



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta de Rehabilitación
a partir de los resultados de
la medición de Deflexiones
con FWD**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Luis Alberto Hernández Galicia

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Araceli Angélica Sánchez Enríquez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

DEDICATORIA

A mis Padres

Ambos se merecen todo mi agradecimiento y mi corazón porque de ustedes también fue el esfuerzo.

A Gabriel, Abraham y Fer

Esperando que esto algún día los llene de orgullo y se motiven a superarse a sí mismos.

A Laura

Por el Apoyo incondicional y su paciencia para ser mi esposa.

AGRADECIMIENTOS

A la profesora M.I. Araceli Angélica Sánchez Enríquez, por acompañarme y guiarme en un proceso que tenía pendiente desde hace tiempo.

A mi familia, quienes desde niño creyeron en mí y me fortalecen con sus oraciones en todo momento.

Al Ing. Marcelo Domínguez, por la oportunidad que me dio para llevar a cabo este proceso.

Al Dr. Domingo Pérez M., por ser un gran amigo y apoyo en este paso.

A mis compañeros y excompañeros de Yutave, de quienes, de alguna u otra forma, recibo su apoyo y su amistad haciéndome sentir en casa.

A aquellos maestros y amigos que en algún momento dejaron una huella y contribuyeron a mi formación académica.

INTRODUCCIÓN

Cuando se diseña una carretera nueva de alguna forma se puede tener control de los tipos de materiales con los que se va a construir la estructura, generalmente se busca aprovechar los materiales disponibles y cercanos a la ubicación de la obra, se realizan estudios geotécnicos y con ello estos materiales se caracterizan de tal forma que se puede determinar, por diversas metodologías, el espesor de las capas de acuerdo a las propiedades de los materiales y el horizonte de proyecto; sin embargo, en muchos de los casos en caminos ya construidos y en operación se vuelve difícil acceder a los datos del control de calidad de los materiales usados, por lo cual, evaluar un pavimento en operación después de varios años de su construcción, se torna como un reto para obtener con suficiencia, información útil que permita evaluarlos de forma adecuada.

Por otra parte, es importante administrar los recursos limitados para conservar la mayor longitud posible de los caminos, priorizar los puntos críticos y delimitar las zonas donde la estructura cuenta con la capacidad para llegar a un nuevo horizonte de proyecto.

Este trabajo presenta un método simple y directo para la evaluación de las necesidades estructurales de pavimentos flexibles basado en la interpretación del cuenco de deflexiones usando conceptos mecanísticos y empíricos.

Se analiza la factibilidad y eficiencia de emplear los resultados de la medición de deflexiones con equipos de alto rendimiento como el deflectómetro de impacto FWD (Falling Weight Deflectometer), para predecir la capacidad portante de la estructura de un pavimento flexible en la red federal libre de peaje de México.

Mediante el equipo no destructivo FWD se generan deflexiones controladas en el pavimento, mismas que son medidas con una serie de geófonos y sensores de carga, que pueden ser interpretadas a través de técnicas basadas en análisis de la forma, radio de curvatura y área de la cuenca. Dichas técnicas permiten la cuantificación y cualificación del nivel de deterioro estructural del sistema pavimento-subrasante a través de los parámetros e índices derivados de pruebas de deflexión por impacto para evaluación de pavimentos.

PRÓLOGO

En los últimos años se ha hecho un importante esfuerzo para el mejoramiento de la condición física de la red carretera mexicana, para lo cual la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) y la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) se

inclinaron entre otras acciones, a implementar nuevos esquemas de atención a las necesidades de mantenimiento de la red carretera, la cual consiste en nuevas formas de contratación y financiamiento para la conservación, a través de la ley de Asociación Público-Privada (APP's). Este esquema contempla la modalidad de pagos por el cumplimiento de indicadores de desempeño para la capacidad estructural y operacional del pavimento, para lo cual es necesario obtener entre otros, el valor de la deflexión ya que es uno de los indicadores que permiten evaluar el estado estructural y realizar propuestas para rehabilitar los caminos.

Por eso, es importante entender y evaluar la respuesta estructural que ofrece la estructura de un camino ante las diferentes solicitaciones a la que es sometido, lo cual, implica un importante salto en la interpretación de estos resultados para evaluar de forma particular una carretera utilizando estos datos, así como las condiciones de tránsito que permiten pronosticar la vida útil y el requerimiento estructural de refuerzo para alcanzar el horizonte de proyecto adecuado.

OBJETIVO

Determinar el estado funcional y estructural de un subtramo de la carretera federal mexicana 200: Arriaga - Tapachula, tramo: Pijijiapan - Mapastepec (cuerpo. B) subtramo: del km 174+000 al km 189+000, con el objeto de conocer el efecto de las acciones de conservación, rehabilitación y/o reconstrucciones realizadas, así como la respuesta estructural ante una acción de carga sobre el pavimento. De esta forma, se podrá conocer la calidad de los trabajos realizados, además, se contará con información suficiente para planear y programar futuras obras de conservación en el tramo de estudio.

Disponer de un conocimiento real y actualizado de la condición del pavimento, a fin de que se pueda preparar (en suficiencia técnica) propuestas de trabajo para realizar la conservación de dicho tramo, sin realizar pruebas invasivas ni alterar la estructura del pavimento o generar deterioros técnicos.

Realizar un diagnóstico basado en el análisis deflectométrico de dicho tramo. A partir de los datos estructurales (obtención de deflexiones, medición de espesores con GPR, cálculo de módulos elásticos y vida remanente con el programa Elmod 6 de Dynatest) y analizar las opciones dentro de las estrategias de conservación para finalmente plantear una propuesta de rehabilitación.

JUSTIFICACIÓN

Las actividades del estudio están enfocadas a determinar si las condiciones estructurales del pavimento construido se ajustan a los requerimientos de calidad para el flujo del tránsito actual y futuro para el cual está diseñado.

Evaluar un pavimento en operación generalmente implica obstruir la circulación habitual de los vehículos y esto a su vez conlleva riesgo de generar accidentes, dado que realizar pruebas destructivas en pavimentos requieren de un gran número de personas y en ocasiones maquinaria, se convierte en una actividad lenta aumentando el riesgo de siniestros, por otra parte, el uso de equipos como el deflectómetro de Impacto FWD (Falling Weight Deflectometer) y Radar de Penetración Terrestre GPR (Ground Penetrating Radar) permite disponer de información para evaluar un pavimento y proponer un plan de rehabilitación de forma relativamente rápida respecto a la exploración directa, dando una ventaja en tiempos, disminución de riesgos, menor alteración al tráfico y sin generar deterioros técnicos en el camino.

La aplicación de este tipo de propuestas de rehabilitación resulta útil en los tramos largos y cortos pues minimizan los recursos para obtener la información de campo; por lo tanto, utilizar equipos como el FWD y el GPR direccionan las tendencias al evaluar, diseñar, supervisar y mejorar los trabajos de conservación y rehabilitación de carreteras.

METODOLOGÍA

Con el fin de analizar la condición estructural de un pavimento con pruebas del tipo no destructivas NDT (Non Destructive Test), se recabó y analizó información en campo con un deflectómetro de impacto FWD de la marca Dynatest modelo 8002, el cual obtiene el desplazamiento perpendicular de la superficie del pavimento cuando es sometido a una carga distribuida por un plato de carga de 30 cm de diámetro, empleando un arreglo de 7 geófonos colocados a las distancias de 0, 30, 45, 60, 90, 120 y 180 cm del centro de plato de carga y alineados entre sí, los cuales miden el desplazamiento en las distancias mencionadas, generando 7 puntos del cuenco de deflexión causado por el esfuerzo aplicado (el cual es cercano a los 700 kPa).

De los tramos que comprende la carretera Arriaga - Tapachula se acotó el tramo en estudio mencionado en el objetivo, la medición en campo de deflexiones se realizó en diciembre de 2020, siendo los datos ocupados para realizar la evaluación del estado estructural del camino y a partir de estos resultados determinar los trabajos de rehabilitación.

Recabar la información en campo, consistió en la medición de deflexiones con el FWD, mediciones a cada 100 metros en los dos carriles existentes (baja y alta velocidad) en el tramo de estudio. Posteriormente, con el uso de un georradar de penetración GPR de la marca IDS se obtuvo el espesor de cada una de las capas que conforman el pavimento.

Con el apoyo de los resultados de deflexiones, espesores de los estratos del pavimento y su análisis, se determinaron las condiciones que guardaba la estructura del pavimento, a través de indicadores deflectométricos y módulos de elasticidad de las capas que la integran.

Con este procedimiento la evaluación de la capacidad estructural del pavimento se realizó utilizando un método no destructivo, los resultados ayudaron a determinar en cada punto ensayado la calidad de la estructura del pavimento, las deformaciones o deflexiones asociadas a la sollicitación inducida, y así se pudo definir su capacidad para soportar las cargas vehiculares tomando en consideración los diferentes indicadores derivados del cuenco de deflexiones.

