWA, and the University of Washington, Pavement Interactive 2021, Recuperado de: <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/structural-design/>
- Standard Test Method for, Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load. ASTM INTERNATIONAL, Designation: D 4696-96 (Reapproved 2003).
- Washington State Environmental and Engineering Programs, Department of Transportation, Materials Laboratory - Pavements Division. EVERSERIES© USER'S GUIDE, Pavement Analysis Computer Software and Case Studies. August 2005.
- Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, Diseño de Sobrecarpetas en Pavimentos Existentes (AASHTO-93) y software dipav 2.0. Publicación N° FHWA-HI-94-048.

- Carlos Adolfo Coria Gutiérrez, Roberto Israel Hernández Domínguez, Paul Garnica Anguas. Teorías para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles: un enfoque mecanicista. Documento Técnico No. 72 Sanfandila, Qro, 2018.
- Anand J. Puppala, Estimación de la rigidez de la subrasante y Materiales sueltos para el diseño de pavimentos, La Universidad de Texas en Arlington, Washington DC, 2008.
- William N. Houston, Michael S. Mamlouk, and Rohan W. S. Perera. Laboratory versus no destructive testing for pavement design. ASCE, March/April, 1992, Vol. 118, No. 2.
- The American Association of State Highway and Transportation Officials. The Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). July 2008, Publication Code: MEPDG-1.
- National Cooperative Highway Research Program. Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume I: Final Report. March 2017, PUBLICATION NO. FHWA-HRT-16-009
- National Cooperative Highway Research Program. Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume II: Case Study. March 2017, Reports. PUBLICATION NO. FHWA-HRT-16-010
- National Cooperative Highway Research Program. Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing, Analysis, and Interpretation. March 2017, PUBLICATION NO. FHWA-HRT-16-011.
- Transportation Research Board of the National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Guide for the Local Calibration of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, June 2018, Project No. NCHRP 20-07/ Task 422.

ANEXOS

ANEXO A

Deflexiones Medidas FWD, Normalizadas

Tabla 46

Deflectometría, Normalización de Carga, Carril Derecho

ENSAYO FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD) CARRIL DERECHO													
NORMALIZACIÓN POR CARGA (40 KN)													
#	Carril	Abscisa	Temperatura •C	Carga Normalizada						40 KN			
				Espesor hi (cm)	Factor de Corrección	D(1) 0 cm µm	D(2) 20 cm µm	D(3) 30 cm µm	D(4) 60 cm µm	D(5) 90 cm µm	D(6) 120 cm µm	D(7) 150 cm µm	D(8) 180 cm µm
1	1/R	0+000	28	36,90	0,932	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1/R	0+193	28	36,90	0,940	114,12	108,48	101,43	81,22	39,11	29,80	23,31	19,84
3	1/R	0+404	29	36,90	0,981	87,54	76,74	70,85	56,82	40,04	34,35	26,89	23,85
4	1/R	0+601	29	36,90	1,029	74,71	66,38	62,16	50,94	34,89	29,53	21,71	18,21
5	1/R	0+810	29	36,90	1,032	88,32	79,65	74,28	61,18	42,51	36,32	27,75	23,63
6	1/R	1+008	29	36,90	0,978	81,45	69,81	63,26	46,83	29,63	23,17	16,04	13,79
7	1/R	1+201	29	36,90	0,966	94,64	82,76	72,72	45,29	24,24	20,38	15,74	14,78
8	1/R	1+390	29	36,90	1,029	104,50	85,57	78,07	73,44	59,76	45,77	32,71	27,56
9	1/R	1+600	29	36,90	0,987	102,54	92,18	84,97	66,03	44,91	36,02	26,45	21,81
10	1/R	1+811	29	36,90	1,007	46,42	39,98	35,65	27,39	15,81	14,50	10,37	9,57
11	1/R	2+002	29	36,90	0,943	76,00	66,38	61,01	48,37	33,57	28,19	21,12	17,92
12	1/R	2+203	29	36,90	0,960	74,12	66,54	61,93	50,12	34,18	26,98	18,72	14,88
13	1/R	2+407	29	36,90	0,932	81,49	73,10	66,95	54,73	40,47	35,99	29,00	26,20
14	1/R	2+601	29	36,90	1,008	107,18	92,06	85,61	72,20	54,75	47,90	38,92	33,78
15	1/R	2+804	30	36,90	1,002	41,16	35,85	32,65	26,34	16,22	15,72	11,52	10,82
16	1/R	3+002	30	36,90	1,064	50,96	45,43	41,70	35,53	24,04	22,45	17,02	15,64
17	1/R	3+401	30	36,90	0,996	78,47	68,21	62,38	48,10	39,53	31,37	27,68	19,72
18	1/R	3+802	30	36,90	1,012	98,00	87,27	82,31	65,91	46,17	38,98	29,66	25,72
19	1/R	4+000	30	36,90	1,018	105,55	88,85	79,08	62,42	47,99	40,05	32,32	28,38
20	1/R	4+203	30	36,90	1,018	96,00	83,58	77,07	61,71	45,51	38,57	30,82	27,47
21	1/R	4+408	30	36,90	1,000	75,26	67,17	62,27	49,88	36,48	32,48	25,99	23,79
22	1/R	4+602	30	36,90	0,985	60,41	51,34	47,01	40,90	29,56	28,58	23,26	21,78
23	1/R	4+801	30	36,90	0,983	80,12	76,48	72,99	58,81	45,81	43,94	36,44	33,85
24	1/R	5+002	30	36,90	1,007	66,48	58,52	56,11	49,36	36,46	34,85	28,51	25,89
25	1/R	5+201	30	36,90	0,990	50,99	43,37	40,20	33,17	20,89	18,61	12,97	11,19
26	1/R	5+401	31	28,30	0,978	70,65	60,86	55,87	44,81	29,75	26,71	20,25	18,79
27	1/R	5+806	31	28,30	0,979	88,71	80,00	74,71	61,30	42,89	35,84	25,75	20,86
28	1/R	6+000	31	28,30	0,975	82,98	69,62	62,41	55,19	44,56	36,76	27,50	23,50
29	1/R	6+203	31	28,30	0,982	82,42	72,79	68,37	56,58	35,27	23,58	14,54	11,59
30	1/R	6+402	31	28,30	0,979	59,42	54,23	52,18	45,91	33,87	31,91	25,45	23,30
31	1/R	6+602	31	28,30	0,981	55,64	47,60	42,89	31,89	18,25	16,09	10,50	9,52
32	1/R	6+801	31	28,30	0,993	52,42	46,56	43,78	36,14	23,93	21,25	15,59	13,60
33	1/R	7+001	31	28,30	0,983	56,12	50,32	46,88	38,43	25,36	21,72	14,94	12,48
34	1/R	7+218	31	28,30	0,977	64,00	55,50	51,49	40,35	25,40	21,01	14,07	11,72
35	1/R	7+401	31	28,30	1,004	55,31	48,98	45,37	36,44	23,29	19,57	13,25	11,04
36	1/R	7+600	31	28,30	1,002	36,07	30,16	27,35	21,74	12,32	12,22	8,52	8,22
37	1/R	7+606	32	28,30	1,003	47,72	42,11	39,20	31,48	19,45	17,74	12,03	11,13
38	1/R	7+801	32	28,30	0,989	130,07	117,61	108,11	80,22	51,14	36,70	23,54	17,61
39	1/R	7+997	32	28,30	1,010	100,00	83,23	72,83	49,39	27,68	20,71	12,73	9,90
40	1/R	8+201	32	28,30	1,015	78,94	67,78	63,93	51,45	33,59	27,40	18,47	15,02
41	1/R	8+400	32	28,30	1,022	69,39	63,67	59,89	50,08	35,05	30,56	22,38	19,01
42	1/R	8+608	32	28,30	1,013	154,81	118,44	100,51	81,97	66,16	56,43	34,85	27,05
43	1/R	8+802	32	28,30	0,975	132,46	125,43	119,58	100,95	75,88	61,74	45,35	35,99
44	1/R	9+000	32	28,30	0,971	130,87	121,46	114,56	94,47	69,03	56,70	42,72	35,15
45	1/R	9+200	32	28,30	1,009	79,62	72,25	67,20	54,19	35,82	30,07	21,39	17,76
46	1/R	9+400	32	28,30	1,046	83,89	77,30	71,97	58,68	41,00	36,51	28,24	25,94
47	1/R	9+604	32	28,30	1,000	135,47	121,57	111,67	83,78	54,89	43,29	31,19	26,39

Deflectometría, Normalización de Carga, Carril Derecho, Continuación

ENSAYO FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD) CARRIL DERECHO

NORMALIZACIÓN POR CARGA (40 KN)

#	Carril	Abscisa	Temperatura °C	Carga Normalizada						40 KN			
				Espesor hi (cm)	Factor de Corrección	D(1) 0 cm µm	D(2) 20 cm µm	D(3) 30 cm µm	D(4) 60 cm µm	D(5) 90 cm µm	D(6) 120 cm µm	D(7) 150 cm µm	D(8) 180 cm µm
48	1/R	10+001	33	28,30	1,010	43,34	36,88	33,34	25,97	14,75	13,03	8,18	6,87
49	1/R	10+201	33	28,30	0,999	60,52	50,64	45,84	35,06	20,17	16,08	9,39	7,59
50	1/R	10+601	33	28,30	0,954	58,10	49,22	44,26	33,96	19,84	16,98	11,07	10,02
51	1/R	11+000	33	28,30	1,008	98,14	86,25	79,90	60,86	37,68	27,41	16,62	12,39
52	1/R	11+205	34	28,30	1,020	62,33	53,15	48,87	37,03	21,22	16,42	8,77	6,73
53	1/R	11+401	34	28,30	1,019	86,83	74,60	68,08	48,10	27,52	21,50	12,74	9,99
54	1/R	11+600	34	28,30	1,025	75,72	65,06	62,30	51,23	33,91	29,41	21,21	18,24
55	1/R	11+804	34	28,30	1,026	47,92	42,89	40,23	34,48	22,78	21,24	15,39	14,16
56	1/R	12+201	34	28,30	1,033	52,04	46,15	44,91	39,55	27,36	26,85	20,86	19,93
57	1/R	12+403	34	28,30	1,029	84,96	74,16	69,63	53,79	33,84	26,95	18,10	14,81
58	1/R	12+602	34	28,30	1,010	47,98	40,20	37,78	30,10	17,27	14,65	8,59	7,27
59	1/R	12+815	35	28,30	1,011	98,71	85,66	78,99	56,94	32,67	23,16	12,84	9,81
60	1/R	13+015	35	28,30	0,998	49,88	41,40	37,11	27,53	14,66	12,97	7,88	7,98
61	1/R	13+201	35	28,30	1,003	42,73	33,70	30,79	24,07	12,84	11,63	6,72	6,22
62	1/R	14+001	35	28,30	1,002	69,92	58,10	53,39	42,77	27,95	25,24	18,23	16,93
63	1/R	14+200	36	28,30	0,999	59,23	50,84	46,64	36,65	21,67	18,98	12,38	11,39
64	1/R	14+401	36	28,30	0,964	71,33	59,95	55,42	43,18	26,89	22,07	14,65	12,24
65	1/R	14+605	36	28,30	1,014	40,86	32,24	30,72	27,07	16,32	16,02	10,95	10,34
66	1/R	14+870	36	28,30	1,026	60,53	52,42	49,35	40,83	26,06	24,62	18,77	15,90
67	1/R	15+016	36	28,30	1,016	37,90	32,00	29,97	25,30	15,04	15,04	9,96	9,65
68	1/R	15+602	36	28,30	0,959	65,58	54,17	49,57	38,83	24,07	21,48	14,96	13,71
69	1/R	15+801	37	28,30	1,008	92,70	83,32	77,78	62,07	42,02	35,47	25,59	21,46
70	1/R	16+001	37	28,30	1,007	50,15	41,29	39,07	34,14	22,96	22,96	17,42	16,62
71	1/R	16+201	37	28,30	1,001	59,16	50,75	48,35	42,54	29,23	28,63	22,22	21,32
72	1/R	16+407	37	28,30	1,020	60,07	56,20	53,95	46,81	32,84	31,72	24,68	23,56
73	1/R	16+602	37	28,30	0,979	119,21	105,41	97,87	74,97	48,94	38,95	27,40	22,80
74	1/R	16+801	37	28,30	0,991	109,51	95,34	87,81	69,67	46,88	40,14	30,33	27,35
75	1/R	17+000	37	28,30	0,986	90,69	80,24	74,91	58,35	37,85	31,25	22,08	19,91
76	1/R	17+402	38	28,30	0,974	124,67	109,08	93,50	83,66	54,54	46,26	35,84	32,04
77	1/R	17+801	38	28,30	0,955	105,35	95,70	89,68	73,83	52,15	45,75	35,43	32,09
78	1/R	18+001	38	28,30	1,015	58,04	51,24	48,60	41,50	27,50	27,30	20,60	19,79
79	1/R	18+205	38	28,30	0,982	71,87	62,54	58,81	49,19	32,89	30,93	23,76	22,68
80	1/R	18+400	38	28,30	0,982	63,03	54,88	51,84	43,00	28,08	26,51	19,93	19,54
81	1/R	18+603	38	28,30	0,997	92,22	84,85	81,46	69,69	49,55	44,47	33,90	30,41
82	1/R	18+802	39	28,30	1,000	73,36	66,17	62,57	52,27	34,68	32,28	24,79	23,09
83	1/R	19+001	39	28,30	0,984	84,09	73,57	69,93	58,72	40,52	35,01	24,78	21,44
84	1/R	19+203	39	28,30	1,008	94,11	86,15	82,52	69,42	48,97	43,22	32,44	29,22
85	1/R	19+419	39	28,30	1,014	108,92	101,01	97,67	88,54	69,98	62,17	49,59	41,28
86	1/R	19+608	39	28,30	0,962	65,50	55,30	51,94	42,41	26,93	24,81	17,70	16,35
87	1/R	19+800	39	28,30	0,979	70,21	55,32	50,13	37,60	21,44	19,98	13,61	13,71
88	1/R	20+201	39	28,30	1,010	111,11	99,19	92,42	71,41	45,86	34,55	22,22	16,87
89	1/R	20+401	39	28,30	1,000	77,26	69,57	65,57	51,87	32,88	26,29	17,19	13,69
90	1/R	20+606	39	28,30	0,948	67,96	54,98	50,24	38,96	23,41	20,47	13,84	12,23
91	1/R	20+864	39	28,30	0,999	88,31	77,42	72,83	57,14	35,76	27,57	16,58	12,49
92	1/R	21+003	39	28,30	1,048	78,58	68,41	62,02	46,31	29,75	22,63	15,72	12,57

Tabla 47

Deflectometría, Normalización de Carga, Carril Izquierdo

ENSAYO FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD) CARRIL IZQUIERDO													
NORMALIZACIÓN POR CARGA (40 KN)													
#	Carril	Abscisa	Temperatura °C	Carga Normalizada						40 KN			
				Espesor hi (cm)	Factor de Corrección	D(1) 0 cm μm	D(2) 20 cm μm	D(3) 30 cm μm	D(4) 60 cm μm	D(5) 90 cm μm	D(6) 120 cm μm	D(7) 150 cm μm	D(8) 180 cm μm
1	1/L	0	35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1/L	0+098	35	34,10	0,96	150,29	131,29	121,40	91,94	60,65	49,62	35,60	31,38
3	1/L	0+309	35	34,10	0,93	106,21	83,98	72,91	50,13	28,37	24,09	16,00	14,79
4	1/L	0+500	35	34,10	1,01	117,94	88,91	79,78	64,55	40,60	35,02	24,16	22,13
5	1/L	0+699	36	34,10	1,01	123,54	90,30	80,00	60,30	35,05	27,58	16,57	13,84
6	1/L	0+901	36	34,10	1,02	147,59	118,23	99,85	84,41	50,08	38,19	24,89	20,92
7	1/L	1+095	36	34,10	1,03	114,11	88,61	79,67	57,77	32,18	27,86	19,02	17,27
8	1/L	1+298	36	34,10	0,98	114,34	89,32	81,31	60,69	36,65	30,69	20,72	19,64
9	1/L	1+501	36	34,10	0,96	102,99	88,73	83,08	68,72	47,48	41,35	30,63	26,80
10	1/L	1+697	36	34,10	0,96	102,06	82,53	74,96	57,92	37,24	31,88	21,92	18,57
11	1/L	1+901	36	34,10	0,97	124,22	104,67	94,75	71,40	46,11	40,47	30,06	27,24
12	1/L	2+099	36	34,10	0,99	111,63	96,52	90,56	77,24	55,96	50,99	40,06	37,08
13	1/L	2+296	36	34,10	0,97	91,41	78,36	72,84	61,04	42,85	39,08	29,41	27,09
14	1/L	2+500	36	34,10	1,02	78,92	65,77	60,97	51,29	33,65	32,02	22,94	21,41
15	1/L	2+901	36	34,10	0,94	93,45	80,53	75,34	61,95	43,00	38,00	27,82	24,99
16	1/L	3+096	36	34,10	0,96	78,72	65,82	60,47	50,35	33,25	30,38	21,69	19,58
17	1/L	3+500	36	37,70	1,02	88,85	74,27	68,96	57,23	37,54	33,46	22,95	20,50
18	1/L	3+696	36	37,70	1,04	121,20	96,42	89,06	68,43	41,26	33,70	21,77	19,60
19	1/L	4+100	37	37,70	1,02	108,82	85,81	77,52	55,84	30,99	24,14	14,32	13,40
20	1/L	4+299	37	37,70	1,04	119,71	95,58	86,95	63,65	35,57	28,39	17,78	16,43
21	1/L	4+701	37	30,20	0,98	116,82	96,91	82,20	62,97	47,28	35,51	22,66	19,23
22	1/L	4+895	37	30,20	1,03	142,43	121,52	106,59	91,86	66,94	55,30	38,93	32,75
23	1/L	5+095	37	30,20	1,00	111,45	90,10	81,22	58,27	32,43	25,64	15,96	14,67
24	1/L	5+499	37	29,60	0,96	134,00	116,49	107,39	84,52	58,87	50,63	38,00	34,65
25	1/L	5+697	37	29,60	0,97	66,21	53,15	47,92	38,43	23,14	22,85	16,17	16,07
26	1/L	6+098	37	29,60	1,00	69,46	55,21	49,53	39,46	23,42	22,32	15,15	14,15
27	1/L	6+300	37	29,60	1,00	100,12	80,58	71,10	53,55	33,31	29,12	19,65	17,75
28	1/L	6+506	37	29,60	0,99	100,92	80,54	71,09	53,59	32,61	28,54	18,99	17,80
29	1/L	6+701	37	29,60	1,01	139,22	119,53	110,10	87,27	58,55	49,42	36,02	31,76
30	1/L	6+899	37	29,60	0,98	82,95	70,05	66,44	58,43	41,82	39,67	30,29	28,63
31	1/L	7+300	38	29,60	0,98	77,75	63,06	56,89	44,85	27,81	26,34	18,90	18,51
32	1/L	7+899	38	29,60	1,02	79,06	60,19	53,97	42,03	23,87	20,20	11,73	10,61
33	1/L	8+500	38	29,60	0,94	80,49	69,96	65,35	54,63	37,42	35,26	26,70	25,11
34	1/L	8+726	38	29,60	1,03	107,68	89,08	72,44	62,88	54,25	43,87	38,94	33,09
35	1/L	8+897	38	35,00	0,97	94,79	78,00	69,27	60,73	47,93	41,81	30,37	26,00
36	1/L	9+098	38	35,00	1,00	96,06	82,18	77,58	64,20	43,93	40,44	30,45	27,76
37	1/L	9+300	38	35,00	0,99	84,38	74,67	70,80	59,99	43,23	40,95	31,93	29,35
38	1/L	9+500	38	35,00	1,02	79,25	69,25	64,86	55,89	38,86	37,53	29,47	28,25
39	1/L	9+698	38	35,00	0,94	57,42	45,11	41,35	34,68	22,09	22,56	16,17	16,07
40	1/L	10+300	39	35,00	1,01	81,51	62,09	56,96	45,18	26,77	23,14	14,29	12,48
41	1/L	10+899	39	35,00	0,98	93,58	79,14	73,19	57,97	37,08	30,06	19,32	15,42
42	1/L	11+099	39	35,00	0,99	102,26	85,27	77,52	56,75	32,50	24,75	14,51	12,22
43	1/L	11+299	39	26,20	0,95	62,00	49,90	44,86	34,10	18,95	16,86	10,38	9,90
44	1/L	11+493	39	26,20	0,96	115,08	99,14	90,20	65,80	39,67	31,03	19,50	16,33