Además, el análisis de esta información utilizando el programa Elmod (Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design), sirvió para para realizar el retrocálculo y determinar el módulo elástico de las capas que conforman el pavimento.

De forma paralela, se consideró la información y el acervo de datos viales que presenta la DGST en su página oficial para calcular los ejes equivalentes, se consideró una tasa de crecimiento calculada con el histórico de tránsito diario promedio anual (TDPA) de la estación de aforo más cercana y de mayor influencia al tramo en estudio, se consideró una tendencia de crecimiento de interés compuesto y se usó la configuración vehicular del año 2019 con los pesos y dimensiones autorizados por la SCT de la norma NOM-012-SCT-2-2014.

Con el programa Elmod, utilizando los resultados del retrocálculo y los ejes equivalentes con los datos viales, se determinó la vida remanente en cada punto de ensaye. Posteriormente se calculó el espesor de recuperación del pavimento necesario para formar una capa de base espumada y una carpeta ultradelgada de rodadura.

Con estos datos se construyó un larguillo donde se tramificó el subtramo en zonas de condición similar de refuerzo. Se tomó en consideración el umbral permisible de una deflexión máxima de 500 micras como límite máximo para ubicar los puntos donde no se requirió refuerzo y para los sitios donde no se cumplió con esta restricción se postularon como puntos candidatos a realizar un trabajo de refuerzo estructural con Base espumada (con material producto de recuperación).

Finalmente se realizó una propuesta de rehabilitación para un horizonte de proyecto de 5 años presentando un larguillo donde se tramificó el subtramo en zonas de condición similar de refuerzo aprovechando (sin modificar la estructura) las zonas donde el pavimento cumplía con el estándar de desempeño de 500 micras como máximo en las deflexiones al centro del plato de carga.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
INTRODUCCIÓN.....	III
PRÓLOGO.....	III
OBJETIVO.....	IV
JUSTIFICACIÓN.....	IV
METODOLOGÍA.....	V
ÍNDICE.....	VII
I. ANTECEDENTES.....	1
EQUIPOS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DE UN PAVIMENTO.....	3
II. MEDICIÓN DE DEFLEXIONES CON DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO, FWD.....	5
CONCEPTO DE DEFLEXIÓN.....	5
ANÁLISIS DE DEFLEXIONES DETERMINADAS IN SITU.....	7
PROCESO DE EJECUCIÓN DE DEFLEXIÓN EN EL PAVIMENTO.....	8
NORMALIZACIÓN DE DEFLEXIONES A 700 KPA.....	11
PROCEDIMIENTO PARA CORRECCIÓN POR TEMPERATURA.....	12
III. MEDICIÓN DE ESPESORES CON GEORRADAR.....	15
CONDICIONES DE USO GPR (HI-PAVE).....	15
METODOLOGÍA DE MEDICIÓN CON GPR.....	16
OBTENCIÓN DE LECTURAS.....	16
PROCESAMIENTO DE DATOS.....	17
IV. EVALUACIÓN DEL TRÁNSITO DE DISEÑO.....	19
MÉTODO DE CONTEO MANUAL.....	22
MÉTODO DE CONTEO AUTOMÁTICO.....	22
CONTEO PERMANENTE DE FLUJO DE TRÁNSITO.....	23
CONTEO TEMPORAL DEL FLUJO DE TRÁNSITO.....	23
V. EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS.....	25
DEFINICIÓN.....	25
ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO.....	25
INDICADORES DERIVADOS DE LAS PRUEBAS DE DEFLEXIÓN.....	26
VI. CÁLCULO DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD.....	29

RMS	33
MÓDULO SUPERFICIAL	34
RETROCÁLCULO CON ELMOD	38
VII. ANÁLISIS DE VIDA REMANENTE	43
FUNCIONES DE TRANSFERENCIA	43
MODELO DE ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO POR FATIGA	44
MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE	46
VIII. DESCRIPCIÓN DE LOS TRAMOS	50
LOCALIZACIÓN	50
CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS TRAMOS	51
TOPOGRAFÍA DE LOS TRAMOS	52
UNIDADES CLIMÁTICAS	53
AGUAS SUPERFICIALES	55
GEOLOGÍA	56
SUELO	57
IX. COLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO	58
MEDICIÓN EN EL CARRIL DE BAJA	58
MEDICIÓN EN EL CARRIL DE ALTA	61
NORMALIZACIÓN	64
DEFLECTOGRÁMAS CON ZONAS HOMOGÉNEAS	66
ESPEORES MEDIDOS CON GPR	67
X. TRÁNSITO DE DISEÑO	68
XI. EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL PAVIMENTO CON DEFLEXIONES	71
DEFLEXIONES CARRIL DE BAJA	72
DEFLEXIONES CARRIL DE ALTA	75
NORMALIZADA CARRIL DE BAJA	78
NORMALIZADA CARRIL DE ALTA	81
ESTADÍSTICA CARRIL DE BAJA	85
ESTADÍSTICA CARRIL DE ALTA	86
ZONAS HOMOGÉNEAS CARRIL DE BAJA	88
ZONAS HOMOGÉNEAS CARRIL DE ALTA	92
ANÁLISIS DE LA CUENCA CARRIL DE BAJA	97
ANÁLISIS DE LA CUENCA CARRIL DE ALTA	100

FACTORES DE FORMA CARRIL DE BAJA	103
FACTORES DE FORMA CARRIL DE ALTA.....	104
GRÁFICAS ÍNDICES ESTRUCTURALES CARRIL DE BAJA.....	105
GRÁFICAS ÍNDICES ESTRUCTURALES CARRIL DE ALTA.....	108
CONDICIÓN DERIVADO DEL ANÁLISIS DEFLECTOMÉTRICO CARRIL DE BAJA	112
CONDICIÓN DERIVADO DEL ANÁLISIS DEFLECTOMÉTRICO CARRIL DE ALTA	113
XII. DISEÑO DE REFUERZO DE PAVIMENTO	114
ESPEORES GPR CARRIL DE BAJA	115
ESPEORES GPR CARRIL DE ALTA	116
CONDICIONES EQUIVALENTES CARRIL DE BAJA.....	117
CONDICIONES EQUIVALENTES CARRIL DE ALTA.....	118
RETROCÁLCULO DE MÓDULOS Y DISEÑO DE SOBRECAPA (CARPETA Y BASE ESPUMADA) CARRIL DE BAJA	120
RETROCÁLCULO DE MÓDULOS Y DISEÑO DE SOBRECAPA (CARPETA Y BASE ESPUMADA) CARRIL DE ALTA	123
MÓDULOS CARRIL DE BAJA.....	126
MÓDULOS CARRIL DE ALTA	127
DISEÑO CARRIL DE BAJA.....	128
DISEÑO CARRIL DE ALTA	129
CONCLUSIÓN DISEÑO CARRIL DE BAJA	130
CONCLUSIÓN DISEÑO CARRIL DE ALTA.....	131
XIII. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN.....	132
CONDICIÓN CON ESTÁNDARES DE DESEMPEÑO.....	132
SECTORIZACIÓN.....	136
LAGUILLO DE REHABILITACIÓN.....	141
XIV. CONCLUSIONES	146
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	150
ILUSTRACIONES	153

I. ANTECEDENTES

La medición de las deflexiones, se utiliza generalmente para conocer la capacidad estructural de los pavimentos; dentro de la tecnología aplicada a pavimentos, particularmente en la evaluación estructural de los mismos, existen una extensa lista de metodologías y equipos para tales fines.

La información especializada disponible basada en la experiencia y en el desempeño de los pavimentos, proporciona información acerca del estado de respuesta localizada directamente en el punto de aplicación de la carga y en la vecindad de puntos que interactúan (por lo general con radio menor a 2 metros del centro de aplicación de: un esfuerzo desviador a partir de una carga por impacto, una vibratoria o de una alteración por impulso a la estructura de pavimento).

Las deflexiones se miden con transductores (geófonos) posicionados a una distancia conocida del centro de aplicación de la carga que determinan el desplazamiento perpendicular de la superficie de un pavimento ante un impacto. Actualmente, existen diversos procedimientos para la medición de deflexiones en pavimentos de concreto asfáltico, en concreto hidráulico, e incluso en una combinación de los mismos.

Los ensayos realizados mediante esta metodología, son por su naturaleza denominados no destructivos NDT (Non Destructive Test). Las deflexiones proporcionan información que se utiliza para la evaluación estructural de los pavimentos. Además, los resultados de dichas deflexiones pueden emplearse a su vez para deducir las siguientes características de los pavimentos.

- Módulo de elasticidad de cada capa
- Rigidez combinada de los sistemas de pavimentos
- Eficiencia en la transferencia de carga en las juntas de pavimentos de concreto hidráulico
- Módulos de reacción de la subrasante
- Espesor efectivo, número estructural o valor de soporte del suelo
- Capacidad de carga o capacidad de soporte del pavimento

Dichos parámetros pueden utilizarse en el análisis y diseño de la rehabilitación y reconstrucción de pavimentos rígidos y flexibles, valoración de la capacidad estructural incluyendo la eficiencia de las juntas en pavimentos de concreto hidráulico, detección de oquedades en pavimentos de concreto hidráulico, y/o para fines de inventario estructural de la red, además, esta información forma parte

Medular del sistema de administración y gestión de pavimentos que maneja de Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) de la SCT con el programa HDM4.

Actualmente en México se promueve la conservación de diferentes carreteras bajo el esquema APP, dentro de las especificaciones de trabajo se solicita un umbral de 500 micras como límite permisible para la deflexión máxima normalizada a 700 kpa y 20 ° C, no obstante, para evaluar la condición de un pavimento, se requiere desarrollar varias etapas, iniciando con la auscultación en campo consistente en medir varios estándares de desempeño, (deflexiones, índice de rugosidad internacional, profundidad de roderas, índice de fricción, macrotextura, retroreflexión horizontal y vertical del señalamiento y deterioros). En la actualidad, se ha intensificado el uso de estos métodos no destructivos por la rapidez, facilidad, versatilidad y la poca afectación al tránsito vehicular con que permiten recolectar información relevante para evaluar carreteras.

Los pavimentos son estructuras formadas por una serie de capas superpuestas, diseñadas para disminuir los esfuerzos generados por la carga impuesta debido al tránsito. Dichas capas están compuestas con material seleccionado con características específicas y un procedimiento constructivo adecuado a las condiciones climáticas regionales y/o generales aplicables dentro del marco normativo aplicable.

Luego, la capacidad estructural de un pavimento se puede interpretar como: el umbral límite del volumen de tránsito con las condiciones climáticas reales al que pueden someterse una estructura de pavimento, de tal forma que las condiciones de operabilidad y costos de operación mantengan un rango aceptable, por lo tanto, está directamente ligado al volumen y características de tránsito que circula sobre dicho pavimento.

Las vías terrestres y en particular las carreteras implican un gran impacto económico y de desarrollo tanto para las comunidades que conectan como a la red nacional en general, por lo cual las condiciones de operabilidad y los costos de operación son un factor determinante para maximizar o frenar el crecimiento y desarrollo económico de las ciudades o comunidades que conecta, por lo cual se ha realizado gran hincapié en poder determinar con los recursos y metodologías disponibles una forma de monitorear estos parámetros.

Existen diversas opciones para determinar las condiciones en las que se encuentra la capacidad estructural de un pavimento, para tener una visión del comportamiento se han utilizado exploraciones directas para muestrear y medir de forma directa las

características del material que constituyen la estructura del pavimento de camino, determinar granulometrías, Clasificación SUCS, CBR, estabilidad etc. y estas a su vez servirían para correlacionar los módulos de las capas y con ello determinar la capacidad estructural con las metodologías disponibles, AASHTO, II UNAM, Instituto del Asfalto, IMT PAVE, Dr. Mario Hoffman, ELMOD, etc.

EQUIPOS PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DE UN PAVIMENTO

En los últimos años se han promovido el uso de las nuevas tecnologías y se ha ido aprovechando la evolución de las herramientas disponibles y de los avances tecnológicos, los cuales, permiten de forma más rápida y eficiente, disponer de información que permita determinar la capacidad estructural de un pavimento.

Los equipos más comunes para determinar la capacidad estructural de los pavimentos son: la viga Benkelman (ver ilustración 1) constituido por un dispositivo de 250 cm que se utiliza para medir la deflexión de la superficie de una carretera, provocada por el paso de las ruedas de un camión de 8.2 toneladas de peso. La viga se pone entre los neumáticos del vehículo y en contacto con el pavimento a ensayar, la medida de la deformación se realiza cuando el vehículo pasa sobre el área de ensayo.



ILUSTRACIÓN 1 EQUIPO DISCONTINUO PARA LA DETERMINACIÓN DE DEFLEXIONES VIGA BENKELMAN. FUENTE: UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

Equipo semicontinuo (ver ilustración 2) se considera como un deflectómetro transitivo se presentan en las siguientes imágenes.

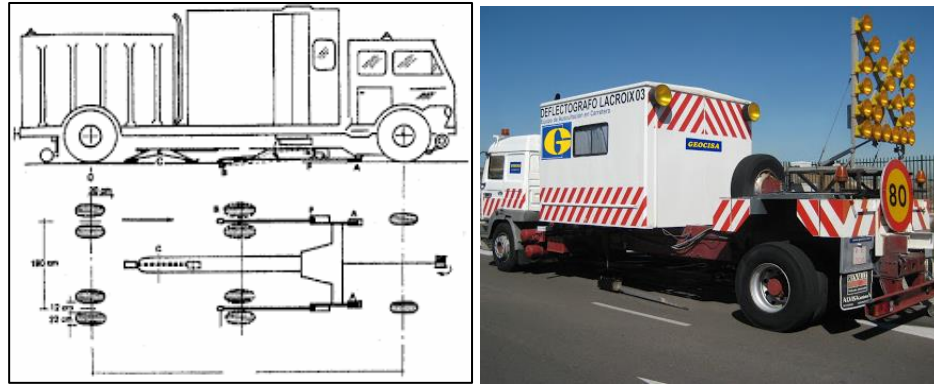


ILUSTRACIÓN 2 EQUIPO SEMICONTINUO PARA LA DETERMINACIÓN DE DEFLEXIONES DEFLECTÓMETRO LACROIX. FUENTE: GEOCISA

El equipo dinámico de aplicación de carga (ver ilustración 3) utiliza un generador de fuerza dinámica, el cual puede ser una masa giratoria o un mecanismo actuador servohidráulicamente controlado (p ej., Dynaflect, Road Rater).



ILUSTRACIÓN 3 EQUIPO DINÁMICO DE APLICACIÓN DE CARGA. FUENTE: INTERNET

EL deflectómetro de impacto FWD (ver ilustración 4) crea un impulso de carga sobre el pavimento, dejando caer una masa a partir de alturas variables sobre un sistema de resortes o caucho; conocido generalmente como Falling Weight Deflectometer, FWD (p ej., Dynatest, Kuab, Jils)



ILUSTRACIÓN 4 EQUIPO DE IMPACTO FWD. FUENTE: YUTAVE INGENIERIA, SA DE CV

El deflectómetro de Impacto (FWD), ha ido perfeccionando tanto el proceso de ejecución como la toma de información en pro de simplificar y optimizar la obtención de datos que permita interpretar el comportamiento de los pavimentos cuando son sometidos a las cargas que infiere el tránsito vehicular sobre la estructura, permitiendo tener una visión más apegada a la realidad.

II. MEDICIÓN DE DEFLEXIONES CON DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO, FWD

CONCEPTO DE DEFLEXIÓN

La deflexión de un pavimento se define como el valor que representa la respuesta estructural ante la aplicación de una carga vertical externa. También se define como el desplazamiento vertical del paquete estructural de un pavimento ante la aplicación de una carga; generalmente, esta carga es producida por el tránsito vehicular. Cuando se aplica una carga en la superficie no solo se desplaza el punto bajo su aplicación, produciendo una deflexión máxima, sino que también se desplaza una zona alrededor del eje de aplicación de la carga, que se denomina cuenca de deflexión (Sandoval C. H., 2009) (ver ilustración 5)

La deflexión permite ser correlacionada con la capacidad estructural de un pavimento, de manera que, si la deflexión es alta en un modelo estructural, la capacidad estructural del modelo de pavimento es débil o deficiente, y lo contrario, si la deflexión es baja, quiere decir que el modelo estructural del pavimento tiene buena capacidad estructural (Higuera C. H., 2008).



ILUSTRACIÓN 5 EFECTO DE LLANTAS EN ARREGLO TRÍDEM; FUENTE: (HIGUERA C. H., 2008)

Desde el punto de vista del comportamiento estructural, uno de los fundamentos conceptuales del sistema de gestión vial mexicano, es la aceptación de que “la deficiencia estructural puede correlacionarse con alguna medida hecha desde la

superficie del pavimento. La deflexión parece ser el concepto que mejor sirve para estos fines, pues su magnitud mide el defecto estructural, aunque no lo analice ni lo localice” (Rico A., 1998).

La medición de deflexiones en la superficie con métodos no destructivos se basa en simular el efecto de las cargas de tránsito sobre el pavimento, midiendo la respuesta de desplazamientos verticales generada (ver ilustración 6). Con base en la respuesta medida, se estiman parámetros e indicadores de comportamiento global del pavimento ante cargas, a partir de los cuales se puede establecer la competencia estructural del mismo (ver ilustración 7).