Deflectometría, Normalización de Carga, Carril Izquierdo, Continuación

ENSAYO FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD) CARRIL IZQUIERDO													
NORMALIZACIÓN POR CARGA (40 KN)													
#	Carril	Abscisa	Temperatura °C	Carga Normalizada						40 KN			
				Espesor hi (cm)	Factor de Corrección	D(1) 0 cm μ m	D(2) 20 cm μ m	D(3) 30 cm μ m	D(4) 60 cm μ m	D(5) 90 cm μ m	D(6) 120 cm μ m	D(7) 150 cm μ m	D(8) 180 cm μ m
45	1/L	11+701	39	26,20	1,00	60,19	49,81	45,82	37,63	22,86	21,76	15,07	14,87
46	1/L	12+300	39	26,20	0,98	74,53	59,16	53,97	43,58	26,84	24,68	16,85	15,38
47	1/L	12+498	39	26,20	0,99	64,98	51,29	46,03	37,10	22,32	21,83	15,18	15,18
48	1/L	12+897	39	32,50	0,99	58,54	47,38	43,14	33,37	18,46	16,98	10,37	10,07
49	1/L	13+101	39	32,50	1,03	76,02	67,27	62,84	54,18	37,29	36,05	27,61	25,86
50	1/L	13+300	39	32,50	1,00	64,88	53,17	48,86	41,95	28,84	28,04	20,63	19,42
51	1/L	13+698	39	32,50	1,00	45,12	35,00	32,19	25,07	12,53	13,44	8,52	9,33
52	1/L	13+899	39	32,50	1,02	59,06	49,20	45,34	37,10	21,96	21,75	14,84	14,64
53	1/L	14+897	40	32,50	0,96	76,03	64,54	51,74	46,46	35,42	27,74	20,64	18,91
54	1/L	15+300	40	32,50	1,01	76,15	62,35	56,61	42,91	24,18	20,75	12,99	11,89
55	1/L	15+501	40	32,50	0,98	87,54	69,42	63,12	47,56	27,77	23,63	15,46	13,88
56	1/L	16+099	40	32,50	1,00	73,15	57,03	51,36	39,71	22,99	19,91	12,44	11,64
57	1/L	16+901	40	32,50	0,98	88,45	73,61	67,27	56,43	44,52	32,41	21,67	15,33
58	1/L	17+100	40	32,50	1,00	91,87	78,11	71,29	54,62	33,33	29,52	20,38	19,28
59	1/L	17+300	40	32,50	1,01	132,73	120,28	108,85	82,04	51,19	41,98	29,34	26,50
60	1/L	17+499	40	32,50	1,00	105,74	87,87	79,18	58,31	34,45	29,66	20,07	19,47
61	1/L	17+698	40	32,50	1,02	109,50	87,09	77,51	56,53	32,19	28,01	19,15	19,15
62	1/L	17+900	40	30,70	1,01	73,31	58,20	52,83	44,61	27,68	26,46	18,66	17,85
63	1/L	18+300	40	30,70	1,00	109,66	93,10	86,98	74,14	52,47	47,96	37,02	34,41
64	1/L	18+500	40	30,70	1,01	93,49	73,54	68,57	59,56	41,63	38,49	28,97	26,34
65	1/L	18+699	40	30,70	1,03	125,71	93,15	86,45	72,75	48,84	42,86	31,01	27,61
66	1/L	18+900	40	30,70	1,04	114,11	100,23	93,71	80,77	57,47	50,22	36,97	32,51
67	1/L	19+100	40	30,70	1,02	103,29	85,04	79,53	65,56	43,74	39,05	27,84	25,80
68	1/L	19+301	41	30,70	1,05	105,06	83,86	81,55	70,85	48,91	43,66	32,12	29,28
69	1/L	19+495	41	30,70	1,00	86,29	75,37	66,85	58,03	44,00	38,09	27,06	23,95
70	1/L	19+699	41	30,70	0,99	89,97	70,59	64,85	53,39	34,11	30,55	21,45	19,87
71	1/L	20+298	41	30,70	0,94	88,73	74,21	67,89	52,15	31,12	24,89	15,46	13,01
72	1/L	20+479	41	30,70	0,98	102,11	89,65	82,00	62,38	37,57	29,03	17,17	13,34
73	1/L	20+906	41	30,70	0,94	65,57	50,63	46,41	37,67	22,64	20,39	12,96	11,65

ANEXO B

Deflexiones Características

Tabla 48

Deflexiones Características Calzada Derecha

DEFLEXIONES CARACTERISTICAS CALZADA DERECHA										
<i>Abscisas</i>	<i>D(1) 0 cm</i> <i>μm</i>	<i>D(2) 20 cm</i> <i>μm</i>	<i>D(3) 30 cm</i> <i>μm</i>	<i>D(4) 60 cm</i> <i>μm</i>	<i>D(5) 90 cm</i> <i>μm</i>	<i>D(6) 120 cm</i> <i>μm</i>	<i>D(7) 150 cm</i> <i>μm</i>	<i>D(8) 180 cm</i> <i>μm</i>	<i>HT (cm)</i>	
0+000 5+401	108,73	96,27	88,37	71,33	51,03	42,75	33,22	28,37	109,90	
5+401 7+801	108,73	96,27	88,37	71,33	51,03	42,75	33,22	28,37	101,30	
7+801 10+001	159,71	139,65	128,31	103,22	76,97	63,18	45,43	37,12	101,30	
10+001 15+602	93,07	80,78	74,91	56,83	35,69	29,14	20,68	18,13	101,30	
15+602 21+003	117,88	105,95	98,35	81,65	57,53	49,46	38,13	33,63	101,30	

Nota: Se realizaron subsecciones por diferentes espesores de HMA

Tabla 49

Deflexiones Características Calzada Izquierda

DEFLEXIONES CARACTERISTICAS CALZADA IZQUIERDA										
<i>Abscisas</i>	<i>D(1) 0 cm</i> <i>μm</i>	<i>D(2) 20 cm</i> <i>μm</i>	<i>D(3) 30 cm</i> <i>μm</i>	<i>D(4) 60 cm</i> <i>μm</i>	<i>D(5) 90 cm</i> <i>μm</i>	<i>D(6) 120 cm</i> <i>μm</i>	<i>D(7) 150 cm</i> <i>μm</i>	<i>D(8) 180 cm</i> <i>μm</i>	<i>HT (cm)</i>	
0+000 3+500	145,65	121,00	109,15	86,70	59,38	50,26	37,22	33,26	107,10	
3+500 4+701	145,65	121,00	109,15	86,70	59,38	50,26	37,22	33,26	110,70	
4+701 5+499	145,65	121,00	109,15	86,70	59,38	50,26	37,22	33,26	103,20	
5+499 7+300	145,65	121,00	109,15	86,70	59,38	50,26	37,22	33,26	102,60	
7+300 8+897	113,28	96,75	87,51	70,47	52,46	45,84	36,92	33,09	102,60	
8+897 11+299	113,28	96,75	87,51	70,47	52,46	45,84	36,92	33,09	108,00	
11+299 11+701	113,28	96,75	87,51	70,47	52,46	45,84	36,92	33,09	99,20	
11+701 12+897	86,76	71,65	64,35	52,85	36,35	32,59	24,37	22,66	99,20	
12+897 16+901	86,76	71,65	64,35	52,85	36,35	32,59	24,37	22,66	105,50	
16+901 17+900	127,53	108,51	99,97	81,00	56,34	49,07	36,64	33,43	105,50	
17+900 20+096	127,53	108,51	99,97	81,00	56,34	49,07	36,64	33,43	103,70	

Nota: Se realizaron subsecciones por diferentes espesores de HMA

ANEXO C

Retrocálculo

Método YONAPAVE

Tabla 50

Retrocálculo Método YONAPAVE, Calzada Derecha

MÉTODO YONAPAVE CALZADA DERECHA								
ABSCISAS	AREA	A	B	m	n	lo	MRR YONAPAVE	
0+000	7+801	26,442	3,2750	0,1039	926,90	-0,8595	51,09	164,09
2+407	7+606	26,442	3,2750	0,1039	926,90	-0,8595	51,09	164,09
7+801	10+001	26,289	3,2750	0,1039	926,90	-0,8595	50,28	113,25
10+001	15+602	25,286	3,2750	0,1039	926,90	-0,8595	45,31	212,53
15+602	21+003	27,251	3,2750	0,1039	926,90	-0,8595	55,57	140,79

Tabla 51

Retrocálculo Método YONAPAVE, Calzada Izquierda

MÉTODO YONAPAVE CALZADA IZQUIERDA								
ABSCISAS	AREA	A	B	m	n	lo	MRR YONAPAVE	
0+000	7+300	24,581	3,2750	0,1039	926,90	-0,8595	42,11	144,63
7+300	11+701	25,514	3,2750	0,1039	926,90	-0,8595	46,40	171,10
11+701	16+901	24,724	3,2750	0,1039	926,90	-0,8595	42,74	239,75
16+901	20+096	25,680	3,2750	0,1039	926,90	-0,8595	47,20	149,76

Método AASHTO 93

Tabla 52

Retrocálculo Método AASHTO, Calzada Derecha

MÉTODO AASHTO 93 CALZADA DERECHA										
ABSCISAS	r	MRR (Mpa)	P (lb/in²)	HT (in)	MRR (Psi)	EP (Psi)	ae	0,7 ae	r >= 0,7 ae	
0+028	5+401	70,87	209,44	82,09	43,27	30376,82	238240,42	86,17	60,32	Cumple
5+401	7+801	70,87	209,44	82,09	39,88	30376,82	246257,77	80,33	56,23	Cumple
7+801	10+001	59,06	156,95	82,09	39,88	22763,89	161868,99	76,92	53,84	Cumple
10+001	15+602	59,06	344,82	82,09	39,88	50012,39	256471,05	69,03	48,32	Cumple
15+602	21+003	59,06	186,98	82,09	39,88	27118,68	229992,27	81,55	57,08	Cumple

Tabla 53

Retrocálculo Método AASHTO, Calzada Izquierda

MÉTODO AASHTO 93 CALZADA IZQUIERDA										
ABSCISAS	r	MRR (Mpa)	P (lb/in ²)	HT (in)	MRR (Psi)	EP (Psi)	ae	0,7 ae	r >= 0,7 ae	
0+000	3+500	59,06	191,55	82,09	42,17	27782,73	168024,72	77,05	53,93	Cumple
3+500	4+701	59,06	191,55	82,09	43,58	27782,73	166292,26	79,35	55,55	Cumple
4+701	5+499	59,06	191,55	82,09	40,63	27782,73	170079,27	74,56	52,19	Cumple
5+499	7+300	59,06	191,55	82,09	40,39	27782,73	170391,79	74,17	51,92	Cumple
7+300	8+897	59,06	193,10	82,09	40,39	28006,94	238690,52	82,72	57,90	Cumple
8+897	11+299	70,87	179,58	82,09	42,52	26045,40	239943,36	89,33	62,53	Cumple
11+299	11+701	59,06	193,10	82,09	39,06	28006,94	242323,58	80,40	56,28	Cumple
11+701	12+897	59,06	292,63	82,09	39,06	42442,99	299050,06	75,11	52,57	Cumple
12+897	16+901	59,06	292,63	82,09	41,54	42442,99	292202,40	79,24	55,47	Cumple
16+901	17+900	59,06	194,62	82,09	41,54	28227,77	200309,63	80,03	56,02	Cumple
17+900	20+096	59,06	194,62	82,09	40,83	28227,77	201605,49	78,85	55,19	Cumple

Programa EVERCALC

Tabla 54

Retrocálculo Método EVERCALC, Calzada Derecha

BACKCALCULATION by Evercalc© 5.0 - Summary Output							
Route: EL SALADO - GUANGARCUCHO				No of Layers: 4			
Plate Radius (cm): 15.0				Stiff Layer: Yes			
No of Sensors: 8				P-Ratio: .300 .350 .400 .300			
Offsets (cm): .0 20.0 30.0 60.0 90.0 120.0 150.0				180.0			
Station	Load (N)	EAdj(MPa)	E(1)(MPa)	E(2)(MPa)	E(3)(MPa)	E(4)(MPa)	RMS Error
0+000	Thickness	-	36.90	73.00	446.14	-	-
0+000	40000.0	2965.3	2000.0	831.1	138.5	500.0	12.92
5+401	Thickness	-	28.30	73.00	454.74	-	-
5+401	40000.0	3658.6	2000.0	1132.9	138.7	500.0	13.36
7+801	Thickness	-	28.30	73.00	460.29	-	-
7+801	40000.0	4077.2	2000.0	504.8	100.8	500.0	10.22
10+001	Thickness	-	28.30	73.00	169.17	-	-
10+001	40000.0	5097.3	2000.0	1081.9	178.3	500.0	16.50
15+602	Thickness	-	28.30	73.00	457.21	-	-
15+602	40000.0	8180.0	2000.0	1062.9	113.2	500.0	12.86

Tabla 55

Retrocálculo Método EVERCALC, Calzada Izquierda

BACKCALCULATION by Evercalc© 5.0 - Summary Output

Route: GUANGARCUCHO - EL SALADO (CALAZADA IZQUIERDA)
 Plate Radius (cm): 15.0 No of Layers: 4
 No of Sensors: 8 Stiff Layer: Yes
 Offsets (cm): .0 20.0 30.0 60.0 90.0 120.0 150.0 P-Ratio: .300 .350 .400 .300
 180.0

Station	Load (N)	EAdj(MPa)	E(1)(MPa)	E(2)(MPa)	E(3)(MPa)	E(4)(MPa)	RMS Error
0+000	Thickness (cm)	-	34.10	73.00	249.71	-	-
0+000	40000.0	6428.9	2000.0	508.3	102.4	400.0	7.86
3+500	Thickness (cm)	-	37.70	73.00	246.11	-	-
3+500	40000.0	7243.8	2000.0	434.4	103.9	400.0	7.54
4+701	Thickness (cm)	-	30.20	73.00	253.61	-	-
4+701	40000.0	7243.8	2000.0	596.3	101.5	400.0	8.30
5+499	Thickness (cm)	-	29.60	73.00	254.21	-	-
5+499	40000.0	7243.8	2000.0	611.1	101.3	400.0	8.38
7+300	Thickness (cm)	-	29.60	73.00	349.40	-	-
7+300	40000.0	8180.0	2000.0	1312.7	109.0	400.0	10.43
8+897	Thickness (cm)	-	35.00	73.00	344.00	-	-
8+897	40000.0	8180.0	2000.0	1115.7	107.2	400.0	10.30
11+299	Thickness (cm)	-	26.20	73.00	352.80	-	-
11+299	40000.0	9257.5	2000.0	1448.0	110.5	400.0	10.47
11+701	Thickness (cm)	-	26.20	73.00	226.31	-	-
11+701	40000.0	9257.5	2000.0	2092.0	163.6	400.0	14.42
12+897	Thickness (cm)	-	32.50	73.00	220.01	-	-
12+897	40000.0	9257.5	2000.0	1807.4	157.9	400.0	14.62
16+901	Thickness (cm)	-	32.50	73.00	258.68	-	-
16+901	40000.0	10500.0	2000.0	786.5	97.2	400.0	10.26
17+900	Thickness (cm)	-	30.70	73.00	260.48	-	-
17+900	40000.0	11935.4	2000.0	838.5	97.4	400.0	10.39

Programa ELLEA1

Tabla 56

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 1, Calzada Derecha

PROGRAMA DE RETROCÁLCULO ELLEA1				
Sensor #	FWD Medida (micrón)	Distancia Radial (mm)	Calculados (micrón) 61,23	Error
D0	108,73	0	135,06	24,22%
D1	96,27	200	97,46	1,24%
D2	88,37	300	85,14	3,65%
D3	71,33	600	64,71	9,28%
D4	51,03	900	51,04	0,02%
D5	42,75	1200	41,04	3,99%
D6	33,22	1500	33,46	0,71%
D7	28,37	1800	27,54	2,92%

Error Total

5,75%

Figura 125

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 1, Calzada Derecha

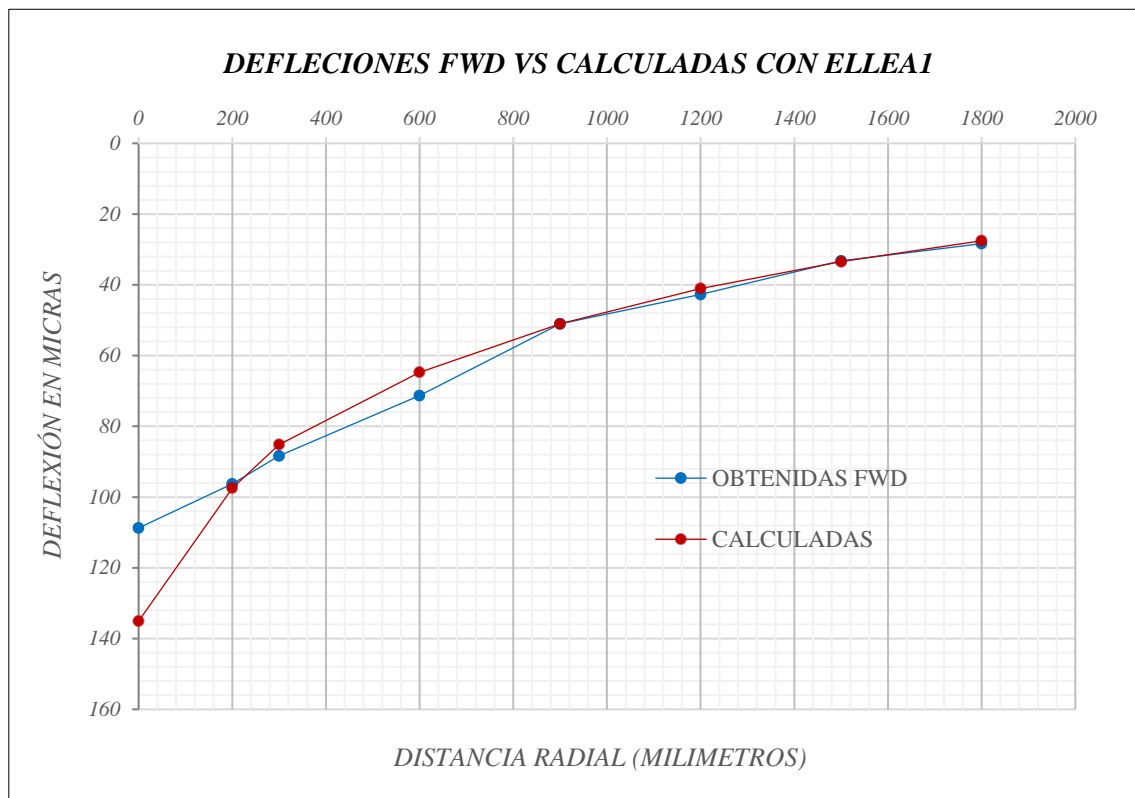


Tabla 57

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 2, Calzada Derecha

PROGRAMA DE RETROCÁLCULO ELLEAI				
Sensor #	FWD Medida (micrón)	Distancia Radial (mm)	Calculados (micrón) 61,23	Error
D0	159,71	0	192,56	20,57%
D1	139,65	200	146,02	4,56%
D2	128,31	300	128,62	0,24%
D3	103,22	600	96,12	6,88%
D4	76,97	900	74,14	3,68%
D5	63,18	1200	58,18	7,92%
D6	45,43	1500	46,21	1,72%
D7	37,12	1800	37,05	0,19%

Total Error	5,72%
-------------	--------------

Figura 126

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 2, Calzada Derecha

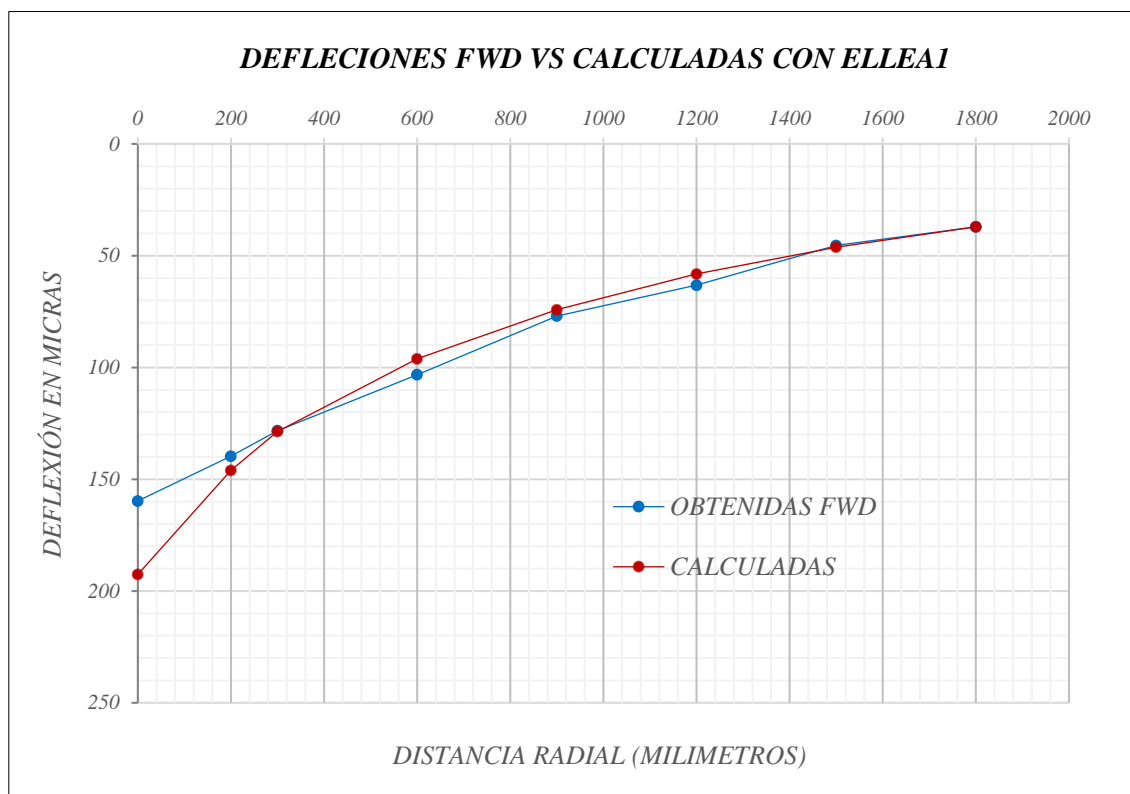


Tabla 58

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 3, Calzada Derecha

PROGRAMA DE RETROCÁLCULO ELLEAI				
Sensor #	FWD Medida (micrón)	Distancia Radial (mm)	Calculados (micrón) 61,23	Error
D0	93,07	0	133,28	43,20%
D1	80,78	200	88,42	9,46%
D2	74,91	300	73,25	2,21%
D3	56,83	600	49,58	12,75%
D4	35,69	900	36,39	1,97%
D5	29,14	1200	27,84	4,47%
D6	20,68	1500	21,80	5,42%
D7	18,13	1800	17,35	4,30%