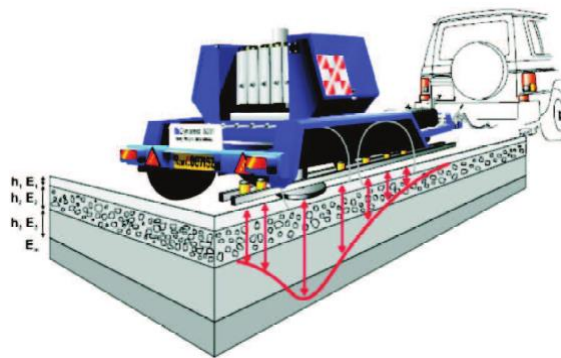


ILUSTRACIÓN 6 PRUEBA DE DEFLEXIÓN POR IMPACTO; FUENTE: PRESENTACIÓN SIMPROMA ARGENTINA S. A.

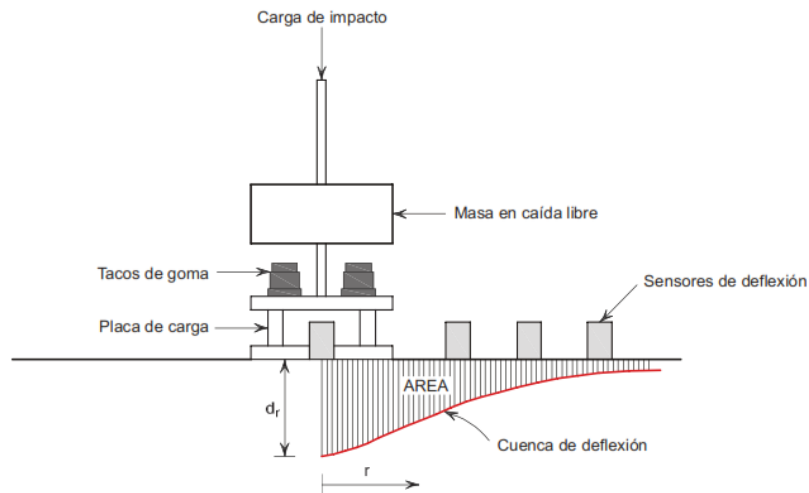


ILUSTRACIÓN 7 CUENCA DE DEFLEXIÓN; FUENTE: INTERNET\FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER

Con la información de deflexiones obtenida por medio del deflectómetro de impacto se puede determinar, con fines de seguimiento, la capacidad estructural de un modelo estructural de pavimento en cualquier momento de su vida de servicio y de esta manera conocer su desempeño, además se puede establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación. Esto es posible mediante procesos de retrocálculo,

con los cuales, si se emplea la metodología propuesta por AASHTO 1993, se obtienen parámetros conocidos como el módulo elástico de la subrasante (M_r), el módulo equivalente del pavimento (E_p) y el número estructural efectivo (SN).

La capacidad estructural de un pavimento en servicio se puede determinar mediante pruebas “no destructivas”, que se basan en la interpretación de la cuenca de deflexiones generada por el impacto de una carga estándar y con la técnica denominada retrocálculo, con esta técnica se pueden determinar los módulos de elasticidad de las diferentes capas que componen el modelo estructural de un pavimento en servicio (Higuera C. H., 2008).

ANÁLISIS DE DEFLEXIONES DETERMINADAS IN SITU.

La medición de las deflexiones se realizaron en un tramo de 15 km con aproximadamente 100 m entre puntos de ensayo tanto en el carril de baja como en el carril de alta, en el apartado IX se presentan los resultados de dichas lecturas determinadas en siete sensores; con las mediciones efectuadas por cada uno de los sensores se puede obtener un esquema de la cuenca de deflexiones producidas por el impacto de la carga aplicada (ver ilustración 8), se indica además el cadenamiento y magnitud de la carga impuesta en cada estación de lectura.

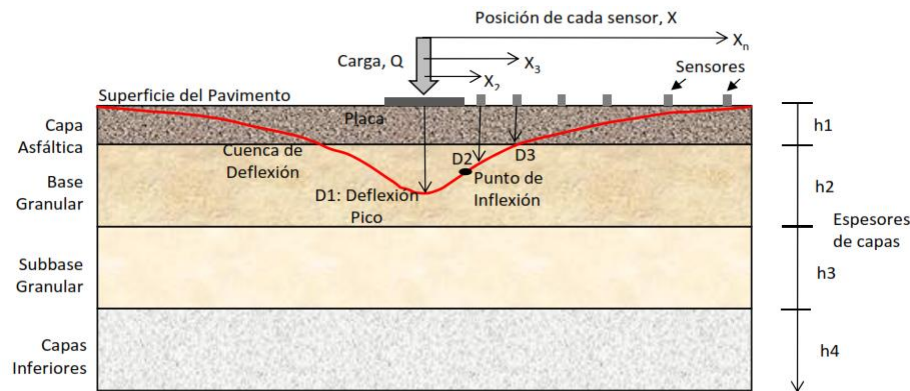


ILUSTRACIÓN 8 PRUEBA DE DEFLEXIÓN POR IMPACTO Y CUENCA DE DEFLEXIÓN; FUENTE: TESIS DOCTORAL EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS GLORIA INÉS BELTRÁN CALVO

La posición de los sensores se configura con 7 geófonos arreglados de la siguiente manera: 0, 30, 45, 60, 90, 120 y 180 cm (ver ilustración 9) a partir del plato de carga, en el caso de pavimentos flexibles. Como se muestra en la siguiente imagen (ver ilustración 10):

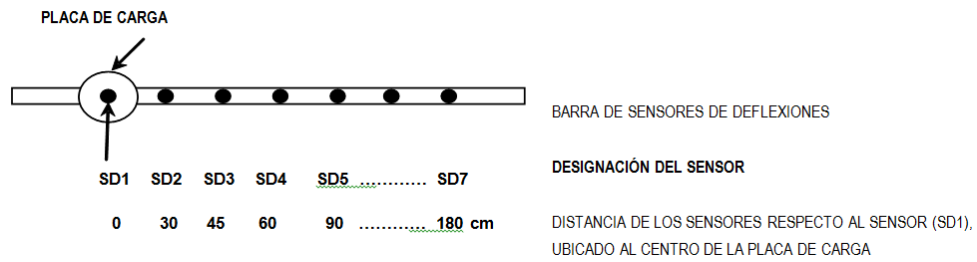


ILUSTRACIÓN 9 ARREGLO DE SENSORES EN EL EQUIPO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES; FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA



ILUSTRACIÓN 10 ARREGLO DE SENSORES EN EL EQUIPO; FUENTE: MANUAL DE INICIO RÁPIDO FWD - DYNATEST

PROCESO DE EJECUCIÓN DE DEFLEXIÓN EN EL PAVIMENTO.

Al realizar una prueba primero se traslada el equipo al sitio de estudio y se alinea el plato de carga con el punto de aplicación del impacto. En la medida de lo posible, se vigila que el sitio se encuentre libre de partículas de roca, grava, basura o cuerpos que pudiesen afectar el contacto de los sensores con el pavimento (ver ilustración 11).

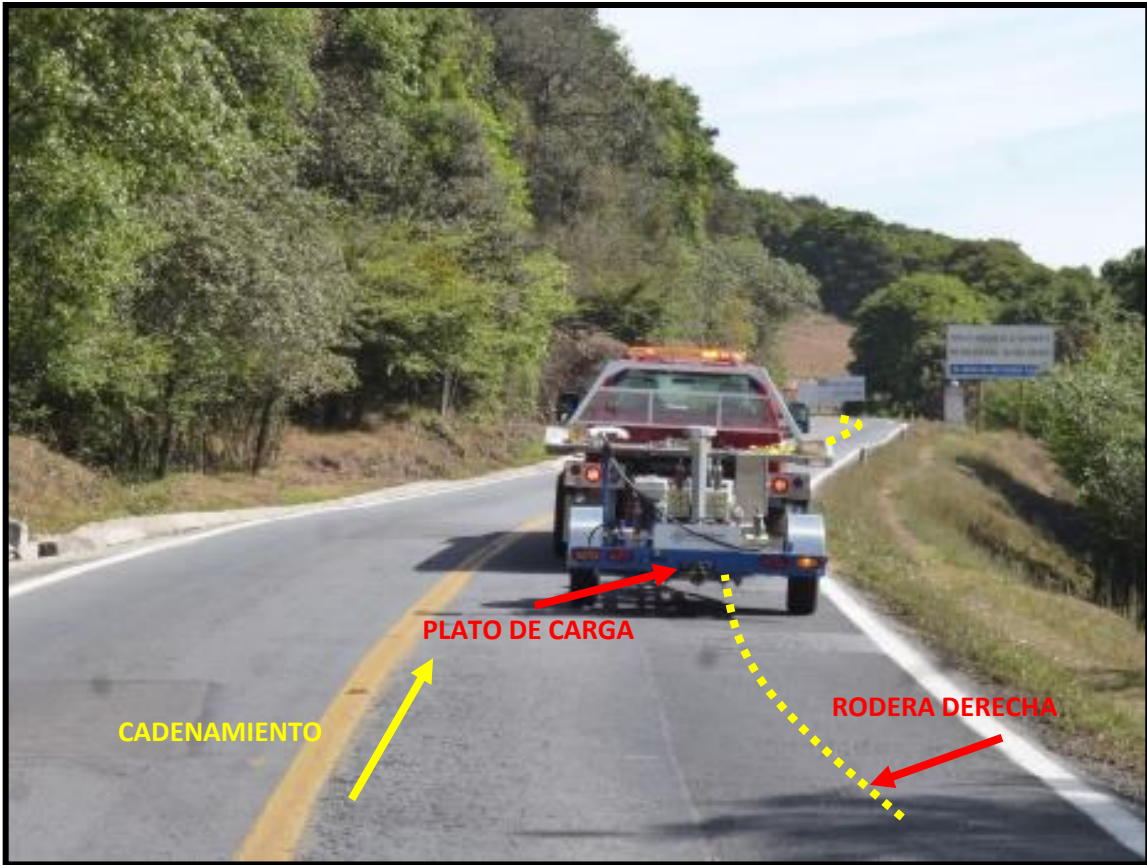


ILUSTRACIÓN 11 EQUIPO FWD EN OPERACIÓN; FUENTE: YUTAVE INGENIERIA SA DE CV

Para cada punto de medición se realiza la siguiente secuencia cíclica (ver ilustración 12):

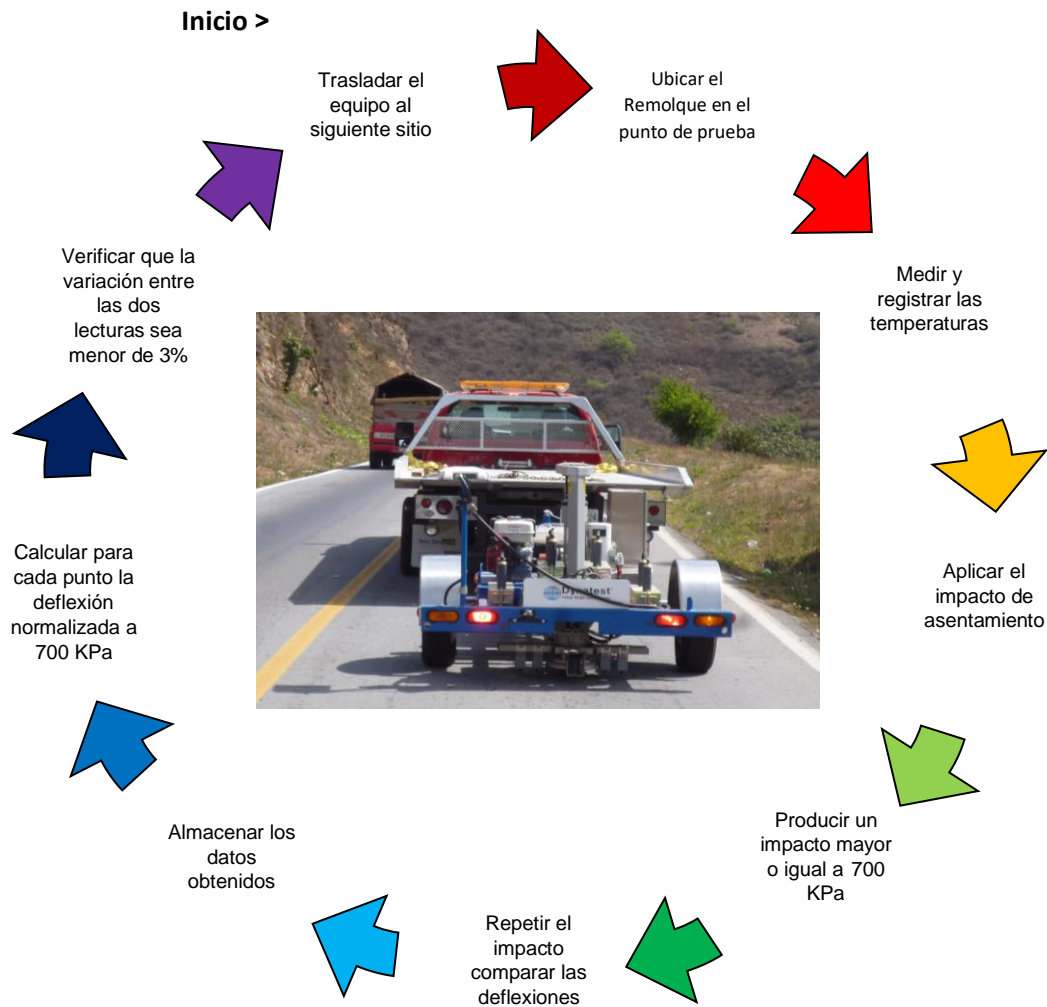


ILUSTRACIÓN 12.- DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE DEFLEXIONES; FUENTE: ELABORACION PROPIA

En primera instancia para cada prueba se registra la distancia con respecto al origen del tramo carretero, con base en las lecturas del dispositivo DMI el cual se encuentra instalado en el equipo FWD, mismo que esta simultáneamente asociado a sus coordenadas geográficas y UTM. Posteriormente se registran las temperaturas del aire y de la superficie del pavimento, y se verifica la firmeza y estabilidad de la superficie en medición, luego se hace descender el plato de carga y los sensores hasta que entran en contacto con el pavimento.

Una vez que el equipo se encuentra preparado y el plato de carga ubicado firmemente situado en la superficie de rodamiento, se aplica el impacto de

asentamiento, considerando la altura de caída “uno”, posteriormente a ello, se verifica que los sensores se encuentren en correcta posición.

Terminado el primer impacto, se repite la caída para producir un impacto considerando la altura de caída 2 que se marca en el equipo, de tal manera que se genere un impacto mayor o igual a 700 KPa, se registra el valor del impacto (carga y esfuerzo) y de la deflexión resultante en cada uno de los sensores.

Después, se repite el impacto anterior y se comparan las deflexiones obtenidas en ambas mediciones. La diferencia entre los resultados no debería ser mayor de 3% en cualquiera de los sensores para registrarlas en la bitácora de medición. Cuando la diferencia es mayor de 3%, se debe repetir las pruebas o en su defecto, se registra la justificación técnica de la variación en la bitácora donde se describe por qué se consideraba de esa forma para realizar el análisis.

Una vez que se realizó la comparación, se almacenan los datos obtenidos en las mediciones realizadas en una Base de Datos en formato *.mdb.

NORMALIZACIÓN DE DEFLEXIONES A 700 KPA

Con el propósito de retroalimentar el sistema de administración de pavimentos HDM-4 con la respuesta del pavimento a través de la deflexión, es necesario que la magnitud de ésta, se referencie a un esfuerzo constante (700 kPa) para efecto de que la equivalencia de la respuesta tenga un indicador fijo.

Durante la ejecución de las pruebas de medición de deflexiones, se mantiene constante el peso del lastre y la altura de caída que impacta sobre la placa de carga con el objetivo de inducir un esfuerzo muy cercano a 700 kPa, sin embargo, la respuesta que da el pavimento como principal factor, la pendiente longitudinal y transversal, entre otros, no permiten que esta condición se cumpla, razón por la cual, es necesario efectuar un simple cálculo de interpolación o extrapolación, según sea menor o mayor la deflexión producida por un esfuerzo de 700 kPa (ver ilustración 13).

A esta proyección se le denomina normalización de la deflexión a 700 kPa y en otras palabras, trata de establecer condiciones similares de carga/esfuerzo para comparar un punto con otro, aun cuando la altura de caída sea ligeramente distinta.

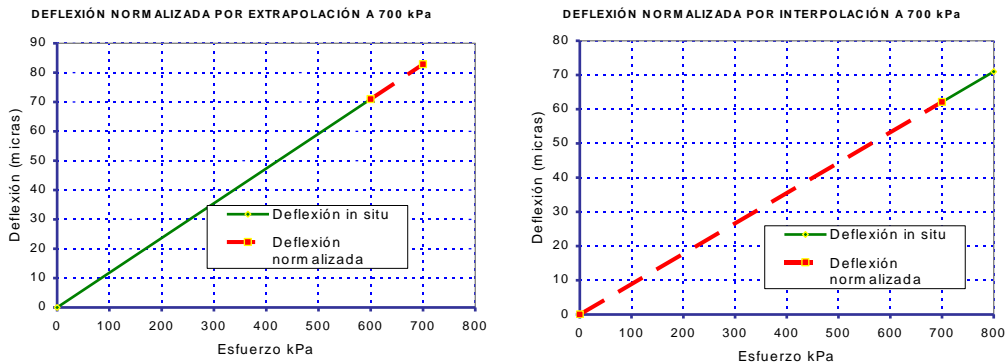


ILUSTRACIÓN 13 EJEMPLO DE UNA DEFLEXIÓN NORMALIZADA POR EXTRAPOLACIÓN E INTERPOLACIÓN A 700 KPA; FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Aplicando la normalización a todas las pruebas de deflexiones según se requiera interpolación o extrapolación, se presentan los resultados en el formato similar al que se muestra a continuación como ejemplo en la tabla 1.