Total Error	10,47%
-------------	---------------

Figura 127

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 3, Calzada Derecha

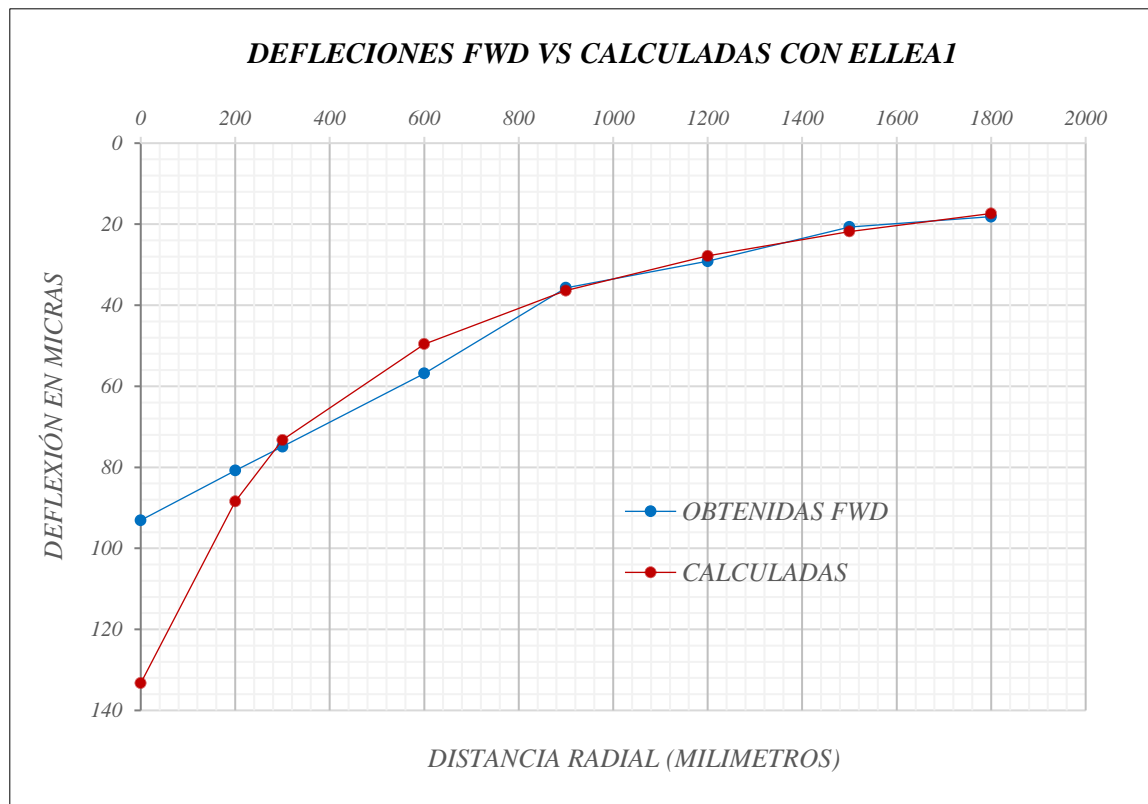


Tabla 59

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 4, Calzada Derecha

PROGRAMA DE RETROCÁLCULO ELLEAI				
Sensor #	FWD Medida (micrón)	Distancia Radial (mm)	Calculados (micrón) 61,23	Error
D0	117,88	0	163,64	38,82%
D1	105,95	200	114,32	7,90%
D2	98,35	300	97,96	0,40%
D3	81,65	600	72,57	11,12%
D4	57,53	900	57,50	0,06%
D5	49,46	1200	46,76	5,46%
D6	38,13	1500	38,47	0,90%
D7	33,63	1800	31,84	5,32%

Total Error	8,75%
-------------	--------------

Figura 128

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 4, Calzada Derecha

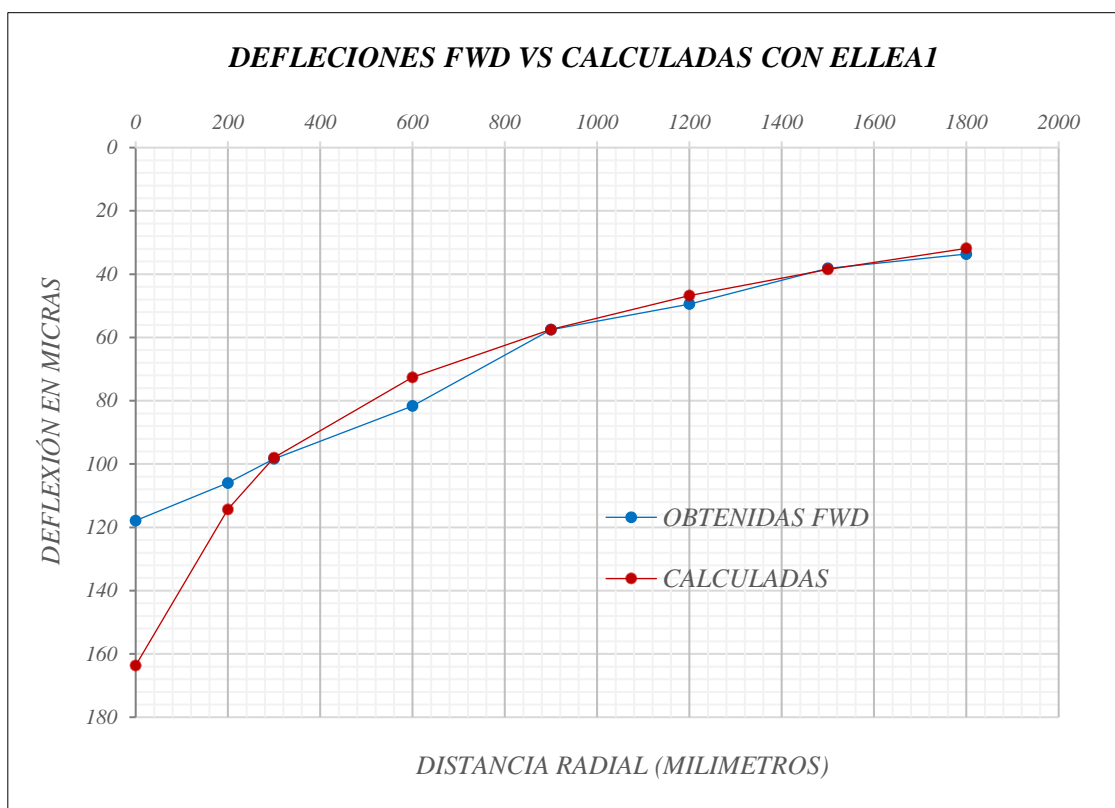


Tabla 60

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 1, Calzada Izquierda

PROGRAMA DE RETROCÁLCULO ELLEAI				
Sensor #	FWD Medida (micrón)	Distancia Radial (mm)	Calculados (micrón) 61,23	Error
D0	145,65	0	173,29	18,98%
D1	121,00	200	124,97	3,28%
D2	109,15	300	108,76	0,36%
D3	86,70	600	81,41	6,10%
D4	59,38	900	63,18	6,40%
D5	50,26	1200	49,75	1,01%
D6	37,22	1500	39,50	6,12%
D7	33,26	1800	31,52	5,23%
			Total Error	5,93%

Figura 129

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 1, Calzada Izquierda

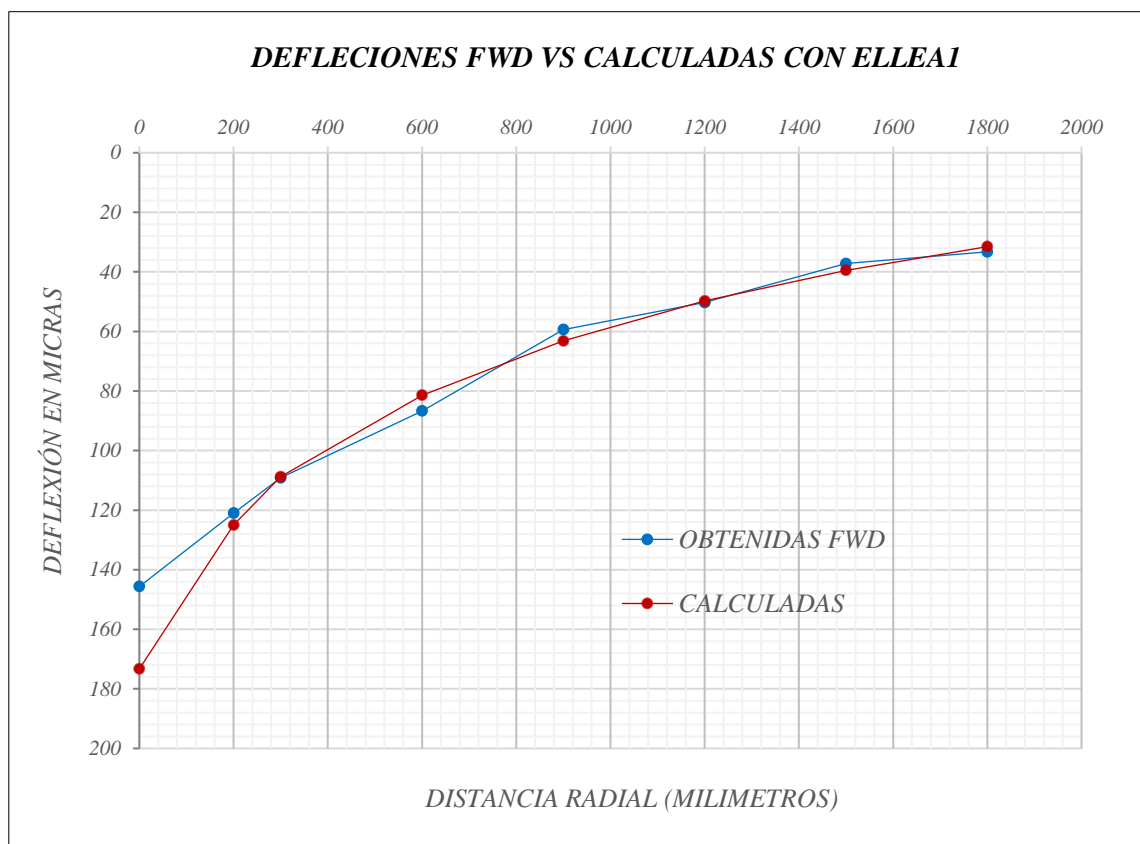


Tabla 61

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 2, Calzada Izquierda

PROGRAMA DE RETROCÁLCULO ELLEAI				
Sensor #	FWD Medida (micrón)	Distancia Radial (mm)	Calculados (micrón) 61,23	Error
D0	113,28	0	153,38	35,40%
D1	96,75	200	103,57	7,05%
D2	87,51	300	88,20	0,79%
D3	70,47	600	66,15	6,13%
D4	52,46	900	53,08	1,18%
D5	45,84	1200	43,57	4,95%
D6	36,92	1500	36,09	2,25%
D7	33,09	1800	30,02	9,27%
			Total Error	8,38%

Figura 130

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 2, Calzada Izquierda

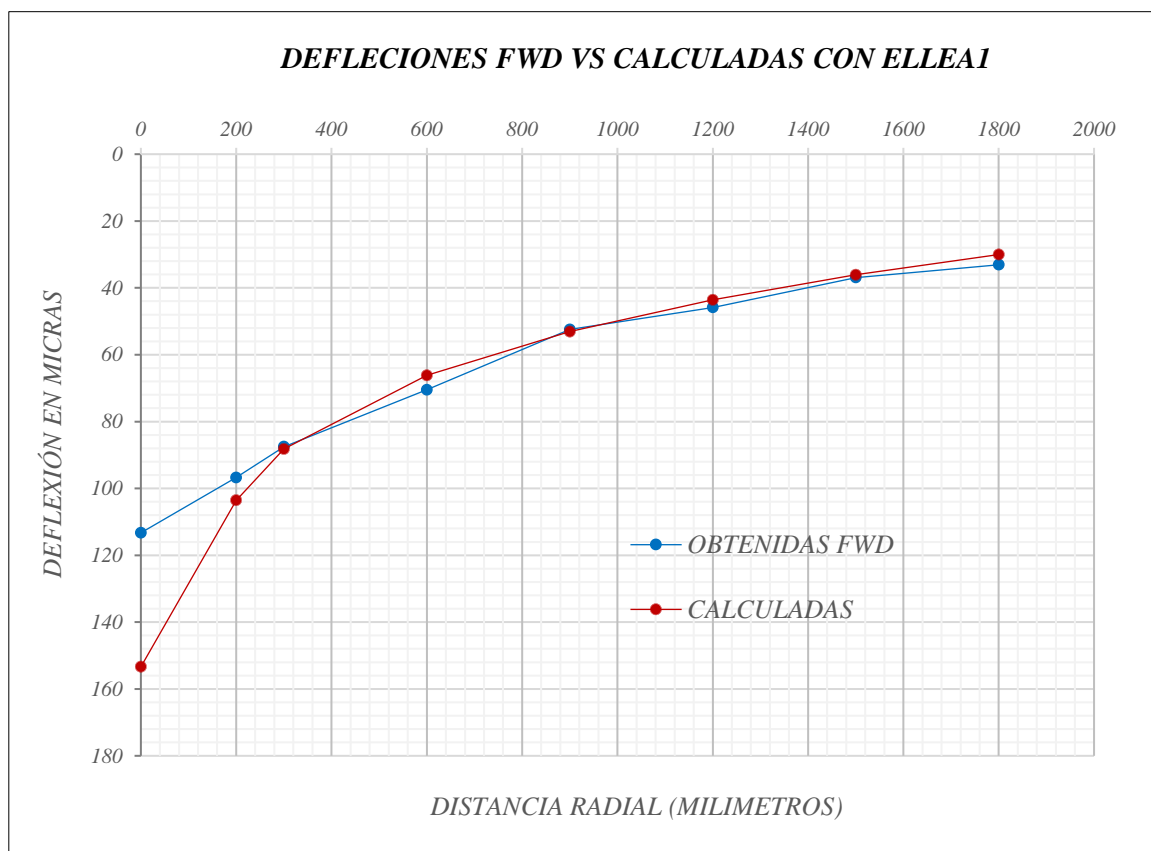


Tabla 62

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 3, Calzada Izquierda

PROGRAMA DE RETROCÁLCULO ELLEAI				
Sensor #	FWD Medida (micrón)	Distancia Radial (mm)	Calculados (micrón) 61,23	Error
D0	86,76	0	130,99	50,98%
D1	71,65	200	82,73	15,46%
D2	64,35	300	67,94	5,58%
D3	52,85	600	47,68	9,78%
D4	36,35	900	36,87	1,42%
D5	32,59	1200	29,65	9,02%
D6	24,37	1500	24,31	0,26%
D7	22,66	1800	20,17	11,00%

Total Error	12,94%
-------------	---------------

Figura 131

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 3, Calzada Izquierda

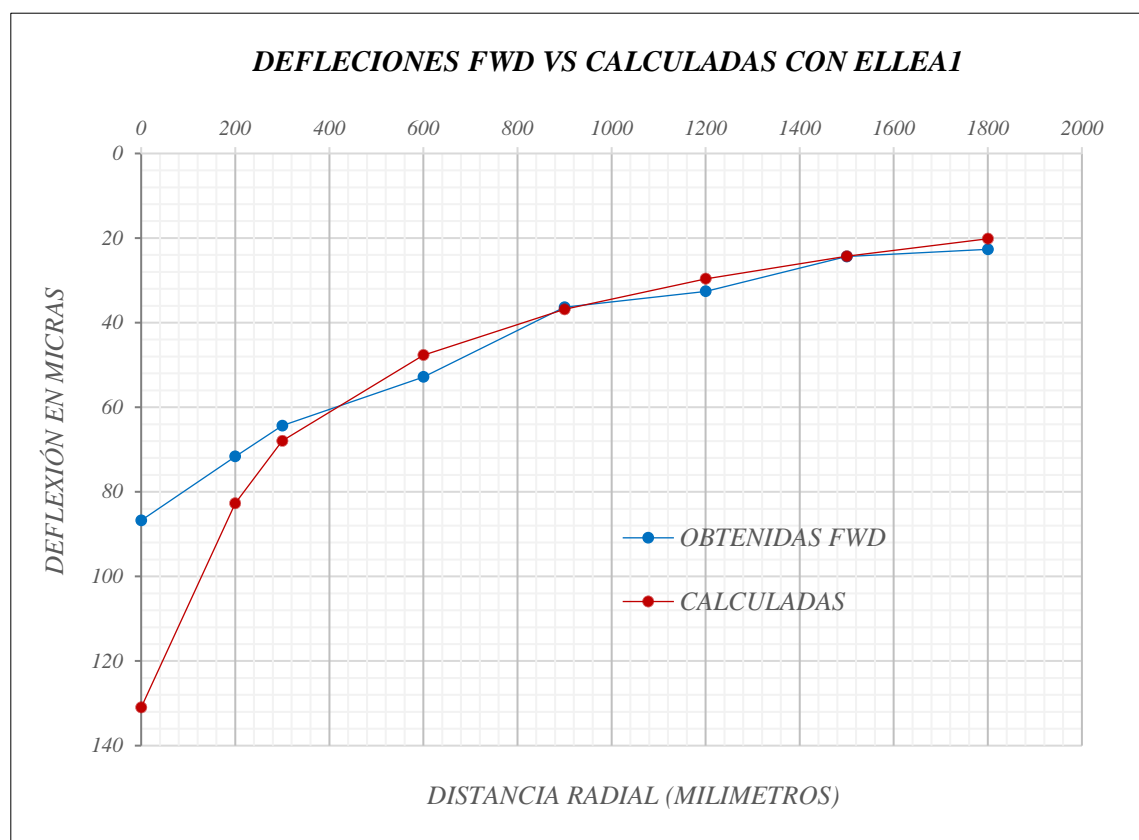


Tabla 63

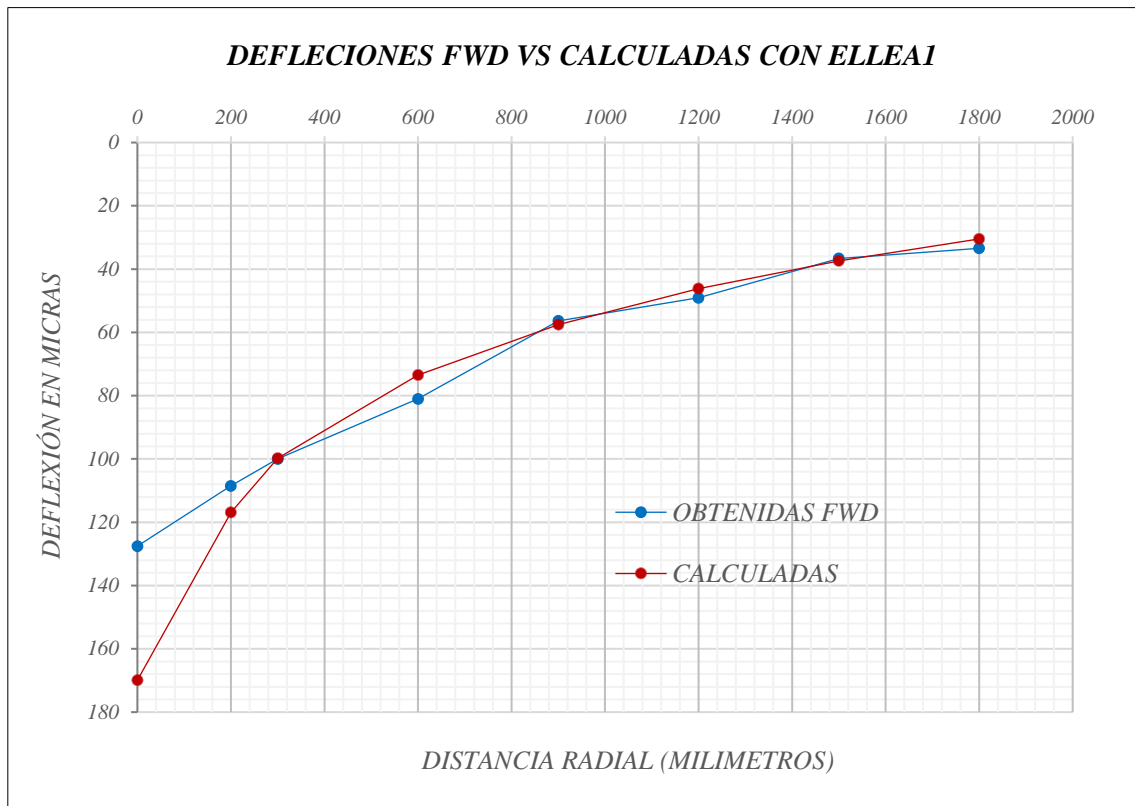
Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 4, Calzada Izquierda