TABLA 1 FORMATO DE MUESTRA PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTOS A UNA DEFLEXIÓN NORMALIZADA A 700 KPA; FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

No. PRUEBA	ESTACIÓN, km	ESFUERZO, kPa	DEFLEXION (micras)	
			IN SITU SD1	NORMALIZADA A 700kPa
1	0.498	683.00	316.80	324.69
2	1.000	660.00	381.10	404.20
3	1.503	707.00	515.30	510.20
4	1.941	696.00	121.50	122.20
5	2.504	679.00	354.80	*
6	2.997	676.00	*	*
7	3.503	714.00	*	
8	3.982	*		
9	4.505	*		
10	*			
11	*			
*				

PROCEDIMIENTO PARA CORRECCIÓN POR TEMPERATURA

Los resultados de las deflexiones del pavimento son dependientes de las condiciones climáticas y de variaciones ambientales. Con el fin de obtener resultados significativos en la capacidad estructural, las deflexiones y por lo tanto los módulos retrocalculados deben ser ajustados para tener en cuenta efectos de temperatura, ya que esta condición afecta significativamente el comportamiento de las capas del pavimento como la carpeta asfáltica y capas estabilizadas con asfalto las cuales son susceptibles a la temperatura.

A través de los años, se han desarrollado grandes hallazgos en investigaciones de los métodos para medir la temperatura de la mezcla asfáltica y ajustar los resultados de deflexiones por efecto de temperatura, una de estas metodologías se presenta

en el manual determinación de las deflexiones con equipo de impacto M·MMP·4·07·020/17 del instituto mexicano del transporte.

A continuación en la tabla 2, se presentan los métodos recopilados durante la revisión bibliográfica realizada, estos métodos han sido agrupados en dos categorías, aquellos que prefijan la temperatura de referencia y aquellos en que esta puede ser escogida (Suárez, 2013), donde: E_{ref} = módulo del concreto asfáltico a la temperatura de referencia; E_{ca} = módulo del concreto asfáltico retrocalculado; T_{ref} = temperatura de referencia; T_{ca} = temperatura de la capa de concreto asfáltico.

TABLA 2 CORRECCIÓN DE TEMPERATURA CON DIFERENTES AUTORES; FUENTE: REVISTA CIENCIA, INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA (RCIYT) | VOL. III | 2017

Ref	Autor	Expresión	Observaciones	No
[3]	Ullidtz y Peattie (1982)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 1 - 1.384 \log \left(\frac{T_{ca}}{15} \right)$	$T_{ref} = 15^{\circ}\text{C} = 59^{\circ}\text{F}$ $T_{ca}, ^{\circ}\text{C}$	(1)
[4]	Baltzer y Jansen (1994)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{-0.018(20-T_{ca})}$	$T_{ref} = 20^{\circ}\text{C} = 68^{\circ}\text{F}$ T_{ca} medida a 1/3 espesor capa, $^{\circ}\text{C}$	(2)
[4]	Kim (1995)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{-0.0275(20-T_{ca})}$	$T_{ref} = 20^{\circ}\text{C} = 68^{\circ}\text{F}$ T_{ca} medida a 1/3 espesor capa, $^{\circ}\text{C}$	(3)
[1]	Chile	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{-0.02284(20-T_{ca})}$	$T_{ref} = 20^{\circ}\text{C} = 68^{\circ}\text{F}$ $T_{ca}, ^{\circ}\text{C}$	(4)
[9]	Noureldin (2005)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = \frac{1}{1.0000008^{313442 - T_{ca}^3}}$	$T_{ref} = 20^{\circ}\text{C} = 68^{\circ}\text{F}$ T_{ca} medida a 1/2 espesor capa, $^{\circ}\text{F}$	(5)
[10]	Loizos et al (2015)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = e^{-0.06(T_{ca}-20)}$	$T_{ref} = 20^{\circ}\text{C} = 68^{\circ}\text{F}$ $T_{ca}, ^{\circ}\text{C}$	(6)
[9]	Agencia de Autopistas Inglesa (2008)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{0.0003(20-T_{ca})^2 - 0.022(20-T_{ca})}$	$T_{ref} = 20^{\circ}\text{C} = 68^{\circ}\text{F}$ T_{ca} medida a 10cm espesor capa, $^{\circ}\text{C}$ T_{ca} entre 15 y 25 $^{\circ}\text{C}$	(7)
[5]	Johnson y Baus (1992)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{-0.0002175(70^{1.886} - T_{ca}^{1.886})}$	$T_{ref} = 21.1^{\circ}\text{C} = 70^{\circ}\text{F}$ $T_{ca}, ^{\circ}\text{F}$	(8)

[9]	Ali y López (1996)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = e^{-0.03608145 T_{ca} - 0.75771}$	Tref = 21.1°C = 70°F Tca, °C	(9)
[3]	Chang (2002)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{-0.02822 (25 - T_{ca})}$	Tref = 25°C = 77°F Tca medida a 1/2 espesor capa, °C	(10)
[5]	Alexander Kwasi (2003)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = e^{-0.031 (T_{ca} - 25)}$	Tref = 25°C = 77°F Tca, °C	(11)
[3]	EVERCALC MICHIPAVE	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{-0.000147362 (77^2 - T_{ca}^2)}$	Tref = 25°C = 77°F Tca, °F	(12)
[6]	TxDOT	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = \frac{T_{ca}^{2.81}}{185000}$	Tref = 25°C = 77°F Tca, °F	(13)
[7]	Reddy (2003)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = \frac{1 - 0.238 \log(35)}{1 - 0.238 \log(T_{ca})}$	Tref = 35°C = 95°F Tca, °F	(14)
[5]	Ullidtz (1987)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = \frac{1}{3.177 - 1.673 \log T_{ca}}$	Tca > 1 °C	(15)
[8]	Lukanen (2000)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{m(T_{ref} - T_{ca})}$	m = -0.0195 para la huella m = -0.021 parte central del carril Tca a 1/2 espesor capa, °C y Tref, °C	(16)
[4]	Jung (1990)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = e^{-0.072(T_{ref} - T_{ca})}$	Tca y Tref, °C	(17)
[3]	Baltzer y Jansen (1994)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = \frac{1}{1 - 2.2 \log\left(\frac{T_{ca}}{T_{ref}}\right)}$	Tref, °C Tca medida a 1/3 espesor capa, °C	(18)
[3]	Antunes (1993)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = \frac{1.635 - 0.0317 T_{ref}}{1.635 - 0.0317 T_{ca}}$	Tca y Tref, °C	(19)
[3]	Chen (2000)	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = \frac{(1.8 T_{ca} + 32)^{2.4462}}{(1.8 T_{ref} + 32)^{2.4462}}$	Tref, °C Tca medida a 1/2 espesor capa, °C	(20)
[9]	Braun Intertec	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = 10^{-0.01(T_{ref} - T_{ca})}$	Tca y Tref, °F	(21)
[9]	ELMOD	$\frac{E_{ref}}{E_{ca}} = e^{-0.04663(T_{ref} - T_{ca})}$	Tca y Tref, °C	(22)

En México, los valores de deflexión normalizados por esfuerzo son corregidos por temperatura aplicando la normativa vigente de la SCT determinación de las deflexiones con equipo de impacto M-MMP-4-07-020/17. La corrección por temperatura se entenderá entonces, como el cálculo que se realiza para determinar

cuál es el valor de la deflexión a una temperatura de 20° C, cuando fue realizada la prueba a una temperatura diferente. Esto lo entenderemos como Normalización por temperatura y se utiliza el gráfico que se presentan a continuación en la Ilustración 14, el cual sirve para pavimentos flexibles con bases hidráulicas, estabilizadas o tratadas con productos asfálticos y/o cal.

Para emplear este grafico ingresamos en las abscisas con la temperatura de la carpeta asfáltica y con una línea vertical interceptamos el espesor total de las capas asfálticas para obtener el factor de corrección que multiplica a la deflexión normalizada a 700 kPa, con esto obtenemos la deflexión normalizada por temperatura

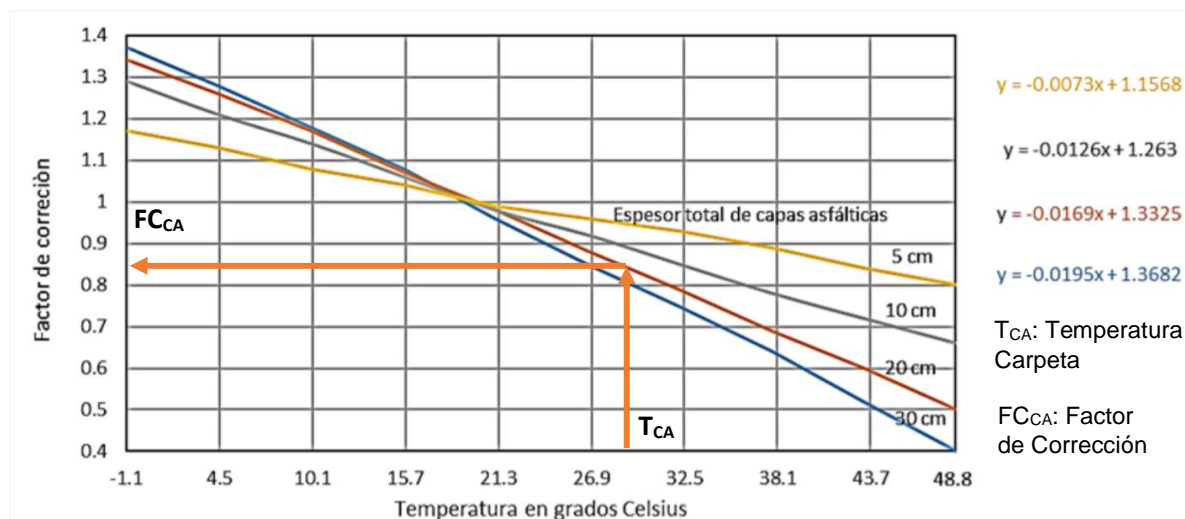


ILUSTRACIÓN 14 NOMOGRAMA DE NORMALIZACIÓN POR TEMPERATURA A 20° C; FUENTE: NORMATIVA SCT

III. MEDICIÓN DE ESPESORES CON GEORRADAR

El equipo que se utiliza para la obtención del perfil continuo de la estructura del pavimento en este trabajo es el GPR (HI-PAVE) de IDS, por sus siglas en inglés ground penetration radar (ver ilustración 15). Es una técnica no destructiva que consiste en un método de análisis de materiales basado en la transmisión de ondas electromagnéticas.

La normativa que se aplica es la ASTM D 4748-06. “Standard Test Method for Prediction of Asphalt-Bound Pavement Layer Temperatures” y la regulación del equipo es regulación europea 1999/05/EEC Radio Directive.

CONDICIONES DE USO GPR (HI-PAVE).

Altura de la antena: 50 cm con respecto a la superficie de rodamiento.

Velocidad: 80 km/h
Frecuencia: 1000 MHz.
Profundidad de lectura: 100 cm



ILUSTRACIÓN 15 GPR EN FUNCIONAMIENTO; FUENTE: YUTAVE INGENIERIA SA DE CV

METODOLOGÍA DE MEDICIÓN CON GPR.

El sistema utilizado está dedicado para aplicaciones de pavimento en carreteras de asfalto y concreto. La aplicación más común es detectar el espesor de las capas de asfalto y concreto, dentro del primer metro de profundidad.

OBTENCIÓN DE LECTURAS.

Para la obtención de lecturas se utiliza el software K2 FW (ver ilustración 16) instalado en una computadora portátil y está dedicado a la recolección y almacenamiento de los datos que genera el radar.

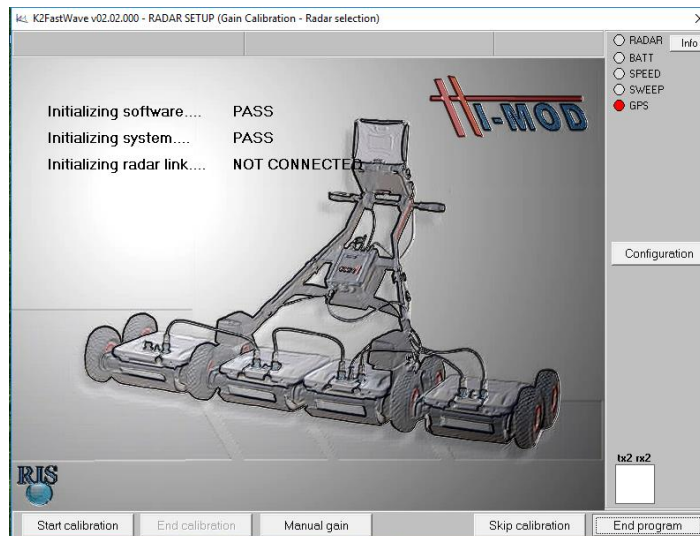


ILUSTRACIÓN 16 SOFTWARE K2 FW; FUENTE: YUTAVE INGENIERIA SA DE CV

En el software k2 FW se selecciona la frecuencia y la distancia en las que se dividen las muestras de los escáneres para su posterior análisis, 1000 MHz y 2000 metros respectivamente. Así mismo, para la recolección de datos se sincroniza el equipo con un sistema GPS para conocer la ubicación real de la localización donde se realizan los trabajos.

Las lecturas se generan de izquierda a derecha y donde se nota que el contenido de la sección de radar cambia línea por línea. Cuando el sistema pasa a través de una posible utilidad o un objetivo de radar de cualquier tipo, aparecerán figuras típicas con forma de hipérbola (ver ilustración 17) con un contraste variable en la dirección de profundidad correspondiente a los impulsos recibidos.

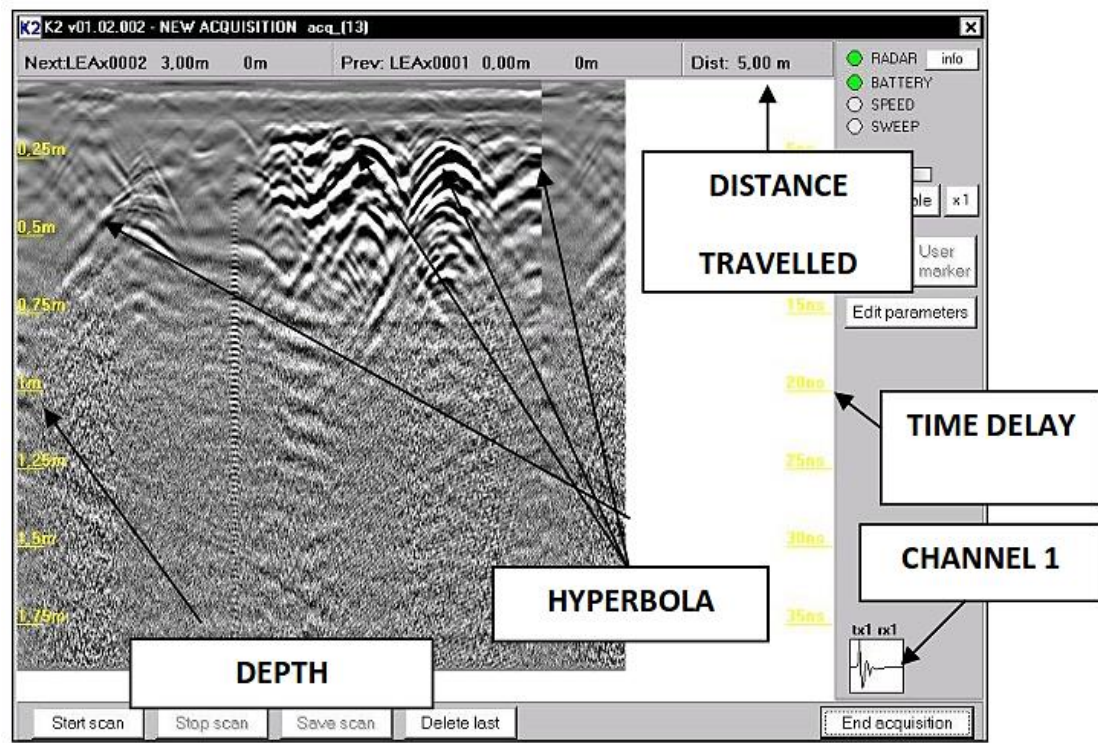


ILUSTRACIÓN 17 SECCIÓN DE RADAR DURANTE LA ADQUISICIÓN DE DATOS; FUENTE: K2 FASTWAVE 2.2 MANUAL DE USUARIO

Se toman las lecturas a lo largo del tramo en un rango de velocidad de 80 a 110 km/h. En este caso en particular se usó una velocidad promedio de 80 km/h.

PROCESAMIENTO DE DATOS.

Posterior a la recolección y almacenamiento de datos, se requiere procesar y analizar la información, para esto, se hace uso del software GRED HD 01.06, en el cual por medio de los escáneres obtenidos se identifica los espesores encontrados (ver ilustración 18).