PROGRAMA DE RETROCÁLCULO ELLEAI				
Sensor #	FWD Medida (micrón)	Distancia Radial (mm)	Calculados (micrón) 61,23	Error
D0	127,53	0	169,91	33,23%
D1	108,51	200	116,90	7,73%
D2	99,97	300	99,78	0,19%
D3	81,00	600	73,48	9,29%
D4	56,34	900	57,53	2,12%
D5	49,07	1200	46,14	5,97%
D6	36,64	1500	37,39	2,06%
D7	33,43	1800	30,46	8,89%

Total Error	8,68%
-------------	--------------

Figura 132

Deflexiones Medidas vs Calculadas, Sección Homogénea 4, Calzada Izquierda



ANEXO D

Predicción de Deterioros Subtramo TCD1 Calzada Derecha

Predicted distress: Project Subtramo TCD1 Calzada Derecha

Pavement age	Month	Longitudinal Cracking (ft/mi)	Alligator Cracking in New AC Layer FC1(%)	Reflective Cracking Existing Layers FC2(%)	Total Cracking Surface FC1 + FC2 (%)	Transverse Cracking (ft/mi)	Subtotal AC Rutting (in)	Total Rutting (in)	IRI (in/mi)	Heavy Trucks (cumulative)	IRI at Reliability (in/mi)	
												month	year
1	0,08	June	15	0,22	0	0,219	0	0,003	0,003	127,1	42486	186,41
2	0,17	July	17,8	0,28	0	0,275	0	0,004	0,004	127,2	84973	186,47
3	0,25	August	21,4	0,31	0	0,312	0	0,005	0,005	127,2	127459	186,53
4	0,33	September	24,8	0,35	0	0,351	0	0,005	0,005	127,3	169946	186,59
5	0,42	October	26,5	0,39	0	0,394	0	0,006	0,006	127,3	212432	186,66
6	0,50	November	29,6	0,44	0	0,438	0	0,007	0,007	127,4	254918	186,73
7	0,58	December	35	0,48	0	0,481	0	0,008	0,008	127,4	297405	186,81
8	0,67	January	37,7	0,53	0	0,527	0	0,009	0,009	127,5	339891	186,88
9	0,75	February	43,2	0,57	0	0,573	0	0,009	0,009	127,6	382378	186,97
10	0,83	March	45,4	0,62	0	0,616	0	0,01	0,01	127,6	424864	187,05
11	0,92	April	47	0,65	0	0,648	0	0,011	0,011	127,7	467350	187,12
12	1,00	May	48,3	0,68	0	0,679	0	0,011	0,011	127,7	509837	187,19
13	1,08	June	49,8	0,71	0	0,706	0	0,012	0,012	127,8	553632	187,26
14	1,17	July	50,6	0,73	0	0,729	0	0,012	0,012	127,9	597427	187,33
15	1,25	August	51,8	0,75	0	0,746	0	0,012	0,012	127,9	641222	187,4
16	1,33	September	53,8	0,76	0	0,764	0	0,013	0,013	128	685017	187,47
17	1,42	October	56,7	0,79	0	0,791	0	0,013	0,013	128	728812	187,56
18	1,50	November	58,4	0,82	0	0,819	0	0,014	0,014	128,1	772607	187,64
19	1,58	December	59,7	0,84	0	0,843	0	0,014	0,014	128,2	816402	187,72
20	1,67	January	60,2	0,86	0	0,862	0	0,015	0,015	128,2	860196	187,8
21	1,75	February	60,7	0,88	0	0,882	0	0,015	0,015	128,3	903991	187,88
22	1,83	March	61,3	0,90	0	0,902	0	0,015	0,015	128,3	947786	187,96
23	1,92	April	62,1	0,92	0	0,92	0	0,016	0,016	128,4	991581	188,04
24	2,00	May	62,8	0,94	0	0,935	0	0,016	0,016	128,5	1035380	188,12
25	2,08	June	63,1	0,95	0	0,949	0	0,016	0,016	128,5	1080520	188,2
26	2,17	July	63,3	0,96	0	0,959	0	0,016	0,016	128,6	1125660	188,27
27	2,25	August	63,4	0,97	0	0,967	0	0,017	0,017	128,6	1170810	188,35
28	2,33	September	64	0,98	0	0,977	0	0,017	0,017	128,7	1215950	188,43
29	2,42	October	64,3	0,99	0	0,99	0	0,017	0,017	128,8	1261100	188,51
30	2,50	November	65,2	1,00	0	1	0	0,017	0,017	128,8	1306240	188,6
31	2,58	December	65,9	1,02	0	1,02	0	0,018	0,018	128,9	1351380	188,69
32	2,67	January	67,2	1,04	0	1,04	0	0,018	0,018	129	1396530	188,78
33	2,75	February	68,4	1,06	0	1,06	0	0,018	0,018	129,1	1441670	188,89
34	2,83	March	69,9	1,08	0	1,08	0	0,019	0,019	129,1	1486810	188,99
35	2,92	April	71,1	1,10	0	1,1	0	0,019	0,019	129,2	1531960	189,08
36	3,00	May	72	1,11	0	1,11	0	0,019	0,019	129,3	1577100	189,18
37	3,08	June	72,5	1,13	0	1,13	0	0,02	0,02	129,4	1623640	189,27
38	3,17	July	72,7	1,14	0	1,14	0	0,02	0,02	129,4	1670170	189,37
39	3,25	August	73,1	1,15	0	1,15	0	0,02	0,02	129,5	1716710	189,45
40	3,33	September	74,8	1,16	0	1,16	0	0,02	0,02	129,6	1763240	189,56
41	3,42	October	77,4	1,18	0	1,18	0	0,021	0,021	129,7	1809770	189,66
42	3,50	November	79,1	1,20	0	1,2	0	0,021	0,021	129,7	1856310	189,77
43	3,58	December	79,6	1,21	0	1,21	0	0,021	0,021	129,8	1902840	189,87
44	3,67	January	79,8	1,23	0	1,23	0	0,022	0,022	129,9	1949380	189,97
45	3,75	February	80	1,24	0	1,24	0	0,022	0,022	130	1995910	190,07
46	3,83	March	80,2	1,25	0	1,25	0	0,022	0,022	130,1	2042450	190,17
47	3,92	April	80,5	1,27	0	1,27	0	0,022	0,022	130,1	2088980	190,27
48	4,00	May	80,8	1,28	0	1,28	0	0,022	0,022	130,2	2135510	190,38
49	4,08	June	81	1,29	0	1,29	0	0,023	0,023	130,3	2183480	190,48
50	4,17	July	81,1	1,29	0	1,29	0	0,023	0,023	130,4	2231450	190,58
51	4,25	August	81,1	1,30	0	1,3	0	0,023	0,023	130,4	2279420	190,68
52	4,33	September	81,4	1,31	0	1,31	0	0,023	0,023	130,5	2327380	190,79
53	4,42	October	81,5	1,31	0	1,31	0	0,023	0,023	130,6	2375350	190,89
54	4,50	November	81,9	1,33	0	1,33	0	0,023	0,023	130,7	2423320	191
55	4,58	December	82,3	1,34	0	1,34	0	0,023	0,023	130,8	2471290	191,11
56	4,67	January	83	1,35	0	1,35	0	0,024	0,024	130,9	2519250	191,23
57	4,75	February	83,7	1,37	0	1,37	0	0,024	0,024	131	2567220	191,34
58	4,83	March	84,5	1,38	0	1,38	0	0,024	0,024	131	2615190	191,46

59	4,92	April	85,2	1,39	0	1,39	0	0,025	0,025	131,1	2663160	191,57
60	5,00	May	85,8	1,41	0	1,41	0	0,025	0,025	131,2	2711120	191,69
61	5,08	June	86	1,42	0	1,42	0	0,025	0,025	131,3	2760570	191,8
62	5,17	July	86,1	1,43	0	1,43	0	0,025	0,025	131,4	2810010	191,92
63	5,25	August	86,4	1,44	0	1,44	0	0,025	0,025	131,5	2859460	192,03
64	5,33	September	87,5	1,45	0	1,45	0	0,026	0,026	131,6	2908900	192,15
65	5,42	October	89,2	1,46	0	1,46	0	0,026	0,026	131,7	2958350	192,28
66	5,50	November	90,4	1,47	0	1,47	0	0,026	0,026	131,8	3007790	192,4
67	5,58	December	90,7	1,49	0	1,49	0	0,026	0,026	131,9	3057240	192,52
68	5,67	January	90,8	1,50	0	1,5	0	0,027	0,027	132	3106680	192,64
69	5,75	February	90,9	1,51	0	1,51	0	0,027	0,027	132,1	3156130	192,76
70	5,83	March	91,1	1,52	0	1,52	0	0,027	0,027	132,1	3205570	192,88
71	5,92	April	91,3	1,53	0	1,53	0	0,027	0,027	132,2	3255020	193
72	6,00	May	91,5	1,54	0	1,54	0	0,027	0,027	132,3	3304460	193,12
73	6,08	June	91,6	1,54	0	1,54	0	0,027	0,027	132,4	335430	193,24
74	6,17	July	91,7	1,55	0	1,55	0	0,027	0,027	132,5	340400	193,36
75	6,25	August	91,7	1,56	0	1,56	0	0,028	0,028	132,6	3453730	193,48
76	6,33	September	91,8	1,56	0	1,56	0	0,028	0,028	132,7	3503340	193,6
77	6,42	October	92	1,57	0	1,57	0	0,028	0,028	132,8	3552900	193,73
78	6,50	November	92,3	1,58	0	1,58	0	0,028	0,028	132,9	3610270	193,86
79	6,58	December	92,5	1,59	0	1,59	0	0,028	0,028	133	3661240	193,99
80	6,67	January	93	1,60	0	1,6	0	0,028	0,028	133,1	3712210	194,12
81	6,75	February	93,5	1,61	0	1,61	0	0,029	0,029	133,2	3763170	194,25
82	6,83	March	94,1	1,63	0	1,63	0	0,029	0,029	133,3	3814140	194,38
83	6,92	April	94,7	1,64	0	1,64	0	0,029	0,029	133,4	3865110	194,51
84	7,00	May	95,1	1,65	0	1,65	0	0,029	0,029	133,5	3916080	194,65
85	7,08	June	95,3	1,66	0	1,66	0	0,029	0,029	133,6	3968620	194,78
86	7,17	July	95,3	1,67	0	1,67	0	0,03	0,03	133,7	4021150	194,91
87	7,25	August	95,5	1,67	0	1,67	0	0,03	0,03	133,8	4073690	195,04
88	7,33	September	96,4	1,68	0	1,68	0	0,03	0,03	133,9	4126230	195,18
89	7,42	October	97,8	1,69	0	1,69	0	0,03	0,03	134	4178770	195,32
90	7,50	November	98,7	1,71	0	1,71	0	0,03	0,03	134,1	4231300	195,46
91	7,58	December	99	1,72	0	1,72	0	0,031	0,031	134,3	4283840	195,6
92	7,67	January	99	1,72	0	1,72	0	0,031	0,031	134,4	4336380	195,73
93	7,75	February	99,1	1,73	0	1,73	0	0,031	0,031	134,5	4388920	195,87
94	7,83	March	99,3	1,74	0	1,74	0	0,031	0,031	134,6	4441450	196
95	7,92	April	99,4	1,75	0	1,75	0	0,031	0,031	134,7	4493990	196,14
96	8,00	May	99,6	1,76	0	1,76	0	0,031	0,031	134,8	4546530	196,28
97	8,08	June	99,7	1,77	0	1,77	0	0,031	0,031	134,9	4600690	196,42
98	8,17	July	99,7	1,77	0	1,77	0	0,032	0,032	135	4654840	196,55
99	8,25	August	99,7	1,78	0	1,78	0	0,032	0,032	135,1	4709000	196,69
100	8,33	September	99,8	1,78	0	1,78	0	0,032	0,032	135,2	4763150	196,83
101	8,42	October	99,9	1,79	0	1,79	0	0,032	0,032	135,3	4817310	196,97
102	8,50	November	100	1,80	0	1,8	0	0,032	0,032	135,4	4871460	197,11
103	8,58	December	100	1,81	0	1,81	0	0,032	0,032	135,5	4925620	197,26
104	8,67	January	101	1,82	0	1,82	0	0,032	0,032	135,7	4979780	197,4
105	8,75	February	101	1,83	0	1,83	0	0,033	0,033	135,8	5033930	197,55
106	8,83	March	102	1,84	0	1,84	0	0,033	0,033	135,9	5088090	197,7
107	8,92	April	102	1,85	0	1,85	0	0,033	0,033	136	5142240	197,85
108	9,00	May	103	1,86	0	1,86	0	0,033	0,033	136,1	5196400	197,99
109	9,08	June	103	1,87	0	1,87	0	0,033	0,033	136,2	5252220	198,14
110	9,17	July	103	1,88	0	1,88	0	0,033	0,033	136,3	5308050	198,29
111	9,25	August	103	1,88	0	1,88	0	0,034	0,034	136,5	5363870	198,43
112	9,33	September	104	1,89	0	1,89	0	0,034	0,034	136,6	5419700	198,58
113	9,42	October	105	1,90	0	1,9	0	0,034	0,034	136,7	5475520	198,74
114	9,50	November	106	1,91	0	1,91	0	0,034	0,034	136,8	5531340	198,89
115	9,58	December	106	1,92	0	1,92	0	0,034	0,034	136,9	5587170	199,04
116	9,67	January	106	1,93	0	1,93	0	0,034	0,034	137,1	5642990	199,19
117	9,75	February	106	1,94	0	1,94	0	0,035	0,035	137,2	5698810	199,34
118	9,83	March	106	1,95	0	1,95	0	0,035	0,035	137,3	5754640	199,5
119	9,92	April	106	1,95	0	1,95	0	0,035	0,035	137,4	5810460	199,65
120	10,00	May	106	1,96	0	1,96	0	0,035	0,035	137,5	5866290	199,8
121	10,08	June	106	1,97	0	1,97	0	0,035	0,035	137,6	5923830	199,95
122	10,17	July	106	1,97	0	1,97	0	0,035	0,035	137,8	5981370	200,1
123	10,25	August	106	1,98	0	1,98	0	0,035	0,035	137,9	6038920	200,25
124	10,33	September	107	1,98	0	1,98	0	0,035	0,035	138	6096460	200,4
125	10,42	October	107	1,99	0	1,99	0	0,035	0,035	138,1	6154000	200,56
126	10,50	November	107	1,99	0	1,99	0	0,036	0,036	138,2	6211540	200,72
127	10,58	December	107	2,00	0	2	0	0,036	0,036	138,4	6269090	200,87
128	10,67	January	107	2,01	0	2,01	0	0,036	0,036	138,5	6326630	201,03

129	10,75	February	108	2,02	0	2,02	0	0,036	0,036	138,6	6384170	201,19
130	10,83	March	108	2,03	0	2,03	0	0,036	0,036	138,7	6441720	201,36
131	10,92	April	109	2,04	0	2,04	0	0,037	0,037	138,9	6499260	201,52
132	11,00	May	109	2,05	0	2,05	0	0,037	0,037	139	6556800	201,68
133	11,08	June	109	2,06	0	2,06	0	0,037	0,037	139,1	6616120	201,84
134	11,17	July	109	2,07	0	2,07	0	0,037	0,037	139,2	6675440	202
135	11,25	August	109	2,07	0	2,07	0	0,037	0,037	139,4	6734750	202,16
136	11,33	September	110	2,08	0	2,08	0	0,037	0,037	139,5	6794070	202,32
137	11,42	October	111	2,09	0	2,09	0	0,037	0,037	139,6	6853380	202,49
138	11,50	November	112	2,10	0	2,1	0	0,038	0,038	139,8	6912700	202,66
139	11,58	December	112	2,11	0	2,11	0	0,038	0,038	139,9	6972010	202,82
140	11,67	January	112	2,12	0	2,12	0	0,038	0,038	140	7031330	202,98
141	11,75	February	112	2,12	0	2,12	0	0,038	0,038	140,1	7090640	203,15
142	11,83	March	112	2,13	0	2,13	0	0,038	0,038	140,3	7149960	203,31
143	11,92	April	112	2,14	0	2,14	0	0,038	0,038	140,4	7209270	203,48
144	12,00	May	112	2,15	0	2,15	0	0,038	0,038	140,5	7268590	203,65
145	12,08	June	112	2,15	0	2,15	0	0,039	0,039	140,7	7327930	203,81
146	12,17	July	112	2,16	0	2,16	0	0,039	0,039	140,8	7390880	203,97
147	12,25	August	112	2,16	0	2,16	0	0,039	0,039	140,9	7452020	204,14
148	12,33	September	113	2,17	0	2,17	0	0,039	0,039	141	7513160	204,3
149	12,42	October	113	2,17	0	2,17	0	0,039	0,039	141,2	7574300	204,47
150	12,50	November	113	2,18	0	2,18	0	0,039	0,039	141,3	7635440	204,64
151	12,58	December	113	2,19	0	2,19	0	0,039	0,039	141,4	7696590	204,8
152	12,67	January	113	2,20	0	2,2	0	0,039	0,039	141,6	7757730	204,98
153	12,75	February	114	2,21	0	2,21	0	0,04	0,04	141,7	7818870	205,15
154	12,83	March	114	2,22	0	2,22	0	0,04	0,04	141,8	7880010	205,33
155	12,92	April	114	2,22	0	2,22	0	0,04	0,04	142	7941160	205,5
156	13,00	May	115	2,23	0	2,23	0	0,04	0,04	142,1	8002300	205,68
157	13,08	June	115	2,24	0	2,24	0	0,04	0,04	142,3	8065330	205,85
158	13,17	July	115	2,25	0	2,25	0	0,04	0,04	142,4	8128350	206,02
159	13,25	August	115	2,25	0	2,25	0	0,04	0,04	142,5	8191380	206,19
160	13,33	September	116	2,26	0	2,26	0	0,041	0,041	142,7	8254400	206,36
161	13,42	October	117	2,27	0	2,27	0	0,041	0,041	142,8	8317430	206,54
162	13,50	November	117	2,28	0	2,28	0	0,041	0,041	142,9	8380450	206,72
163	13,58	December	117	2,29	0	2,29	0	0,041	0,041	143,1	8443480	206,9
164	13,67	January	118	2,29	0	2,29	0	0,041	0,041	143,2	8506500	207,08
165	13,75	February	118	2,30	0	2,3	0	0,041	0,041	143,4	8569530	207,25
166	13,83	March	118	2,31	0	2,31	0	0,042	0,042	143,5	8632560	207,43
167	13,92	April	118	2,32	0	2,32	0	0,042	0,042	143,6	8695580	207,6
168	14,00	May	118	2,32	0	2,32	0	0,042	0,042	143,8	8758610	207,78
169	14,08	June	118	2,33	0	2,33	0	0,042	0,042	143,9	8823570	207,96
170	14,17	July	118	2,33	0	2,33	0	0,042	0,042	144,1	8888540	208,13
171	14,25	August	118	2,34	0	2,34	0	0,042	0,042	144,2	8953510	208,31
172	14,33	September	118	2,34	0	2,34	0	0,042	0,042	144,3	9018470	208,48
173	14,42	October	118	2,35	0	2,35	0	0,042	0,042	144,5	9083440	208,66
174	14,50	November	118	2,35	0	2,35	0	0,042	0,042	144,6	9148410	208,85
175	14,58	December	118	2,36	0	2,36	0	0,042	0,042	144,8	9213370	209,03
176	14,67	January	119	2,37	0	2,37	0	0,043	0,043	144,9	9278340	209,21
177	14,75	February	119	2,38	0	2,38	0	0,043	0,043	145	9343310	209,4
178	14,83	March	119	2,39	0	2,39	0	0,043	0,043	145,2	9408280	209,58
179	14,92	April	120	2,40	0	2,4	0	0,043	0,043	145,3	9473240	209,76
180	15,00	May	120	2,40	0	2,4	0	0,043	0,043	145,5	9538210	209,95
181	15,08	June	120	2,41	0	2,41	0	0,043	0,043	145,6	9605180	210,13
182	15,17	July	120	2,42	0	2,42	0	0,043	0,043	145,8	9672140	210,31
183	15,25	August	120	2,42	0	2,42	0	0,044	0,044	145,9	9739110	210,5
184	15,33	September	121	2,43	0	2,43	0	0,044	0,044	146,1	9806080	210,68
185	15,42	October	122	2,44	0	2,44	0	0,044	0,044	146,2	9873050	210,88
186	15,50	November	122	2,45	0	2,45	0	0,044	0,044	146,4	9940020	211,06
187	15,58	December	123	2,46	0	2,46	0	0,044	0,044	146,5	10007000	211,25
188	15,67	January	123	2,46	0	2,46	0	0,044	0,044	146,7	10074000	211,44
189	15,75	February	123	2,47	0	2,47	0	0,045	0,045	146,8	10140900	211,62
190	15,83	March	123	2,48	0	2,48	0	0,045	0,045	147	10207900	211,81
191	15,92	April	123	2,48	0	2,48	0	0,045	0,045	147,1	10274900	212
192	16,00	May	123	2,49	0	2,49	0	0,045	0,045	147,2	10341800	212,19
193	16,08	June	123	2,50	0	2,5	0	0,045	0,045	147,4	10410900	212,37
194	16,17	July	123	2,50	0	2,5	0	0,045	0,045	147,5	10479900	212,56
195	16,25	August	123	2,50	0	2,5	0	0,045	0,045	147,7	10548900	212,75
196	16,33	September	123	2,51	0	2,51	0	0,045	0,045	147,8	10617900	212,93
197	16,42	October	123	2,51	0	2,51	0	0,045	0,045	148	10687000	213,12
198	16,50	November	123	2,52	0	2,52	0	0,045	0,045	148,1	10756000	213,31
199	16,58	December	124	2,53	0	2,53	0	0,046	0,046	148,3	10825000	213,5
200	16,67	January	124	2,54	0	2,54	0	0,046	0,046	148,4	10894100	213,7
201	16,75	February	124	2,54	0	2,54	0	0,046	0,046	148,6	10963100	213,9

202	16,83	March	125	2,55	0	2,55	0	0,046	0,046	148,8	11032100	214,09
203	16,92	April	125	2,56	0	2,56	0	0,046	0,046	148,9	11101200	214,28
204	17,00	May	125	2,57	0	2,57	0	0,046	0,046	149,1	11170200	214,48
205	17,08	June	125	2,58	0	2,58	0	0,047	0,047	149,2	11241300	214,67
206	17,17	July	125	2,58	0	2,58	0	0,047	0,047	149,4	11312500	214,87
207	17,25	August	125	2,59	0	2,59	0	0,047	0,047	149,5	11383700	215,06
208	17,33	September	126	2,59	0	2,59	0	0,047	0,047	149,7	11454800	215,26
209	17,42	October	127	2,60	0	2,6	0	0,047	0,047	149,8	11526000	215,46
210	17,50	November	127	2,61	0	2,61	0	0,047	0,047	150	11597100	215,66
211	17,58	December	128	2,62	0	2,62	0	0,047	0,047	150,2	11668300	215,85
212	17,67	January	128	2,63	0	2,63	0	0,048	0,048	150,3	11739400	216,05
213	17,75	February	128	2,63	0	2,63	0	0,048	0,048	150,5	11810600	216,25
214	17,83	March	128	2,64	0	2,64	0	0,048	0,048	150,6	11881800	216,45
215	17,92	April	128	2,65	0	2,65	0	0,048	0,048	150,8	11952900	216,64
216	18,00	May	128	2,65	0	2,65	0	0,048	0,048	150,9	12024100	216,84
217	18,08	June	128	2,66	0	2,66	0	0,048	0,048	151,1	12097400	217,04
218	18,17	July	128	2,66	0	2,66	0	0,048	0,048	151,2	12170800	217,23
219	18,25	August	128	2,67	0	2,67	0	0,048	0,048	151,4	12244100	217,43
220	18,33	September	128	2,67	0	2,67	0	0,048	0,048	151,6	12317500	217,63
221	18,42	October	128	2,68	0	2,68	0	0,048	0,048	151,7	12390800	217,83
222	18,50	November	128	2,68	0	2,68	0	0,048	0,048	151,9	12464200	218,03
223	18,58	December	128	2,69	0	2,69	0	0,049	0,049	152	12537500	218,23
224	18,67	January	129	2,70	0	2,7	0	0,049	0,049	152,2	12610900	218,43
225	18,75	February	129	2,71	0	2,71	0	0,049	0,049	152,4	12684200	218,64
226	18,83	March	129	2,71	0	2,71	0	0,049	0,049	152,5	12757500	218,84
227	18,92	April	130	2,72	0	2,72	0	0,049	0,049	152,7	12830900	219,05
228	19,00	May	130	2,73	0	2,73	0	0,049	0,049	152,9	12904200	219,25
229	19,08	June	130	2,74	0	2,74	0	0,05	0,05	153	12979900	219,46
230	19,17	July	130	2,74	0	2,74	0	0,05	0,05	153,2	13055500	219,66
231	19,25	August	130	2,75	0	2,75	0	0,05	0,05	153,3	13131100	219,86
232	19,33	September	131	2,75	0	2,75	0	0,05	0,05	153,5	13206700	220,07
233	19,42	October	132	2,76	0	2,76	0	0,05	0,05	153,7	13282300	220,28
234	19,50	November	132	2,77	0	2,77	0	0,05	0,05	153,8	13357900	220,49
235	19,58	December	132	2,78	0	2,78	0	0,05	0,05	154	13433500	220,69
236	19,67	January	132	2,78	0	2,78	0	0,051	0,051	154,2	13509100	220,9
237	19,75	February	132	2,79	0	2,79	0	0,051	0,051	154,3	13584700	221,1
238	19,83	March	133	2,80	0	2,8	0	0,051	0,051	154,5	13660300	221,31
239	19,92	April	133	2,81	0	2,81	0	0,051	0,051	154,7	13735900	221,52
240	20,00	May	133	2,81	0	2,81	0	0,051	0,051	154,8	13811500	221,72

Predicción de Deterioros Subtramo TCD2 Calzada Derecha

Predicted distress: Project Subtramo TCD2 Calzada Derecha

Pavement age		Month	Longitudinal Cracking (ft/mi)	Alligator Cracking in New AC Layer FCI(%)	Reflective Cracking Existing Layers FC2(%)	Total Cracking Surface FCI + FC2 (%)	Transverse Cracking (ft/mi)	Subtotal AC Rutting (in)	Total Rutting (in)	IRI (in/mi)	Heavy Trucks (cumulative)	IRI at Reliability (in/mi)
month	year											
1	0,08	June	5,68	0,172	0	0,172	0	0,003	0,003	127,1	44548	186,4
2	0,17	July	7,68	0,217	0	0,217	0	0,004	0,004	127,2	89096	186,47
3	0,25	August	8,28	0,246	0	0,246	0	0,005	0,005	127,2	133644	186,53
4	0,33	September	11,7	0,277	0	0,277	0	0,005	0,005	127,3	178193	186,59
5	0,42	October	13,8	0,312	0	0,312	0	0,006	0,006	127,3	222741	186,66
6	0,5	November	16,6	0,348	0	0,348	0	0,007	0,007	127,4	267289	186,73
7	0,58	December	18,4	0,383	0	0,383	0	0,008	0,008	127,5	311837	186,81
8	0,67	January	21,2	0,421	0	0,421	0	0,009	0,009	127,5	356385	186,88
9	0,75	February	23,5	0,458	0	0,458	0	0,01	0,01	127,6	400933	186,97
10	0,83	March	25,9	0,494	0	0,494	0	0,01	0,01	127,6	445481	187,05
11	0,92	April	27,4	0,52	0	0,52	0	0,011	0,011	127,7	490030	187,13
12	1	May	28,5	0,545	0	0,545	0	0,012	0,012	127,8	534578	187,2
13	1,08	June	28,8	0,568	0	0,568	0	0,012	0,012	127,8	580498	187,27
14	1,17	July	29	0,586	0	0,586	0	0,012	0,012	127,9	626418	187,34
15	1,25	August	29,2	0,6	0	0,6	0	0,013	0,013	127,9	672338	187,4
16	1,33	September	30,9	0,615	0	0,615	0	0,013	0,013	128	718259	187,48
17	1,42	October	32	0,637	0	0,637	0	0,014	0,014	128	764179	187,56
18	1,5	November	33,8	0,661	0	0,661	0	0,014	0,014	128,1	810099	187,65
19	1,58	December	34,1	0,681	0	0,681	0	0,015	0,015	128,2	856019	187,72
20	1,67	January	34,2	0,696	0	0,696	0	0,015	0,015	128,2	901940	187,8
21	1,75	February	34,2	0,712	0	0,712	0	0,015	0,015	128,3	947860	187,87
22	1,83	March	34,3	0,729	0	0,729	0	0,016	0,016	128,3	993780	187,95
23	1,92	April	34,5	0,744	0	0,744	0	0,016	0,016	128,4	1039700	188,03
24	2	May	34,6	0,756	0	0,756	0	0,016	0,016	128,5	1085620	188,11
25	2,08	June	34,7	0,768	0	0,768	0	0,016	0,016	128,5	1132960	188,19
26	2,17	July	34,7	0,776	0	0,776	0	0,017	0,017	128,6	1180290	188,26
27	2,25	August	34,7	0,783	0	0,783	0	0,017	0,017	128,6	1227620	188,34
28	2,33	September	34,7	0,791	0	0,791	0	0,017	0,017	128,7	1274960	188,42
29	2,42	October	34,8	0,802	0	0,802	0	0,017	0,017	128,8	1322290	188,5
30	2,5	November	35	0,814	0	0,814	0	0,017	0,017	128,8	1369630	188,58
31	2,58	December	35,2	0,828	0	0,828	0	0,018	0,018	128,9	1416960	188,67
32	2,67	January	35,6	0,843	0	0,843	0	0,018	0,018	129	1464300	188,76
33	2,75	February	36	0,86	0	0,86	0	0,018	0,018	129	1511630	188,86
34	2,83	March	36,5	0,878	0	0,878	0	0,019	0,019	129,1	1558970	188,96
35	2,92	April	36,9	0,892	0	0,892	0	0,019	0,019	129,2	1606300	189,05
36	3	May	37,2	0,905	0	0,905	0	0,019	0,019	129,3	1653640	189,15
37	3,08	June	37,3	0,918	0	0,918	0	0,02	0,02	129,3	1702430	189,24
38	3,17	July	37,3	0,929	0	0,929	0	0,02	0,02	129,4	1751220	189,33
39	3,25	August	37,4	0,938	0	0,938	0	0,02	0,02	129,5	1800010	189,42
40	3,33	September	38	0,947	0	0,947	0	0,02	0,02	129,5	1848810	189,51
41	3,42	October	39,5	0,961	0	0,961	0	0,021	0,021	129,6	1897600	189,62
42	3,5	November	40,3	0,976	0	0,976	0	0,021	0,021	129,7	1946390	189,72
43	3,58	December	40,4	0,989	0	0,989	0	0,021	0,021	129,8	1995180	189,83
44	3,67	January	40,4	0,999	0	0,999	0	0,021	0,021	129,9	2043970	189,92
45	3,75	February	40,4	1,01	0	1,01	0	0,022	0,022	129,9	2092770	190,02
46	3,83	March	40,4	1,02	0	1,02	0	0,022	0,022	130	2141560	190,12
47	3,92	April	40,5	1,03	0	1,03	0	0,022	0,022	130,1	2190350	190,22
48	4	May	40,5	1,04	0	1,04	0	0,022	0,022	130,2	2239150	190,32
49	4,08	June	40,6	1,05	0	1,05	0	0,022	0,022	130,2	2289440	190,42
50	4,17	July	40,6	1,06	0	1,06	0	0,022	0,022	130,3	2339740	190,52
51	4,25	August	40,6	1,06	0	1,06	0	0,023	0,023	130,4	2390030	190,62
52	4,33	September	40,6	1,07	0	1,07	0	0,023	0,023	130,5	2440330	190,72
53	4,42	October	40,6	1,07	0	1,07	0	0,023	0,023	130,6	2490620	190,83
54	4,5	November	40,7	1,08	0	1,08	0	0,023	0,023	130,6	2540920	190,94
55	4,58	December	40,8	1,09	0	1,09	0	0,023	0,023	130,7	2591210	191,04
56	4,67	January	41	1,11	0	1,11	0	0,024	0,024	130,8	2641510	191,15
57	4,75	February	41,2	1,12	0	1,12	0	0,024	0,024	130,9	2691800	191,27
58	4,83	March	41,5	1,13	0	1,13	0	0,024	0,024	131	2742100	191,38
59	4,92	April	41,7	1,14	0	1,14	0	0,024	0,024	131,1	2792390	191,49
60	5	May	41,9	1,15	0	1,15	0	0,025	0,025	131,2	2842690	191,61

61	5,08	June	41,9	1,16	0	1,16	0	0,025	0,025	131,2	2894530	191,72
62	5,17	July	41,9	1,17	0	1,17	0	0,025	0,025	131,3	2946380	191,83
63	5,25	August	41,9	1,18	0	1,18	0	0,025	0,025	131,4	2998220	191,94
64	5,33	September	42,4	1,19	0	1,19	0	0,025	0,025	131,5	3050070	192,06
65	5,42	October	43,4	1,2	0	1,2	0	0,026	0,026	131,6	3101910	192,19
66	5,5	November	43,9	1,21	0	1,21	0	0,026	0,026	131,7	3153760	192,31
67	5,58	December	44	1,22	0	1,22	0	0,026	0,026	131,8	3205600	192,43
68	5,67	January	44	1,23	0	1,23	0	0,026	0,026	131,9	3257440	192,54
69	5,75	February	44	1,24	0	1,24	0	0,026	0,026	132	3309290	192,66
70	5,83	March	44	1,25	0	1,25	0	0,027	0,027	132,1	3361130	192,78
71	5,92	April	44	1,26	0	1,26	0	0,027	0,027	132,2	3412980	192,9
72	6	May	44,1	1,26	0	1,26	0	0,027	0,027	132,2	3464820	193,01
73	6,08	June	44,1	1,27	0	1,27	0	0,027	0,027	132,3	3518260	193,14
74	6,17	July	44,1	1,27	0	1,27	0	0,027	0,027	132,4	3571700	193,26
75	6,25	August	44,1	1,28	0	1,28	0	0,027	0,027	132,5	3625140	193,37
76	6,33	September	44,1	1,28	0	1,28	0	0,027	0,027	132,6	3678590	193,49
77	6,42	October	44,1	1,29	0	1,29	0	0,027	0,027	132,7	3732030	193,62
78	6,5	November	44,1	1,3	0	1,3	0	0,028	0,028	132,8	3785470	193,74
79	6,58	December	44,2	1,31	0	1,31	0	0,028	0,028	132,9	3838910	193,87
80	6,67	January	44,3	1,32	0	1,32	0	0,028	0,028	133	3892350	193,99
81	6,75	February	44,5	1,33	0	1,33	0	0,028	0,028	133,1	3945790	194,13
82	6,83	March	44,7	1,34	0	1,34	0	0,028	0,028	133,2	3999230	194,26
83	6,92	April	44,9	1,35	0	1,35	0	0,029	0,029	133,3	4052670	194,39
84	7	May	45	1,36	0	1,36	0	0,029	0,029	133,4	4106120	194,52
85	7,08	June	45	1,37	0	1,37	0	0,029	0,029	133,5	4161200	194,65
86	7,17	July	45	1,37	0	1,37	0	0,029	0,029	133,6	4216290	194,78
87	7,25	August	45	1,38	0	1,38	0	0,029	0,029	133,7	4271380	194,9
88	7,33	September	45,3	1,39	0	1,39	0	0,029	0,029	133,8	4326460	195,04
89	7,42	October	46,2	1,4	0	1,4	0	0,03	0,03	133,9	4381550	195,17
90	7,5	November	46,6	1,41	0	1,41	0	0,03	0,03	134	4436640	195,31
91	7,58	December	46,6	1,42	0	1,42	0	0,03	0,03	134,1	4491730	195,45
92	7,67	January	46,6	1,42	0	1,42	0	0,03	0,03	134,2	4546810	195,58
93	7,75	February	46,6	1,43	0	1,43	0	0,03	0,03	134,3	4601900	195,72
94	7,83	March	46,7	1,44	0	1,44	0	0,031	0,031	134,4	4656990	195,85
95	7,92	April	46,7	1,45	0	1,45	0	0,031	0,031	134,6	4712070	195,99
96	8	May	46,7	1,45	0	1,45	0	0,031	0,031	134,7	4767160	196,12
97	8,08	June	46,7	1,46	0	1,46	0	0,031	0,031	134,8	4823950	196,26
98	8,17	July	46,7	1,46	0	1,46	0	0,031	0,031	134,9	4880730	196,39
99	8,25	August	46,7	1,47	0	1,47	0	0,031	0,031	135	4937510	196,52
100	8,33	September	46,7	1,47	0	1,47	0	0,031	0,031	135,1	4994300	196,66
101	8,42	October	46,7	1,48	0	1,48	0	0,031	0,031	135,2	5051080	196,8
102	8,5	November	46,8	1,48	0	1,48	0	0,031	0,031	135,3	5107860	196,94
103	8,58	December	46,8	1,49	0	1,49	0	0,032	0,032	135,4	5164650	197,08
104	8,67	January	46,9	1,5	0	1,5	0	0,032	0,032	135,5	5221430	197,22
105	8,75	February	47	1,51	0	1,51	0	0,032	0,032	135,6	5278220	197,37
106	8,83	March	47,2	1,52	0	1,52	0	0,032	0,032	135,7	5335000	197,52
107	8,92	April	47,3	1,53	0	1,53	0	0,032	0,032	135,9	5391780	197,66
108	9	May	47,4	1,54	0	1,54	0	0,033	0,033	136	5448570	197,81
109	9,08	June	47,4	1,55	0	1,55	0	0,033	0,033	136,1	5505360	197,95
110	9,17	July	47,4	1,55	0	1,55	0	0,033	0,033	136,2	5562140	198,09
111	9,25	August	47,5	1,56	0	1,56	0	0,033	0,033	136,3	5618930	198,24
112	9,33	September	47,7	1,56	0	1,56	0	0,033	0,033	136,4	5675720	198,39
113	9,42	October	48,4	1,57	0	1,57	0	0,033	0,033	136,5	5732510	198,54
114	9,5	November	48,8	1,58	0	1,58	0	0,034	0,034	136,7	5789300	198,69
115	9,58	December	48,8	1,59	0	1,59	0	0,034	0,034	136,8	5846090	198,84
116	9,67	January	48,8	1,6	0	1,6	0	0,034	0,034	136,9	5902880	198,98
117	9,75	February	48,8	1,6	0	1,6	0	0,034	0,034	137	5959670	199,13
118	9,83	March	48,9	1,61	0	1,61	0	0,034	0,034	137,1	6016460	199,28
119	9,92	April	48,9	1,62	0	1,62	0	0,034	0,034	137,2	6073250	199,44
120	10	May	48,9	1,62	0	1,62	0	0,034	0,034	137,4	6130040	199,58
121	10,08	June	48,9	1,63	0	1,63	0	0,034	0,034	137,5	6186830	199,73
122	10,17	July	48,9	1,63	0	1,63	0	0,035	0,035	137,6	6243620	199,88
123	10,25	August	48,9	1,64	0	1,64	0	0,035	0,035	137,7	6300410	200,03
124	10,33	September	48,9	1,64	0	1,64	0	0,035	0,035	137,8	6357200	200,18
125	10,42	October	48,9	1,65	0	1,65	0	0,035	0,035	137,9	6413990	200,33
126	10,5	November	48,9	1,65	0	1,65	0	0,035	0,035	138,1	6470780	200,48
127	10,58	December	49	1,66	0	1,66	0	0,035	0,035	138,2	6527570	200,64
128	10,67	January	49,1	1,67	0	1,67	0	0,035	0,035	138,3	6584360	200,79
129	10,75	February	49,2	1,68	0	1,68	0	0,035	0,035	138,4	6641150	200,96
130	10,83	March	49,3	1,69	0	1,69	0	0,036	0,036	138,6	6697940	201,12
131	10,92	April	49,4	1,69	0	1,69	0	0,036	0,036	138,7	6754730	201,27
132	11	May	49,5	1,7	0	1,7	0	0,036	0,036	138,8	6811520	201,43

133	11,08	June	49,5	1,71	0	1,71	0	0,036	0,036	138,9	6937180	201,59
134	11,17	July	49,5	1,72	0	1,72	0	0,036	0,036	139	6999380	201,74
135	11,25	August	49,5	1,72	0	1,72	0	0,036	0,036	139,2	7061570	201,9
136	11,33	September	49,8	1,73	0	1,73	0	0,036	0,036	139,3	7123770	202,06
137	11,42	October	50,4	1,73	0	1,73	0	0,037	0,037	139,4	7185960	202,23
138	11,5	November	50,8	1,74	0	1,74	0	0,037	0,037	139,6	7248150	202,4
139	11,58	December	50,8	1,75	0	1,75	0	0,037	0,037	139,7	7310350	202,56
140	11,67	January	50,8	1,76	0	1,76	0	0,037	0,037	139,8	7372540	202,71
141	11,75	February	50,8	1,76	0	1,76	0	0,037	0,037	139,9	7434730	202,88
142	11,83	March	50,8	1,77	0	1,77	0	0,037	0,037	140,1	7496930	203,04
143	11,92	April	50,8	1,78	0	1,78	0	0,038	0,038	140,2	7559120	203,2
144	12	May	50,8	1,78	0	1,78	0	0,038	0,038	140,3	7621320	203,36
145	12,08	June	50,8	1,79	0	1,79	0	0,038	0,038	140,4	7685430	203,53
146	12,17	July	50,8	1,79	0	1,79	0	0,038	0,038	140,6	7749540	203,69
147	12,25	August	50,8	1,8	0	1,8	0	0,038	0,038	140,7	7813650	203,85
148	12,33	September	50,8	1,8	0	1,8	0	0,038	0,038	140,8	7877750	204,01
149	12,42	October	50,8	1,8	0	1,8	0	0,038	0,038	140,9	7941860	204,17
150	12,5	November	50,9	1,81	0	1,81	0	0,038	0,038	141,1	8005970	204,34
151	12,58	December	50,9	1,82	0	1,82	0	0,038	0,038	141,2	8070080	204,51
152	12,67	January	51	1,82	0	1,82	0	0,039	0,039	141,3	8134190	204,68
153	12,75	February	51,1	1,83	0	1,83	0	0,039	0,039	141,5	8198300	204,85
154	12,83	March	51,2	1,84	0	1,84	0	0,039	0,039	141,6	8262410	205,02
155	12,92	April	51,3	1,85	0	1,85	0	0,039	0,039	141,7	8326520	205,19
156	13	May	51,4	1,86	0	1,86	0	0,039	0,039	141,9	8390630	205,36
157	13,08	June	51,4	1,86	0	1,86	0	0,039	0,039	142	8456720	205,53
158	13,17	July	51,4	1,87	0	1,87	0	0,039	0,039	142,1	8522800	205,7
159	13,25	August	51,4	1,87	0	1,87	0	0,04	0,04	142,3	8588880	205,87
160	13,33	September	51,6	1,88	0	1,88	0	0,04	0,04	142,4	8654970	206,04
161	13,42	October	52,2	1,89	0	1,89	0	0,04	0,04	142,5	8721050	206,22
162	13,5	November	52,6	1,9	0	1,9	0	0,04	0,04	142,7	8787140	206,4
163	13,58	December	52,6	1,9	0	1,9	0	0,04	0,04	142,8	8853220	206,57
164	13,67	January	52,6	1,91	0	1,91	0	0,04	0,04	143	8919300	206,74
165	13,75	February	52,6	1,91	0	1,91	0	0,041	0,041	143,1	8985390	206,91
166	13,83	March	52,6	1,92	0	1,92	0	0,041	0,041	143,2	9051470	207,09
167	13,92	April	52,6	1,93	0	1,93	0	0,041	0,041	143,4	9117560	207,26
168	14	May	52,6	1,93	0	1,93	0	0,041	0,041	143,5	9183640	207,44
169	14,08	June	52,6	1,94	0	1,94	0	0,041	0,041	143,6	9251760	207,61
170	14,17	July	52,6	1,94	0	1,94	0	0,041	0,041	143,8	9319880	207,78
171	14,25	August	52,6	1,95	0	1,95	0	0,041	0,041	143,9	9388000	207,95
172	14,33	September	52,6	1,95	0	1,95	0	0,041	0,041	144	9456120	208,13
173	14,42	October	52,6	1,95	0	1,95	0	0,041	0,041	144,2	9524240	208,3
174	14,5	November	52,7	1,96	0	1,96	0	0,041	0,041	144,3	9592360	208,48
175	14,58	December	52,7	1,97	0	1,97	0	0,042	0,042	144,5	9660480	208,66
176	14,67	January	52,8	1,97	0	1,97	0	0,042	0,042	144,6	9728600	208,84
177	14,75	February	52,8	1,98	0	1,98	0	0,042	0,042	144,7	9796720	209,02
178	14,83	March	53	1,99	0	1,99	0	0,042	0,042	144,9	9864840	209,2
179	14,92	April	53,1	2	0	2	0	0,042	0,042	145	9932950	209,38
180	15	May	53,1	2	0	2	0	0,042	0,042	145,2	10001100	209,57
181	15,08	June	53,1	2,01	0	2,01	0	0,042	0,042	145,3	10071300	209,75
182	15,17	July	53,1	2,02	0	2,02	0	0,043	0,043	145,5	10141500	209,93
183	15,25	August	53,1	2,02	0	2,02	0	0,043	0,043	145,6	10211700	210,11
184	15,33	September	53,4	2,02	0	2,02	0	0,043	0,043	145,8	10281900	210,29
185	15,42	October	53,9	2,03	0	2,03	0	0,043	0,043	145,9	10352200	210,47
186	15,5	November	54,2	2,04	0	2,04	0	0,043	0,043	146	10422400	210,66
187	15,58	December	54,3	2,05	0	2,05	0	0,043	0,043	146,2	10492600	210,85
188	15,67	January	54,3	2,05	0	2,05	0	0,043	0,043	146,3	10562800	211,03
189	15,75	February	54,3	2,06	0	2,06	0	0,044	0,044	146,5	10633000	211,22
190	15,83	March	54,3	2,07	0	2,07	0	0,044	0,044	146,6	10703200	211,4
191	15,92	April	54,3	2,07	0	2,07	0	0,044	0,044	146,8	10773500	211,58
192	16	May	54,3	2,08	0	2,08	0	0,044	0,044	146,9	10843700	211,77
193	16,08	June	54,3	2,08	0	2,08	0	0,044	0,044	147,1	10916100	211,95
194	16,17	July	54,3	2,09	0	2,09	0	0,044	0,044	147,2	10988400	212,14
195	16,25	August	54,3	2,09	0	2,09	0	0,044	0,044	147,4	11060800	212,32
196	16,33	September	54,3	2,09	0	2,09	0	0,044	0,044	147,5	11133200	212,5
197	16,42	October	54,3	2,1	0	2,1	0	0,044	0,044	147,6	11205600	212,69
198	16,5	November	54,3	2,1	0	2,1	0	0,044	0,044	147,8	11278000	212,88
199	16,58	December	54,3	2,11	0	2,11	0	0,045	0,045	147,9	11350300	213,06
200	16,67	January	54,4	2,11	0	2,11	0	0,045	0,045	148,1	11422700	213,26
201	16,75	February	54,5	2,12	0	2,12	0	0,045	0,045	148,2	11495100	213,45
202	16,83	March	54,6	2,13	0	2,13	0	0,045	0,045	148,4	11567500	213,64
203	16,92	April	54,7	2,14	0	2,14	0	0,045	0,045	148,6	11639900	213,83
204	17	May	54,8	2,14	0	2,14	0	0,045	0,045	148,7	11712200	214,03
205	17,08	June	54,8	2,15	0	2,15	0	0,045	0,045	148,9	11786900	214,22

206	17,17	July	54,8	2,16	0	2,16	0	0,046	0,046	149	11861500	214,41
207	17,25	August	54,8	2,16	0	2,16	0	0,046	0,046	149,2	11936100	214,6
208	17,33	September	55	2,17	0	2,17	0	0,046	0,046	149,3	12010700	214,79
209	17,42	October	55,6	2,17	0	2,17	0	0,046	0,046	149,5	12085300	214,99
210	17,5	November	55,8	2,18	0	2,18	0	0,046	0,046	149,6	12159900	215,18
211	17,58	December	55,9	2,19	0	2,19	0	0,046	0,046	149,8	12234500	215,38
212	17,67	January	55,9	2,19	0	2,19	0	0,046	0,046	149,9	12309100	215,57
213	17,75	February	55,9	2,2	0	2,2	0	0,047	0,047	150,1	12383700	215,76
214	17,83	March	55,9	2,21	0	2,21	0	0,047	0,047	150,2	12458300	215,96
215	17,92	April	55,9	2,21	0	2,21	0	0,047	0,047	150,4	12533000	216,15
216	18	May	55,9	2,22	0	2,22	0	0,047	0,047	150,5	12607600	216,35
217	18,08	June	55,9	2,22	0	2,22	0	0,047	0,047	150,7	12684500	216,54
218	18,17	July	55,9	2,22	0	2,22	0	0,047	0,047	150,9	12761400	216,74
219	18,25	August	55,9	2,23	0	2,23	0	0,047	0,047	151	12838300	216,93
220	18,33	September	55,9	2,23	0	2,23	0	0,047	0,047	151,2	12915200	217,12
221	18,42	October	55,9	2,23	0	2,23	0	0,047	0,047	151,3	12992100	217,32
222	18,5	November	55,9	2,24	0	2,24	0	0,047	0,047	151,5	13069000	217,52
223	18,58	December	55,9	2,25	0	2,25	0	0,048	0,048	151,6	13145900	217,71
224	18,67	January	56	2,25	0	2,25	0	0,048	0,048	151,8	13222800	217,92
225	18,75	February	56,1	2,26	0	2,26	0	0,048	0,048	152	13299700	218,12
226	18,83	March	56,2	2,27	0	2,27	0	0,048	0,048	152,1	13376600	218,32
227	18,92	April	56,3	2,27	0	2,27	0	0,048	0,048	152,3	13453500	218,52
228	19	May	56,4	2,28	0	2,28	0	0,048	0,048	152,4	13530500	218,72
229	19,08	June	56,4	2,29	0	2,29	0	0,048	0,048	152,6	13609700	218,93
230	19,17	July	56,4	2,29	0	2,29	0	0,049	0,049	152,8	13689000	219,13
231	19,25	August	56,4	2,3	0	2,3	0	0,049	0,049	152,9	13768300	219,32
232	19,33	September	56,6	2,3	0	2,3	0	0,049	0,049	153,1	13847600	219,53
233	19,42	October	57,1	2,31	0	2,31	0	0,049	0,049	153,2	13926800	219,73
234	19,5	November	57,4	2,32	0	2,32	0	0,049	0,049	153,4	14006100	219,94
235	19,58	December	57,4	2,32	0	2,32	0	0,049	0,049	153,6	14085400	220,14
236	19,67	January	57,4	2,33	0	2,33	0	0,049	0,049	153,7	14164700	220,34
237	19,75	February	57,4	2,33	0	2,33	0	0,05	0,05	153,9	14243900	220,54
238	19,83	March	57,4	2,34	0	2,34	0	0,05	0,05	154	14323200	220,75
239	19,92	April	57,4	2,35	0	2,35	0	0,05	0,05	154,2	14402500	220,96
240	20	May	57,4	2,35	0	2,35	0	0,05	0,05	154,4	14481800	221,16

Predicción de Deterioros Subtramo TCI1 Calzada Izquierda

Predicted distress: Project: Subtramo TCI1 Calzada Izquierda

Pavement age		Month	Longitudinal Cracking (ft/mi)	Alligator Cracking in New AC Layer FCI(%)	Reflective Cracking Existing Layers FC2(%)	Total Cracking Surface FCI + FC2 (%)	Transverse Cracking (ft/mi)	Subtotal AC Rutting (in)	Total Rutting (in)	IRI (in/mi)	Heavy Trucks (cumulative)	IRI at Reliability (in/mi)
month	year											
1	0,08	June	41	0,056	0	0,056	0	0,004	0,004	127,2	48297	186,43
2	0,17	July	49	0,0697	0	0,0697	0	0,005	0,005	127,2	96593	186,51
3	0,25	August	53,5	0,0783	0	0,0783	0	0,005	0,005	127,3	144889	186,56
4	0,33	September	61,5	0,0882	0	0,0882	0	0,006	0,006	127,3	193186	186,64
5	0,42	October	68,1	0,1	0	0,1	0	0,007	0,007	127,4	241482	186,71
6	0,5	November	75,1	0,113	0	0,113	0	0,008	0,008	127,4	289779	186,79
7	0,58	December	81	0,126	0	0,126	0	0,009	0,009	127,5	338075	186,87
8	0,67	January	88,1	0,14	0	0,14	0	0,01	0,01	127,6	386372	186,95
9	0,75	February	94,5	0,155	0	0,155	0	0,011	0,011	127,6	434668	187,04
10	0,83	March	101	0,169	0	0,169	0	0,012	0,012	127,7	482965	187,13
11	0,92	April	105	0,178	0	0,178	0	0,013	0,013	127,8	531261	187,21
12	1	May	109	0,188	0	0,188	0	0,013	0,013	127,8	579558	187,28
13	1,08	June	111	0,196	0	0,196	0	0,014	0,014	127,9	629342	187,36
14	1,17	July	113	0,202	0	0,202	0	0,014	0,014	127,9	679126	187,43
15	1,25	August	115	0,207	0	0,207	0	0,014	0,014	128	728910	187,5
16	1,33	September	119	0,212	0	0,212	0	0,015	0,015	128	778694	187,58
17	1,42	October	122	0,221	0	0,221	0	0,016	0,016	128,1	828478	187,66
18	1,5	November	127	0,23	0	0,23	0	0,016	0,016	128,2	878262	187,75
19	1,58	December	129	0,238	0	0,238	0	0,017	0,017	128,3	928046	187,84
20	1,67	January	130	0,243	0	0,243	0	0,017	0,017	128,3	977830	187,91
21	1,75	February	131	0,249	0	0,249	0	0,017	0,017	128,4	1027610	187,99
22	1,83	March	133	0,256	0	0,256	0	0,018	0,018	128,4	1077400	188,07
23	1,92	April	134	0,261	0	0,261	0	0,018	0,018	128,5	1127180	188,15
24	2	May	135	0,266	0	0,266	0	0,018	0,018	128,6	1176970	188,23
25	2,08	June	136	0,27	0	0,27	0	0,019	0,019	128,6	1228280	188,31
26	2,17	July	136	0,273	0	0,273	0	0,019	0,019	128,7	1279600	188,39
27	2,25	August	137	0,275	0	0,275	0	0,019	0,019	128,7	1330920	188,47
28	2,33	September	138	0,278	0	0,278	0	0,019	0,019	128,8	1382240	188,55
29	2,42	October	139	0,281	0	0,281	0	0,019	0,019	128,9	1433550	188,64
30	2,5	November	140	0,286	0	0,286	0	0,02	0,02	128,9	1484870	188,72
31	2,58	December	141	0,291	0	0,291	0	0,02	0,02	129	1536190	188,82
32	2,67	January	143	0,297	0	0,297	0	0,02	0,02	129,1	1587510	188,91
33	2,75	February	145	0,304	0	0,304	0	0,021	0,021	129,2	1638820	189,01
34	2,83	March	147	0,311	0	0,311	0	0,021	0,021	129,2	1690140	189,11
35	2,92	April	149	0,316	0	0,316	0	0,022	0,022	129,3	1741460	189,21
36	3	May	150	0,322	0	0,322	0	0,022	0,022	129,4	1792770	189,3
37	3,08	June	151	0,326	0	0,326	0	0,022	0,022	129,5	1845670	189,4
38	3,17	July	152	0,331	0	0,331	0	0,022	0,022	129,5	1898570	189,49
39	3,25	August	153	0,334	0	0,334	0	0,023	0,023	129,6	1951470	189,59
40	3,33	September	155	0,337	0	0,337	0	0,023	0,023	129,7	2004370	189,69
41	3,42	October	158	0,343	0	0,343	0	0,023	0,023	129,8	2057260	189,79
42	3,5	November	160	0,349	0	0,349	0	0,024	0,024	129,8	2110160	189,91
43	3,58	December	161	0,354	0	0,354	0	0,024	0,024	129,9	2163060	190
44	3,67	January	161	0,358	0	0,358	0	0,024	0,024	130	2215960	190,11
45	3,75	February	162	0,362	0	0,362	0	0,024	0,024	130,1	2268860	190,21
46	3,83	March	163	0,366	0	0,366	0	0,025	0,025	130,2	2321750	190,31
47	3,92	April	163	0,371	0	0,371	0	0,025	0,025	130,2	2374650	190,42
48	4	May	164	0,374	0	0,374	0	0,025	0,025	130,3	2427550	190,52
49	4,08	June	165	0,377	0	0,377	0	0,025	0,025	130,4	2482080	190,62
50	4,17	July	165	0,379	0	0,379	0	0,025	0,025	130,5	2536600	190,72
51	4,25	August	165	0,381	0	0,381	0	0,026	0,026	130,6	2591130	190,82
52	4,33	September	166	0,383	0	0,383	0	0,026	0,026	130,6	2645660	190,93
53	4,42	October	166	0,386	0	0,386	0	0,026	0,026	130,7	2700190	191,03
54	4,5	November	167	0,389	0	0,389	0	0,026	0,026	130,8	2754710	191,14
55	4,58	December	168	0,393	0	0,393	0	0,026	0,026	130,9	2809240	191,25
56	4,67	January	169	0,397	0	0,397	0	0,027	0,027	131	2863770	191,37
57	4,75	February	170	0,403	0	0,403	0	0,027	0,027	131,1	2918300	191,49
58	4,83	March	172	0,408	0	0,408	0	0,027	0,027	131,2	2972820	191,61
59	4,92	April	173	0,412	0	0,412	0	0,028	0,028	131,3	3027350	191,72
60	5	May	174	0,417	0	0,417	0	0,028	0,028	131,3	3081880	191,84

61	5,08	June	174	0,421	0	0,421	0	0,028	0,028	131,4	3138080	191,95
62	5,17	July	175	0,424	0	0,424	0	0,028	0,028	131,5	3194290	192,07
63	5,25	August	175	0,426	0	0,426	0	0,028	0,028	131,6	3250500	192,18
64	5,33	September	177	0,429	0	0,429	0	0,029	0,029	131,7	3306700	192,3
65	5,42	October	179	0,434	0	0,434	0	0,029	0,029	131,8	3362910	192,43
66	5,5	November	181	0,438	0	0,438	0	0,029	0,029	131,9	3419120	192,56
67	5,58	December	181	0,443	0	0,443	0	0,029	0,029	132	3475320	192,68
68	5,67	January	182	0,446	0	0,446	0	0,03	0,03	132,1	3531530	192,79
69	5,75	February	182	0,45	0	0,45	0	0,03	0,03	132,2	3587740	192,91
70	5,83	March	183	0,453	0	0,453	0	0,03	0,03	132,3	3643940	193,04
71	5,92	April	183	0,457	0	0,457	0	0,03	0,03	132,4	3700150	193,16
72	6	May	184	0,459	0	0,459	0	0,03	0,03	132,5	3756360	193,28
73	6,08	June	184	0,462	0	0,462	0	0,031	0,031	132,6	3814290	193,4
74	6,17	July	184	0,464	0	0,464	0	0,031	0,031	132,6	3872230	193,52
75	6,25	August	184	0,465	0	0,465	0	0,031	0,031	132,7	3930170	193,64
76	6,33	September	185	0,467	0	0,467	0	0,031	0,031	132,8	3988110	193,77
77	6,42	October	185	0,469	0	0,469	0	0,031	0,031	132,9	4046050	193,89
78	6,5	November	186	0,472	0	0,472	0	0,031	0,031	133	4103980	194,02
79	6,58	December	186	0,476	0	0,476	0	0,031	0,031	133,1	4161920	194,15
80	6,67	January	187	0,479	0	0,479	0	0,032	0,032	133,2	4219860	194,28
81	6,75	February	188	0,484	0	0,484	0	0,032	0,032	133,3	4277800	194,42
82	6,83	March	189	0,489	0	0,489	0	0,032	0,032	133,4	4335730	194,55
83	6,92	April	190	0,492	0	0,492	0	0,032	0,032	133,5	4393670	194,69
84	7	May	191	0,496	0	0,496	0	0,033	0,033	133,6	4451610	194,82
85	7,08	June	192	0,499	0	0,499	0	0,033	0,033	133,8	4511330	194,95
86	7,17	July	192	0,502	0	0,502	0	0,033	0,033	133,9	4571050	195,08
87	7,25	August	192	0,505	0	0,505	0	0,033	0,033	134	4630780	195,22
88	7,33	September	193	0,507	0	0,507	0	0,033	0,033	134,1	4690500	195,35
89	7,42	October	195	0,511	0	0,511	0	0,034	0,034	134,2	4750220	195,49
90	7,5	November	197	0,515	0	0,515	0	0,034	0,034	134,3	4809940	195,63
91	7,58	December	197	0,519	0	0,519	0	0,034	0,034	134,4	4869670	195,77
92	7,67	January	198	0,522	0	0,522	0	0,034	0,034	134,5	4929390	195,91
93	7,75	February	198	0,525	0	0,525	0	0,034	0,034	134,6	4989110	196,04
94	7,83	March	198	0,528	0	0,528	0	0,035	0,035	134,7	5048830	196,18
95	7,92	April	199	0,531	0	0,531	0	0,035	0,035	134,8	5108560	196,32
96	8	May	199	0,534	0	0,534	0	0,035	0,035	134,9	5168280	196,46
97	8,08	June	199	0,536	0	0,536	0	0,035	0,035	135	5229840	196,6
98	8,17	July	200	0,538	0	0,538	0	0,035	0,035	135,1	5291400	196,73
99	8,25	August	200	0,539	0	0,539	0	0,035	0,035	135,2	5352960	196,87
100	8,33	September	200	0,54	0	0,54	0	0,035	0,035	135,3	5414520	197,01
101	8,42	October	200	0,543	0	0,543	0	0,035	0,035	135,5	5476090	197,15
102	8,5	November	201	0,545	0	0,545	0	0,036	0,036	135,6	5537650	197,29
103	8,58	December	201	0,548	0	0,548	0	0,036	0,036	135,7	5599210	197,44
104	8,67	January	202	0,552	0	0,552	0	0,036	0,036	135,8	5660770	197,58
105	8,75	February	203	0,556	0	0,556	0	0,036	0,036	135,9	5722330	197,73
106	8,83	March	204	0,56	0	0,56	0	0,036	0,036	136	5783900	197,88
107	8,92	April	205	0,563	0	0,563	0	0,037	0,037	136,1	5845460	198,03
108	9	May	206	0,566	0	0,566	0	0,037	0,037	136,3	5907020	198,18
109	9,08	June	206	0,57	0	0,57	0	0,037	0,037	136,4	5970480	198,33
110	9,17	July	206	0,572	0	0,572	0	0,037	0,037	136,5	6033930	198,47
111	9,25	August	207	0,574	0	0,574	0	0,037	0,037	136,6	6097390	198,62
112	9,33	September	208	0,576	0	0,576	0	0,037	0,037	136,7	6160850	198,77
113	9,42	October	209	0,58	0	0,58	0	0,038	0,038	136,8	6224310	198,93
114	9,5	November	210	0,584	0	0,584	0	0,038	0,038	137	6287770	199,08
115	9,58	December	211	0,587	0	0,587	0	0,038	0,038	137,1	6351220	199,24
116	9,67	January	211	0,59	0	0,59	0	0,038	0,038	137,2	6414680	199,38
117	9,75	February	212	0,593	0	0,593	0	0,038	0,038	137,3	6478140	199,53
118	9,83	March	212	0,596	0	0,596	0	0,039	0,039	137,4	6541600	199,69
119	9,92	April	212	0,599	0	0,599	0	0,039	0,039	137,6	6605050	199,84
120	10	May	213	0,601	0	0,601	0	0,039	0,039	137,7	6668510	199,99
121	10,08	June	213	0,603	0	0,603	0	0,039	0,039	137,8	6733930	200,15
122	10,17	July	213	0,604	0	0,604	0	0,039	0,039	137,9	6799340	200,3
123	10,25	August	213	0,606	0	0,606	0	0,039	0,039	138	6864750	200,44
124	10,33	September	213	0,607	0	0,607	0	0,039	0,039	138,2	6930160	200,6
125	10,42	October	214	0,609	0	0,609	0	0,039	0,039	138,3	6995570	200,76
126	10,5	November	214	0,611	0	0,611	0	0,04	0,04	138,4	7060990	200,91
127	10,58	December	215	0,614	0	0,614	0	0,04	0,04	138,5	7126400	201,07
128	10,67	January	215	0,617	0	0,617	0	0,04	0,04	138,6	7191810	201,23
129	10,75	February	216	0,621	0	0,621	0	0,04	0,04	138,8	7257220	201,39
130	10,83	March	217	0,625	0	0,625	0	0,04	0,04	138,9	7322640	201,56
131	10,92	April	218	0,628	0	0,628	0	0,041	0,041	139	7388050	201,72
132	11	May	218	0,631	0	0,631	0	0,041	0,041	139,1	7453460	201,88

133	11,08	June	219	0,634	0	0,634	0	0,041	0,041	139,3	7520890	202,04
134	11,17	July	219	0,636	0	0,636	0	0,041	0,041	139,4	7588320	202,2
135	11,25	August	219	0,638	0	0,638	0	0,041	0,041	139,5	7655740	202,36
136	11,33	September	220	0,64	0	0,64	0	0,041	0,041	139,7	7723170	202,53
137	11,42	October	222	0,644	0	0,644	0	0,042	0,042	139,8	7790600	202,7
138	11,5	November	223	0,647	0	0,647	0	0,042	0,042	139,9	7858020	202,86
139	11,58	December	223	0,651	0	0,651	0	0,042	0,042	140	7925450	203,03
140	11,67	January	223	0,653	0	0,653	0	0,042	0,042	140,2	7992880	203,19
141	11,75	February	224	0,656	0	0,656	0	0,042	0,042	140,3	8063030	203,36
142	11,83	March	224	0,658	0	0,658	0	0,042	0,042	140,4	8127730	203,52
143	11,92	April	224	0,661	0	0,661	0	0,043	0,043	140,6	8195160	203,69
144	12	May	225	0,663	0	0,663	0	0,043	0,043	140,7	8262590	203,85
145	12,08	June	225	0,665	0	0,665	0	0,043	0,043	140,8	8332090	204,02
146	12,17	July	225	0,667	0	0,667	0	0,043	0,043	140,9	8401590	204,18
147	12,25	August	225	0,668	0	0,668	0	0,043	0,043	141,1	8471100	204,35
148	12,33	September	225	0,669	0	0,669	0	0,043	0,043	141,2	8540600	204,51
149	12,42	October	226	0,671	0	0,671	0	0,043	0,043	141,3	8610100	204,68
150	12,5	November	226	0,673	0	0,673	0	0,043	0,043	141,5	8679610	204,85
151	12,58	December	227	0,676	0	0,676	0	0,043	0,043	141,6	8749110	205,02
152	12,67	January	227	0,679	0	0,679	0	0,044	0,044	141,7	8818620	205,19
153	12,75	February	228	0,682	0	0,682	0	0,044	0,044	141,9	8888120	205,37
154	12,83	March	229	0,686	0	0,686	0	0,044	0,044	142	8957620	205,54
155	12,92	April	229	0,689	0	0,689	0	0,044	0,044	142,2	9027130	205,71
156	13	May	230	0,692	0	0,692	0	0,044	0,044	142,3	9096630	205,89
157	13,08	June	230	0,695	0	0,695	0	0,045	0,045	142,4	9168280	206,07
158	13,17	July	231	0,697	0	0,697	0	0,045	0,045	142,6	9239920	206,24
159	13,25	August	231	0,699	0	0,699	0	0,045	0,045	142,7	9311560	206,41
160	13,33	September	232	0,701	0	0,701	0	0,045	0,045	142,8	9383210	206,59
161	13,42	October	233	0,704	0	0,704	0	0,045	0,045	143	9454850	206,76
162	13,5	November	234	0,707	0	0,707	0	0,045	0,045	143,1	9526500	206,94
163	13,58	December	235	0,71	0	0,71	0	0,046	0,046	143,3	9598140	207,12
164	13,67	January	235	0,712	0	0,712	0	0,046	0,046	143,4	9669790	207,29
165	13,75	February	235	0,715	0	0,715	0	0,046	0,046	143,5	9741430	207,47
166	13,83	March	235	0,718	0	0,718	0	0,046	0,046	143,7	9813080	207,65
167	13,92	April	236	0,72	0	0,72	0	0,046	0,046	143,8	9884720	207,82
168	14	May	236	0,722	0	0,722	0	0,046	0,046	144	9956370	208,01
169	14,08	June	236	0,724	0	0,724	0	0,046	0,046	144,1	10030200	208,18
170	14,17	July	236	0,726	0	0,726	0	0,046	0,046	144,2	10104100	208,35
171	14,25	August	236	0,727	0	0,727	0	0,047	0,047	144,4	10177900	208,53
172	14,33	September	237	0,728	0	0,728	0	0,047	0,047	144,5	10251800	208,71
173	14,42	October	237	0,73	0	0,73	0	0,047	0,047	144,7	10325600	208,89
174	14,5	November	237	0,732	0	0,732	0	0,047	0,047	144,8	10399500	209,07
175	14,58	December	238	0,734	0	0,734	0	0,047	0,047	144,9	10473300	209,25
176	14,67	January	238	0,737	0	0,737	0	0,047	0,047	145,1	10547200	209,44
177	14,75	February	239	0,741	0	0,741	0	0,047	0,047	145,2	10621000	209,62
178	14,83	March	240	0,744	0	0,744	0	0,048	0,048	145,4	10694900	209,81
179	14,92	April	240	0,747	0	0,747	0	0,048	0,048	145,5	10768700	209,99
180	15	May	241	0,75	0	0,75	0	0,048	0,048	145,7	10842600	210,18
181	15,08	June	241	0,752	0	0,752	0	0,048	0,048	145,8	10918700	210,36
182	15,17	July	241	0,754	0	0,754	0	0,048	0,048	146	10994800	210,55
183	15,25	August	242	0,756	0	0,756	0	0,048	0,048	146,1	11071000	210,73
184	15,33	September	243	0,758	0	0,758	0	0,048	0,048	146,3	11147100	210,92
185	15,42	October	244	0,761	0	0,761	0	0,049	0,049	146,4	11223200	211,11
186	15,5	November	245	0,764	0	0,764	0	0,049	0,049	146,6	11299300	211,3
187	15,58	December	245	0,767	0	0,767	0	0,049	0,049	146,7	11375500	211,49
188	15,67	January	245	0,769	0	0,769	0	0,049	0,049	146,8	11451600	211,67
189	15,75	February	246	0,772	0	0,772	0	0,049	0,049	147	11527700	211,86
190	15,83	March	246	0,775	0	0,775	0	0,049	0,049	147,1	11603800	212,05
191	15,92	April	246	0,777	0	0,777	0	0,05	0,05	147,3	11680000	212,23
192	16	May	247	0,779	0	0,779	0	0,05	0,05	147,4	11756100	212,42
193	16,08	June	247	0,781	0	0,781	0	0,05	0,05	147,6	11834600	212,61
194	16,17	July	247	0,782	0	0,782	0	0,05	0,05	147,7	11913000	212,8
195	16,25	August	247	0,783	0	0,783	0	0,05	0,05	147,9	11991500	212,99
196	16,33	September	247	0,784	0	0,784	0	0,05	0,05	148	12070000	213,17
197	16,42	October	247	0,786	0	0,786	0	0,05	0,05	148,2	12148400	213,36
198	16,5	November	248	0,788	0	0,788	0	0,05	0,05	148,3	12226900	213,55
199	16,58	December	248	0,791	0	0,791	0	0,05	0,05	148,5	12305400	213,74
200	16,67	January	249	0,793	0	0,793	0	0,051	0,051	148,6	12383900	213,94
201	16,75	February	249	0,797	0	0,797	0	0,051	0,051	148,8	12462300	214,13
202	16,83	March	250	0,8	0	0,8	0	0,051	0,051	148,9	12540800	214,33
203	16,92	April	251	0,803	0	0,803	0	0,051	0,051	149,1	12619300	214,53
204	17	May	251	0,805	0	0,805	0	0,051	0,051	149,3	12697700	214,72
205	17,08	June	252	0,808	0	0,808	0	0,051	0,051	149,4	12778600	214,92

206	17,17	July	252	0,81	0	0,81	0	0,052	0,052	149,6	12859500	215,11
207	17,25	August	252	0,812	0	0,812	0	0,052	0,052	149,7	12940400	215,31
208	17,33	September	253	0,813	0	0,813	0	0,052	0,052	149,9	13021300	215,5
209	17,42	October	254	0,816	0	0,816	0	0,052	0,052	150	13102200	215,7
210	17,5	November	255	0,82	0	0,82	0	0,052	0,052	150,2	13183100	215,91
211	17,58	December	255	0,822	0	0,822	0	0,052	0,052	150,4	13263900	216,1
212	17,67	January	256	0,825	0	0,825	0	0,053	0,053	150,5	13344800	216,3
213	17,75	February	256	0,827	0	0,827	0	0,053	0,053	150,7	13425700	216,49
214	17,83	March	256	0,83	0	0,83	0	0,053	0,053	150,8	13506600	216,7
215	17,92	April	256	0,832	0	0,832	0	0,053	0,053	151	13587500	216,89
216	18	May	257	0,834	0	0,834	0	0,053	0,053	151,1	13668400	217,09
217	18,08	June	257	0,836	0	0,836	0	0,053	0,053	151,3	13751800	217,29
218	18,17	July	257	0,837	0	0,837	0	0,053	0,053	151,5	13835100	217,49
219	18,25	August	257	0,838	0	0,838	0	0,053	0,053	151,6	13918500	217,68
220	18,33	September	257	0,839	0	0,839	0	0,053	0,053	151,8	14001900	217,88
221	18,42	October	258	0,841	0	0,841	0	0,054	0,054	151,9	14085300	218,08
222	18,5	November	258	0,843	0	0,843	0	0,054	0,054	152,1	14168700	218,28
223	18,58	December	258	0,845	0	0,845	0	0,054	0,054	152,2	14252000	218,48
224	18,67	January	259	0,848	0	0,848	0	0,054	0,054	152,4	14335400	218,69
225	18,75	February	259	0,851	0	0,851	0	0,054	0,054	152,6	14418800	218,89
226	18,83	March	260	0,854	0	0,854	0	0,054	0,054	152,7	14502200	219,1
227	18,92	April	261	0,857	0	0,857	0	0,055	0,055	152,9	14585500	219,31
228	19	May	261	0,86	0	0,86	0	0,055	0,055	153,1	14668900	219,51
229	19,08	June	262	0,862	0	0,862	0	0,055	0,055	153,2	14754900	219,72
230	19,17	July	262	0,864	0	0,864	0	0,055	0,055	153,4	14840800	219,92
231	19,25	August	262	0,866	0	0,866	0	0,055	0,055	153,6	14926800	220,12
232	19,33	September	263	0,867	0	0,867	0	0,055	0,055	153,7	15012700	220,32
233	19,42	October	264	0,87	0	0,87	0	0,055	0,055	153,9	15098700	220,53
234	19,5	November	265	0,873	0	0,873	0	0,056	0,056	154	15184600	220,75
235	19,58	December	265	0,876	0	0,876	0	0,056	0,056	154,2	15270600	220,95
236	19,67	January	266	0,878	0	0,878	0	0,056	0,056	154,4	15356500	221,16
237	19,75	February	266	0,881	0	0,881	0	0,056	0,056	154,5	15442400	221,37
238	19,83	March	266	0,883	0	0,883	0	0,056	0,056	154,7	15528400	221,57
239	19,92	April	266	0,886	0	0,886	0	0,056	0,056	154,9	15614300	221,78
240	20	May	267	0,887	0	0,887	0	0,056	0,056	155	15700300	221,99

Predicción de Deterioros Subtramo TCI2 Calzada Izquierda

Predicted distress: Project: Subtramo TCI2 Calzada Izquierda

Pavement age		Month	Longitudinal Cracking (ft/mi)	Alligator Cracking in New AC Layer FCI(%)	Reflective Cracking Existing Layers FC2(%)	Total Cracking Surface FCI + FC2 (%)	Transverse Cracking (ft/mi)	Subtotal AC Rutting (in)	Total Rutting (in)	IRI (in/mi)	Heavy Trucks (cumulative)	IRI at Reliability (in/mi)
month	year											
1	0,08	June	36,9	0,0114	0	0,0114	0	0,004	0,004	127,2	50821	186,43
2	0,17	July	48,2	0,014	0	0,014	0	0,005	0,005	127,2	101642	186,51
3	0,25	August	54,8	0,0155	0	0,0155	0	0,006	0,006	127,3	152462	186,57
4	0,33	September	61,5	0,0175	0	0,0175	0	0,007	0,007	127,3	203283	186,64
5	0,42	October	69,4	0,02	0	0,02	0	0,007	0,007	127,4	254104	186,72
6	0,5	November	78,1	0,0229	0	0,0229	0	0,008	0,008	127,4	304925	186,8
7	0,58	December	85,7	0,026	0	0,026	0	0,009	0,009	127,5	355745	186,88
8	0,67	January	94,3	0,0294	0	0,0294	0	0,01	0,01	127,6	406566	186,98
9	0,75	February	102	0,0331	0	0,0331	0	0,011	0,011	127,7	457387	187,07
10	0,83	March	110	0,0368	0	0,0368	0	0,012	0,012	127,7	508208	187,16
11	0,92	April	116	0,0391	0	0,0391	0	0,013	0,013	127,8	559028	187,24
12	1	May	120	0,0414	0	0,0414	0	0,014	0,014	127,8	609849	187,32
13	1,08	June	124	0,0434	0	0,0434	0	0,014	0,014	127,9	662235	187,39
14	1,17	July	126	0,0449	0	0,0449	0	0,015	0,015	128	714621	187,46
15	1,25	August	129	0,0461	0	0,0461	0	0,015	0,015	128	767007	187,54
16	1,33	September	133	0,0472	0	0,0472	0	0,016	0,016	128,1	819393	187,61
17	1,42	October	137	0,0495	0	0,0495	0	0,016	0,016	128,1	871779	187,7
18	1,5	November	143	0,0519	0	0,0519	0	0,017	0,017	128,2	924165	187,79
19	1,58	December	146	0,0539	0	0,0539	0	0,018	0,018	128,3	976551	187,88
20	1,67	January	148	0,0551	0	0,0551	0	0,018	0,018	128,3	1028940	187,95
21	1,75	February	149	0,0566	0	0,0566	0	0,018	0,018	128,4	1081320	188,03
22	1,83	March	152	0,0581	0	0,0581	0	0,019	0,019	128,5	1133710	188,11
23	1,92	April	153	0,0596	0	0,0596	0	0,019	0,019	128,5	1186100	188,19
24	2	May	155	0,0607	0	0,0607	0	0,019	0,019	128,6	1238480	188,28
25	2,08	June	157	0,0616	0	0,0616	0	0,02	0,02	128,6	1292480	188,35
26	2,17	July	157	0,0623	0	0,0623	0	0,02	0,02	128,7	1346480	188,43
27	2,25	August	158	0,0628	0	0,0628	0	0,02	0,02	128,8	1400480	188,51
28	2,33	September	159	0,0635	0	0,0635	0	0,02	0,02	128,8	1454480	188,59
29	2,42	October	161	0,0643	0	0,0643	0	0,021	0,021	128,9	1508480	188,68
30	2,5	November	162	0,0654	0	0,0654	0	0,021	0,021	129	1562480	188,76
31	2,58	December	164	0,0667	0	0,0667	0	0,021	0,021	129	1616480	188,85
32	2,67	January	167	0,0683	0	0,0683	0	0,022	0,022	129,1	1670480	188,95
33	2,75	February	170	0,0701	0	0,0701	0	0,022	0,022	129,2	1724480	189,05
34	2,83	March	173	0,072	0	0,072	0	0,023	0,023	129,3	1778480	189,15
35	2,92	April	175	0,0735	0	0,0735	0	0,023	0,023	129,3	1832480	189,25
36	3	May	177	0,075	0	0,075	0	0,023	0,023	129,4	1886480	189,34
37	3,08	June	178	0,0763	0	0,0763	0	0,024	0,024	129,5	1942140	189,44
38	3,17	July	179	0,0774	0	0,0774	0	0,024	0,024	129,6	1997800	189,54
39	3,25	August	180	0,0782	0	0,0782	0	0,024	0,024	129,6	2053460	189,63
40	3,33	September	182	0,0791	0	0,0791	0	0,024	0,024	129,7	2109130	189,73
41	3,42	October	186	0,0807	0	0,0807	0	0,025	0,025	129,8	2164790	189,84
42	3,5	November	189	0,0823	0	0,0823	0	0,025	0,025	129,9	2220450	189,94
43	3,58	December	190	0,0838	0	0,0838	0	0,026	0,026	130	2276110	190,04
44	3,67	January	191	0,0848	0	0,0848	0	0,026	0,026	130	2331780	190,14
45	3,75	February	192	0,0859	0	0,0859	0	0,026	0,026	130,1	2387440	190,25
46	3,83	March	193	0,087	0	0,087	0	0,026	0,026	130,2	2443100	190,35
47	3,92	April	195	0,0882	0	0,0882	0	0,027	0,027	130,3	2498770	190,45
48	4	May	196	0,089	0	0,089	0	0,027	0,027	130,3	2554430	190,55
49	4,08	June	196	0,0898	0	0,0898	0	0,027	0,027	130,4	2611810	190,66
50	4,17	July	197	0,0903	0	0,0903	0	0,027	0,027	130,5	2669180	190,76
51	4,25	August	197	0,0907	0	0,0907	0	0,027	0,027	130,6	2726560	190,85
52	4,33	September	198	0,0912	0	0,0912	0	0,027	0,027	130,7	2783940	190,96
53	4,42	October	199	0,0919	0	0,0919	0	0,028	0,028	130,7	2841310	191,07
54	4,5	November	200	0,0928	0	0,0928	0	0,028	0,028	130,8	2898690	191,17
55	4,58	December	201	0,0939	0	0,0939	0	0,028	0,028	130,9	2956070	191,28
56	4,67	January	203	0,0951	0	0,0951	0	0,028	0,028	131	3013450	191,4
57	4,75	February	205	0,0965	0	0,0965	0	0,029	0,029	131,1	3070820	191,51
58	4,83	March	207	0,0981	0	0,0981	0	0,029	0,029	131,2	3128200	191,64
59	4,92	April	208	0,0993	0	0,0993	0	0,029	0,029	131,3	3185580	191,75
60	5	May	210	0,101	0	0,101	0	0,03	0,03	131,4	3242950	191,87

61	5,08	June	211	0,102	0	0,102	0	0,03	0,03	131,4	3302100	191,98
62	5,17	July	211	0,102	0	0,102	0	0,03	0,03	131,5	3361240	192,09
63	5,25	August	212	0,103	0	0,103	0	0,03	0,03	131,6	3420390	192,21
64	5,33	September	214	0,104	0	0,104	0	0,03	0,03	131,7	3479530	192,32
65	5,42	October	216	0,105	0	0,105	0	0,031	0,031	131,8	3538680	192,45
66	5,5	November	218	0,107	0	0,107	0	0,031	0,031	131,9	3597820	192,58
67	5,58	December	220	0,108	0	0,108	0	0,031	0,031	132	3656960	192,69
68	5,67	January	220	0,109	0	0,109	0	0,032	0,032	132,1	3716110	192,81
69	5,75	February	221	0,11	0	0,11	0	0,032	0,032	132,2	3775250	192,93
70	5,83	March	222	0,111	0	0,111	0	0,032	0,032	132,3	3834400	193,06
71	5,92	April	223	0,112	0	0,112	0	0,032	0,032	132,4	3893540	193,18
72	6	May	224	0,112	0	0,112	0	0,032	0,032	132,5	3952690	193,3
73	6,08	June	224	0,113	0	0,113	0	0,033	0,033	132,6	4011830	193,42
74	6,17	July	224	0,113	0	0,113	0	0,033	0,033	132,7	4071000	193,53
75	6,25	August	225	0,114	0	0,114	0	0,033	0,033	132,7	4130150	193,65
76	6,33	September	225	0,114	0	0,114	0	0,033	0,033	132,8	4189300	193,77
77	6,42	October	226	0,115	0	0,115	0	0,033	0,033	132,9	4248450	193,9
78	6,5	November	227	0,116	0	0,116	0	0,033	0,033	133	4307600	194,03
79	6,58	December	228	0,117	0	0,117	0	0,033	0,033	133,1	4366750	194,15
80	6,67	January	229	0,118	0	0,118	0	0,034	0,034	133,2	4425900	194,29
81	6,75	February	231	0,119	0	0,119	0	0,034	0,034	133,3	4485050	194,42
82	6,83	March	232	0,12	0	0,12	0	0,034	0,034	133,4	4544200	194,55
83	6,92	April	234	0,121	0	0,121	0	0,035	0,035	133,5	4603350	194,68
84	7	May	235	0,122	0	0,122	0	0,035	0,035	133,7	4662500	194,82
85	7,08	June	235	0,123	0	0,123	0	0,035	0,035	133,8	4721650	194,95
86	7,17	July	236	0,124	0	0,124	0	0,035	0,035	133,9	4780800	195,08
87	7,25	August	237	0,125	0	0,125	0	0,035	0,035	134	4840000	195,21
88	7,33	September	238	0,125	0	0,125	0	0,035	0,035	134,1	4899200	195,35
89	7,42	October	240	0,126	0	0,126	0	0,036	0,036	134,2	4958400	195,49
90	7,5	November	242	0,128	0	0,128	0	0,036	0,036	134,3	5017600	195,63
91	7,58	December	243	0,129	0	0,129	0	0,036	0,036	134,4	5076800	195,76
92	7,67	January	243	0,129	0	0,129	0	0,036	0,036	134,5	5136000	195,9
93	7,75	February	244	0,13	0	0,13	0	0,037	0,037	134,6	5195200	196,03
94	7,83	March	245	0,131	0	0,131	0	0,037	0,037	134,7	5254400	196,17
95	7,92	April	246	0,132	0	0,132	0	0,037	0,037	134,8	5313600	196,31
96	8	May	246	0,133	0	0,133	0	0,037	0,037	134,9	5372800	196,44
97	8,08	June	247	0,133	0	0,133	0	0,037	0,037	135	5432000	196,58
98	8,17	July	247	0,134	0	0,134	0	0,037	0,037	135,1	5491200	196,71
99	8,25	August	247	0,134	0	0,134	0	0,037	0,037	135,2	5550400	196,85
100	8,33	September	248	0,135	0	0,135	0	0,038	0,038	135,3	5609600	196,99
101	8,42	October	248	0,135	0	0,135	0	0,038	0,038	135,4	5668800	197,12
102	8,5	November	249	0,136	0	0,136	0	0,038	0,038	135,6	5728000	197,27
103	8,58	December	250	0,137	0	0,137	0	0,038	0,038	135,7	5787200	197,41
104	8,67	January	251	0,138	0	0,138	0	0,038	0,038	135,8	5846400	197,55
105	8,75	February	252	0,139	0	0,139	0	0,039	0,039	135,9	5905600	197,7
106	8,83	March	254	0,14	0	0,14	0	0,039	0,039	136	5964800	197,85
107	8,92	April	255	0,141	0	0,141	0	0,039	0,039	136,1	6024000	198
108	9	May	256	0,142	0	0,142	0	0,039	0,039	136,2	6083200	198,15
109	9,08	June	256	0,143	0	0,143	0	0,039	0,039	136,3	6142400	198,29
110	9,17	July	257	0,143	0	0,143	0	0,04	0,04	136,5	6201600	198,44
111	9,25	August	258	0,144	0	0,144	0	0,04	0,04	136,6	6260800	198,58
112	9,33	September	259	0,144	0	0,144	0	0,04	0,04	136,7	6320000	198,73
113	9,42	October	261	0,146	0	0,146	0	0,04	0,04	136,8	6379200	198,88
114	9,5	November	262	0,147	0	0,147	0	0,041	0,041	136,9	6438400	199,04
115	9,58	December	263	0,148	0	0,148	0	0,041	0,041	137,1	6497600	199,19
116	9,67	January	264	0,148	0	0,148	0	0,041	0,041	137,2	6556800	199,34
117	9,75	February	264	0,149	0	0,149	0	0,041	0,041	137,3	6616000	199,49
118	9,83	March	265	0,15	0	0,15	0	0,041	0,041	137,4	6675200	199,64
119	9,92	April	265	0,151	0	0,151	0	0,041	0,041	137,5	6734400	199,79
120	10	May	266	0,151	0	0,151	0	0,041	0,041	137,6	6793600	199,94
121	10,08	June	266	0,152	0	0,152	0	0,042	0,042	137,8	6852800	200,09
122	10,17	July	267	0,152	0	0,152	0	0,042	0,042	137,9	6912000	200,24
123	10,25	August	267	0,153	0	0,153	0	0,042	0,042	138	6971200	200,39
124	10,33	September	267	0,153	0	0,153	0	0,042	0,042	138,1	7030400	200,54
125	10,42	October	268	0,154	0	0,154	0	0,042	0,042	138,2	7089600	200,69
126	10,5	November	268	0,154	0	0,154	0	0,042	0,042	138,3	7148800	200,84
127	10,58	December	269	0,155	0	0,155	0	0,042	0,042	138,5	7208000	201
128	10,67	January	270	0,156	0	0,156	0	0,043	0,043	138,6	7267200	201,16
129	10,75	February	271	0,157	0	0,157	0	0,043	0,043	138,7	7326400	201,32
130	10,83	March	273	0,158	0	0,158	0	0,043	0,043	138,8	7385600	201,48
131	10,92	April	274	0,159	0	0,159	0	0,043	0,043	139	7444800	201,64
132	11	May	275	0,16	0	0,16	0	0,043	0,043	139,1	7504000	201,8

133	11,08	June	275	0,161	0	0,161	0	0,044	0,044	139,2	7913970	201,96
134	11,17	July	276	0,161	0	0,161	0	0,044	0,044	139,3	7984930	202,12
135	11,25	August	276	0,162	0	0,162	0	0,044	0,044	139,5	8055880	202,28
136	11,33	September	277	0,162	0	0,162	0	0,044	0,044	139,6	8126830	202,44
137	11,42	October	279	0,163	0	0,163	0	0,044	0,044	139,7	8197780	202,61
138	11,5	November	281	0,164	0	0,164	0	0,045	0,045	139,9	8268730	202,78
139	11,58	December	281	0,165	0	0,165	0	0,045	0,045	140	8339680	202,94
140	11,67	January	282	0,166	0	0,166	0	0,045	0,045	140,1	8410630	203,1
141	11,75	February	282	0,167	0	0,167	0	0,045	0,045	140,2	8481580	203,26
142	11,83	March	283	0,167	0	0,167	0	0,045	0,045	140,4	8552530	203,43
143	11,92	April	284	0,168	0	0,168	0	0,045	0,045	140,5	8623490	203,59
144	12	May	284	0,169	0	0,169	0	0,046	0,046	140,6	8694440	203,75
145	12,08	June	284	0,169	0	0,169	0	0,046	0,046	140,7	8765750	203,92
146	12,17	July	285	0,17	0	0,17	0	0,046	0,046	140,9	8840710	204,08
147	12,25	August	285	0,17	0	0,17	0	0,046	0,046	141	8913850	204,24
148	12,33	September	285	0,17	0	0,17	0	0,046	0,046	141,1	8986980	204,41
149	12,42	October	286	0,171	0	0,171	0	0,046	0,046	141,3	9060120	204,57
150	12,5	November	286	0,171	0	0,171	0	0,046	0,046	141,4	9133260	204,73
151	12,58	December	287	0,172	0	0,172	0	0,046	0,046	141,5	9206390	204,9
152	12,67	January	288	0,173	0	0,173	0	0,047	0,047	141,7	9279530	205,07
153	12,75	February	289	0,174	0	0,174	0	0,047	0,047	141,8	9352670	205,25
154	12,83	March	290	0,175	0	0,175	0	0,047	0,047	141,9	9425800	205,42
155	12,92	April	291	0,176	0	0,176	0	0,047	0,047	142,1	9498940	205,6
156	13	May	292	0,177	0	0,177	0	0,047	0,047	142,2	9572070	205,77
157	13,08	June	293	0,177	0	0,177	0	0,048	0,048	142,3	9647460	205,94
158	13,17	July	293	0,178	0	0,178	0	0,048	0,048	142,5	9722850	206,1
159	13,25	August	294	0,179	0	0,179	0	0,048	0,048	142,6	9798240	206,28
160	13,33	September	295	0,179	0	0,179	0	0,048	0,048	142,7	9873630	206,45
161	13,42	October	296	0,18	0	0,18	0	0,048	0,048	142,9	9949020	206,63
162	13,5	November	298	0,181	0	0,181	0	0,048	0,048	143	10024400	206,81
163	13,58	December	298	0,182	0	0,182	0	0,049	0,049	143,2	10099800	206,98
164	13,67	January	299	0,182	0	0,182	0	0,049	0,049	143,3	10175200	207,16
165	13,75	February	299	0,183	0	0,183	0	0,049	0,049	143,4	10250600	207,33
166	13,83	March	300	0,184	0	0,184	0	0,049	0,049	143,6	10326000	207,51
167	13,92	April	300	0,185	0	0,185	0	0,049	0,049	143,7	10401400	207,68
168	14	May	301	0,185	0	0,185	0	0,049	0,049	143,8	10476700	207,85
169	14,08	June	301	0,186	0	0,186	0	0,049	0,049	144	10554500	208,03
170	14,17	July	301	0,186	0	0,186	0	0,05	0,05	144,1	10632200	208,2
171	14,25	August	302	0,186	0	0,186	0	0,05	0,05	144,2	10709900	208,38
172	14,33	September	302	0,187	0	0,187	0	0,05	0,05	144,4	10787600	208,55
173	14,42	October	302	0,187	0	0,187	0	0,05	0,05	144,5	10865300	208,73
174	14,5	November	303	0,188	0	0,188	0	0,05	0,05	144,7	10943000	208,9
175	14,58	December	304	0,188	0	0,188	0	0,05	0,05	144,8	11020700	209,09
176	14,67	January	305	0,189	0	0,189	0	0,05	0,05	144,9	11098400	209,27
177	14,75	February	306	0,19	0	0,19	0	0,051	0,051	145,1	11176100	209,45
178	14,83	March	307	0,191	0	0,191	0	0,051	0,051	145,2	11253900	209,64
179	14,92	April	308	0,192	0	0,192	0	0,051	0,051	145,4	11331600	209,82
180	15	May	308	0,193	0	0,193	0	0,051	0,051	145,5	11409300	210
181	15,08	June	309	0,193	0	0,193	0	0,051	0,051	145,7	11489400	210,19
182	15,17	July	309	0,194	0	0,194	0	0,051	0,051	145,8	11569500	210,37
183	15,25	August	310	0,195	0	0,195	0	0,052	0,052	146	11649600	210,54
184	15,33	September	311	0,195	0	0,195	0	0,052	0,052	146,1	11729700	210,73
185	15,42	October	312	0,196	0	0,196	0	0,052	0,052	146,3	11809800	210,92
186	15,5	November	314	0,197	0	0,197	0	0,052	0,052	146,4	11889900	211,11
187	15,58	December	315	0,198	0	0,198	0	0,052	0,052	146,6	11970000	211,3
188	15,67	January	315	0,198	0	0,198	0	0,052	0,052	146,7	12050100	211,48
189	15,75	February	315	0,199	0	0,199	0	0,053	0,053	146,8	12130200	211,66
190	15,83	March	316	0,2	0	0,2	0	0,053	0,053	147	12210300	211,85
191	15,92	April	316	0,2	0	0,2	0	0,053	0,053	147,1	12290400	212,03
192	16	May	317	0,201	0	0,201	0	0,053	0,053	147,3	12370500	212,22
193	16,08	June	317	0,201	0	0,201	0	0,053	0,053	147,4	12453100	212,41
194	16,17	July	317	0,202	0	0,202	0	0,053	0,053	147,6	12535700	212,59
195	16,25	August	318	0,202	0	0,202	0	0,053	0,053	147,7	12618200	212,77
196	16,33	September	318	0,202	0	0,202	0	0,053	0,053	147,9	12700800	212,96
197	16,42	October	318	0,203	0	0,203	0	0,053	0,053	148	12783400	213,15
198	16,5	November	319	0,203	0	0,203	0	0,054	0,054	148,2	12866000	213,33
199	16,58	December	319	0,204	0	0,204	0	0,054	0,054	148,3	12948500	213,52
200	16,67	January	320	0,205	0	0,205	0	0,054	0,054	148,5	13031100	213,72
201	16,75	February	321	0,206	0	0,206	0	0,054	0,054	148,6	13113700	213,91
202	16,83	March	322	0,207	0	0,207	0	0,054	0,054	148,8	13196200	214,1
203	16,92	April	323	0,207	0	0,207	0	0,055	0,055	148,9	13278800	214,3
204	17	May	324	0,208	0	0,208	0	0,055	0,055	149,1	13361400	214,49
205	17,08	June	325	0,209	0	0,209	0	0,055	0,055	149,2	13446500	214,68

206	17,17	July	325	0,21	0	0,21	0	0,055	0,055	149,4	13531600	214,88
207	17,25	August	326	0,21	0	0,21	0	0,055	0,055	149,5	13616700	215,07
208	17,33	September	326	0,211	0	0,211	0	0,055	0,055	149,7	13701900	215,26
209	17,42	October	328	0,211	0	0,211	0	0,056	0,056	149,8	13787000	215,46
210	17,5	November	329	0,212	0	0,212	0	0,056	0,056	150	13872100	215,66
211	17,58	December	330	0,213	0	0,213	0	0,056	0,056	150,2	13957200	215,85
212	17,67	January	330	0,214	0	0,214	0	0,056	0,056	150,3	14042300	216,05
213	17,75	February	331	0,214	0	0,214	0	0,056	0,056	150,5	14127400	216,24
214	17,83	March	331	0,215	0	0,215	0	0,056	0,056	150,6	14212500	216,44
215	17,92	April	332	0,216	0	0,216	0	0,057	0,057	150,8	14297700	216,63
216	18	May	332	0,216	0	0,216	0	0,057	0,057	150,9	14382800	216,83
217	18,08	June	333	0,217	0	0,217	0	0,057	0,057	151,1	14470500	217,03
218	18,17	July	333	0,217	0	0,217	0	0,057	0,057	151,2	14558200	217,22
219	18,25	August	333	0,217	0	0,217	0	0,057	0,057	151,4	14646000	217,41
220	18,33	September	333	0,218	0	0,218	0	0,057	0,057	151,6	14733700	217,61
221	18,42	October	334	0,218	0	0,218	0	0,057	0,057	151,7	14821500	217,8
222	18,5	November	334	0,219	0	0,219	0	0,057	0,057	151,9	14909200	218
223	18,58	December	335	0,219	0	0,219	0	0,057	0,057	152	14996900	218,2
224	18,67	January	336	0,22	0	0,22	0	0,058	0,058	152,2	15084700	218,4
225	18,75	February	337	0,221	0	0,221	0	0,058	0,058	152,3	15172400	218,61
226	18,83	March	338	0,222	0	0,222	0	0,058	0,058	152,5	15260100	218,81
227	18,92	April	339	0,223	0	0,223	0	0,058	0,058	152,7	15347900	219,01
228	19	May	339	0,223	0	0,223	0	0,058	0,058	152,8	15435600	219,22
229	19,08	June	340	0,224	0	0,224	0	0,059	0,059	153	15526100	219,42
230	19,17	July	340	0,225	0	0,225	0	0,059	0,059	153,2	15616500	219,62
231	19,25	August	341	0,225	0	0,225	0	0,059	0,059	153,3	15706900	219,82
232	19,33	September	342	0,226	0	0,226	0	0,059	0,059	153,5	15797400	220,02
233	19,42	October	343	0,226	0	0,226	0	0,059	0,059	153,6	15887800	220,23
234	19,5	November	344	0,227	0	0,227	0	0,059	0,059	153,8	15978200	220,44
235	19,58	December	345	0,228	0	0,228	0	0,06	0,06	154	16068700	220,65
236	19,67	January	345	0,229	0	0,229	0	0,06	0,06	154,1	16159100	220,85
237	19,75	February	346	0,229	0	0,229	0	0,06	0,06	154,3	16249600	221,05
238	19,83	March	346	0,23	0	0,23	0	0,06	0,06	154,5	16340000	221,26
239	19,92	April	347	0,231	0	0,231	0	0,06	0,06	154,6	16430400	221,46
240	20	May	347	0,231	0	0,231	0	0,06	0,06	154,8	16520900	221,66

ANEXO E

Calibración de Factores

HMA/AC Rutting (ahuellamientos)

Transfer Function Coefficient	Global Value (MOP 2008)	Global Value (MOP 2015)	Current Software*
k1r	-3.35412	-3.35412	-3.35412
k2r	0.4791	0.4791**	1.5606
k3r	1.5606	1.5606**	0.4791
B1r	1.0	1.0	1.0
B2r	1.0	1.0	1.0
B3r	1.0	1.0	1.0

*El software actual tiene la capacidad de tener diferentes valores para 3 capas diferentes

**MOP 2015 señala que estos valores han cambiado a lo que está en el software actual, pero no se cambian en el cuerpo del documento

$$\Delta_{p(HMA)} = \epsilon_{p(HMA)} h_{HMA} = \beta_{1r} k_z \epsilon_{r(HMA)} 10^{k_{1r}} n^{k_{2r} \beta_{2r}} T^{k_{3r} \beta_{3r}}$$

HMA/Unbound Layer Rutting (ahuellamientos capa no unida)

Transfer Function Coefficient	Global Value (MOP 2008)	Global Value (MOP 2015)	Current Software*
Coarse-Grained, k_{s1}	1.673	2.03	2.03
Coarse-Grained Bs1			1
Fine-Grained, k_{s1}	1.35	1.35	1.35
Fine-Grained Bs1			1

$$\Delta_{p(soil)} = \beta_{s1} k_{s1} \epsilon_v h_{soil} \left(\frac{\epsilon_o}{\epsilon_r} \right) e^{-\left(\frac{p}{n}\right)^b}$$

HMA/AC Bottom-Up Alligator/Fatigue Cracking (Tipo piel de cocodrilo)

Transfer Function Coefficient	Global Value (MOP 2008)	Global Value (MOP 2015)	Current Software*
kf1	0.007566	0.007566	0.007566
kf2	-3.9492	+3.9492	+3.9492
kf3	-1.281	+1.281	+1.281
bf1	1.0	1.0	1.0
bf2	1.0	1.0	1.0
bf3	1.0	1.0	1.0
C1bottom	1.00	1.00	1.00
C2bottom	1.00	1.00	1.00
C4bottom/C3	6000	6000	6000
C1top	7.00	7.00	7.00
C2top	3.5	3.5	3.5
C4top	1000	1000	1000
C3top			0

$$N_{f-HMA} = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\epsilon_t)^{k_{f2}\beta_{f2}}(E_{HMA})^{k_{f3}\beta_{f3}}$$

$$DI = \sum (\Delta DI)_{j,m,l,p,T} = \sum \left(\frac{n}{N_{f-HMA}} \right)_{j,m,l,p,T}$$

$$FC_{Bottom} = \left(\frac{1}{60} \right) \left(\frac{C_4}{1 + e^{(C_1 C_1' + C_2 C_2' \text{Log}(DI_{Bottom} * 100))}} \right)$$

$$FC_{Top} = 10.56 \left(\frac{C_4}{1 + e^{(C_1 - C_2 \text{Log}(DI_{Top}))}} \right)$$

HMA/AC Thermal Transverse Cracking

Transfer Function Coefficient	Global Value (MOP 2008)	Global Value (MOP 2015)	Current Software
Bt1	400	400	
kt	Level 1=5.0	Level 1=1.5	
	Level 2=1.5	Level 2=0.5	
	Level 3=3.0	Level 3=1.5	

$$TC = \beta_{t1} N \left[\frac{1}{\sigma_d} \text{Log} \left(\frac{C_d}{H_{HMA}} \right) \right]$$

HMA IRI

Calibration Factor	Global Value (MOP 2008)	Global Value (MOP 2015)	Current Software
C1 (Rut)	40.8	40.0	40.0
C2 (LCracking)	0.575	0.400	0.400
C3 (TCracking)	0.0014	0.008	0.008
C4 (SiteFactor)*	0.00825	0.015	0.015
Flex o/PCC C1		40.8	40.8
Flex o/PCC C2		0.575	0.575
Flex o/PCC C3		0.0014	0.0014
Flex o/PCC C4		0.00825	0.00825
SEE	18.9 in/mile	18.9 in/mile	
SEE (Flex o/PCC)	9.6 in/mile	9.6 in/mile	

*Observe que la ecuación de SF cambió de 2008 a 2015 MOP

$$IRI = IRI_o + C_1(RD) + C_2(FC_{Total}) + C_3(TC) + C_4(SF)$$