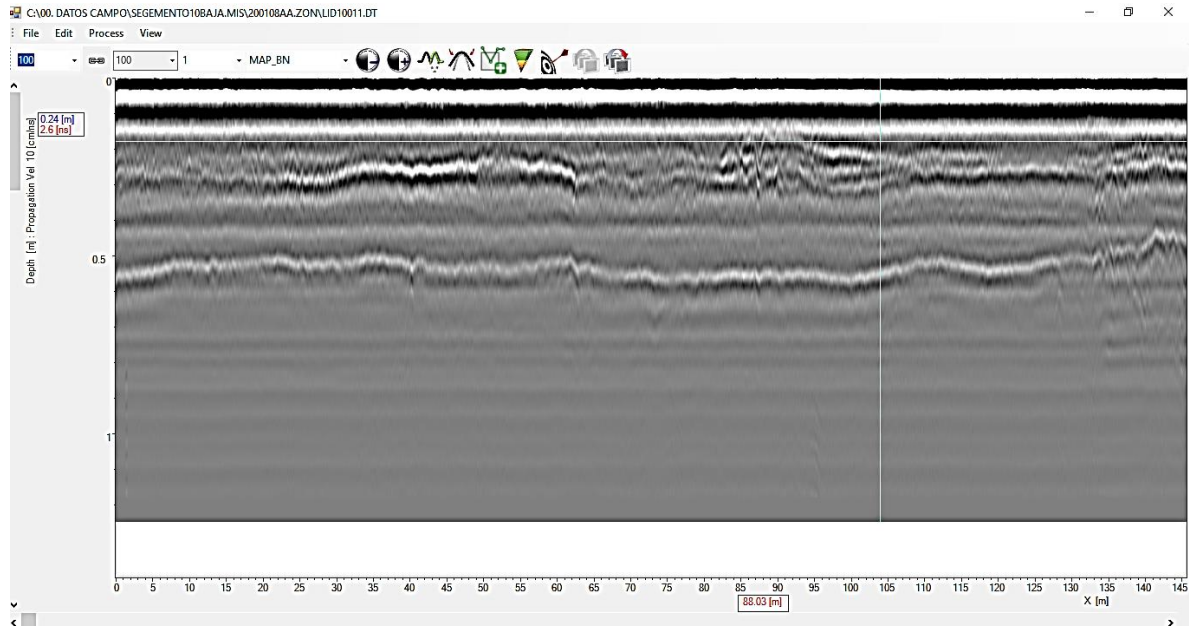


ILUSTRACIÓN 18 PROCESAMIENTO DE DATOS B-SCAN; FUENTE: K2 FASTWAVE 2.2 MANUAL DE USUARIO

Como inicio, se genera un nuevo proyecto que incluye la localización georreferenciada y trayectoria del sitio donde se realizó el estudio.

Después, se analiza cada escáner generado en la adquisición de datos (ver ilustración 19).

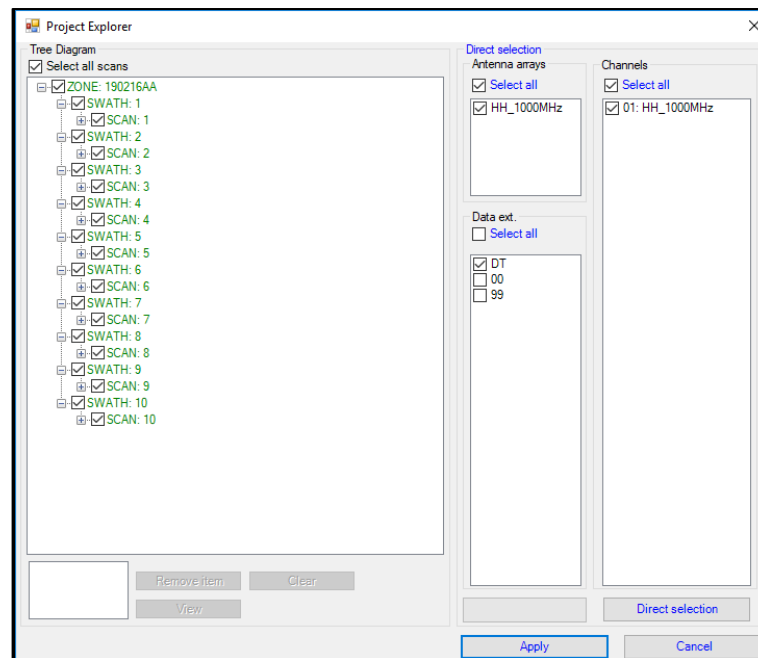


ILUSTRACIÓN 19 LISTA DE ESCÁNERES: FUENTE ELABORACIÓN PROPIA / YUTAVE INGENIERIA SA DE CV

Donde por cada escáner, el software a través de logaritmos identifica la superficie y los cambios de frecuencias, se traza la trayectoria longitudinal de la capa para posteriormente exportar la información a excel (ver ilustración 20) y conocer las profundidades de los espesores.

X [m]	Altitude [m]	Latitude	Longitude	LAYER-1: Depth	LAYER-2: Depth
2398.25	2246.75	19° 44' 54.91"	99° 1' 28.137'		
2418.25	2246.74	19° 44' 54.41"	99° 1' 28.769'	0.261	0.566
2438.25	2246.73	19° 44' 53.91"	99° 1' 29.373'	0.276	0.568
2458.25	2246.73	19° 44' 53.41"	99° 1' 29.978'	0.272	0.568
2478.25	2246.73	19° 44' 52.91"	99° 1' 30.609'	0.257	0.564
2498.25	2246.69	19° 44' 52.40"	99° 1' 31.213'	0.275	0.568
2518.25	2246.66	19° 44' 51.90"	99° 1' 31.818'	0.271	0.568
2538.25	2246.61	19° 44' 51.39"	99° 1' 32.449'	0.268	0.566
2558.25	2246.56	19° 44' 50.89"	99° 1' 33.054'	0.292	0.571
2578.25	2246.52	19° 44' 50.39"	99° 1' 33.685'	0.271	0.566
2598.25	2246.48	19° 44' 49.89"	99° 1' 34.290'	0.269	0.566
2618.25	2246.41	19° 44' 49.39"	99° 1' 34.894'	0.275	0.567
2638.25	2246.37	19° 44' 48.89"	99° 1' 35.498'	0.295	0.57
2658.25	2246.32	19° 44' 48.38"	99° 1' 36.130'	0.266	0.566
2678.25	2246.29	19° 44' 47.88"	99° 1' 36.734'	0.289	0.57

ILUSTRACIÓN 20 EJEMPLO DE DATOS DE GPR EXPORTADOS A EXCEL; FUENTE: ELABORACION PROPIA / YUTAVE INGENIERIA SA DE CV

Para el tramo en estudio se pudo conocer un panorama general de la composición de la estructura del pavimento, en la que a través de los escáneres se observó la presencia de 3 capas principales en ambos carriles, la capa 1 correspondiente a la carpeta asfáltica existente, la capa 2 a base hidráulica y la capa 3 a la terracería.

De igual manera, se realizaron sondeos en los laterales del camino y se extrajeron núcleos al centro de los carriles para compararlos con los espesores obtenidos con el GPR. Los espesores del GPR se obtuvieron con la intersección aproximadamente a cada 100 metros de la longitud total del tramo en estudio.

IV. EVALUACIÓN DEL TRÁNSITO DE DISEÑO

El tránsito vehicular es la solicitud principal y directa a la que una estructura de pavimento está sometida, además los cambios climáticos, intemperismo y meteorización, el paso repetido de los vehículos es principalmente por lo que los pavimentos sufren deterioros que van mermando su capacidad y funcionalidad

Para la caracterización del tránsito vehicular en México comúnmente se utiliza transformar numericamente el volumen y características del tránsito real en un cierto número de ejes sencillos duales de 8.2 t para el período de diseño, lo cual habitualmente se conoce como ejes equivalentes o ESAL (Equivalent Simple Axial Load), siempre y cuando se logre estar de acuerdo con los factores de equivalencia

a utilizar, ya que entre otras cosas, dependerán de cómo se defina esa equivalencia los factores serán diferentes en términos de agrietamiento por fatiga o en términos de magnitud de roderas (ver ilustración 21).

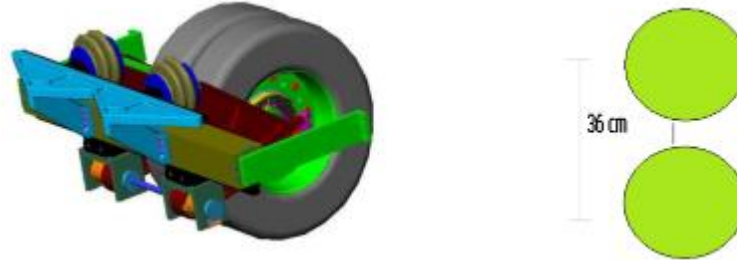


ILUSTRACIÓN 21 CONFIGURACIÓN DE UN EJE SENCILLO DUAL DE 8.2 TON; FUENTE: ESPECTROS DE CARGA Y DAÑO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS

En la actualidad se ha propuesto caracterizar el tránsito de forma más apegada a la realidad y se ha propuesto trabajar directamente con las configuraciones vehiculares y su correspondiente distribución de cargas por eje, a través del concepto de espectro de carga para darle a los diseños un enfoque mecanicista (ver ilustración 22).

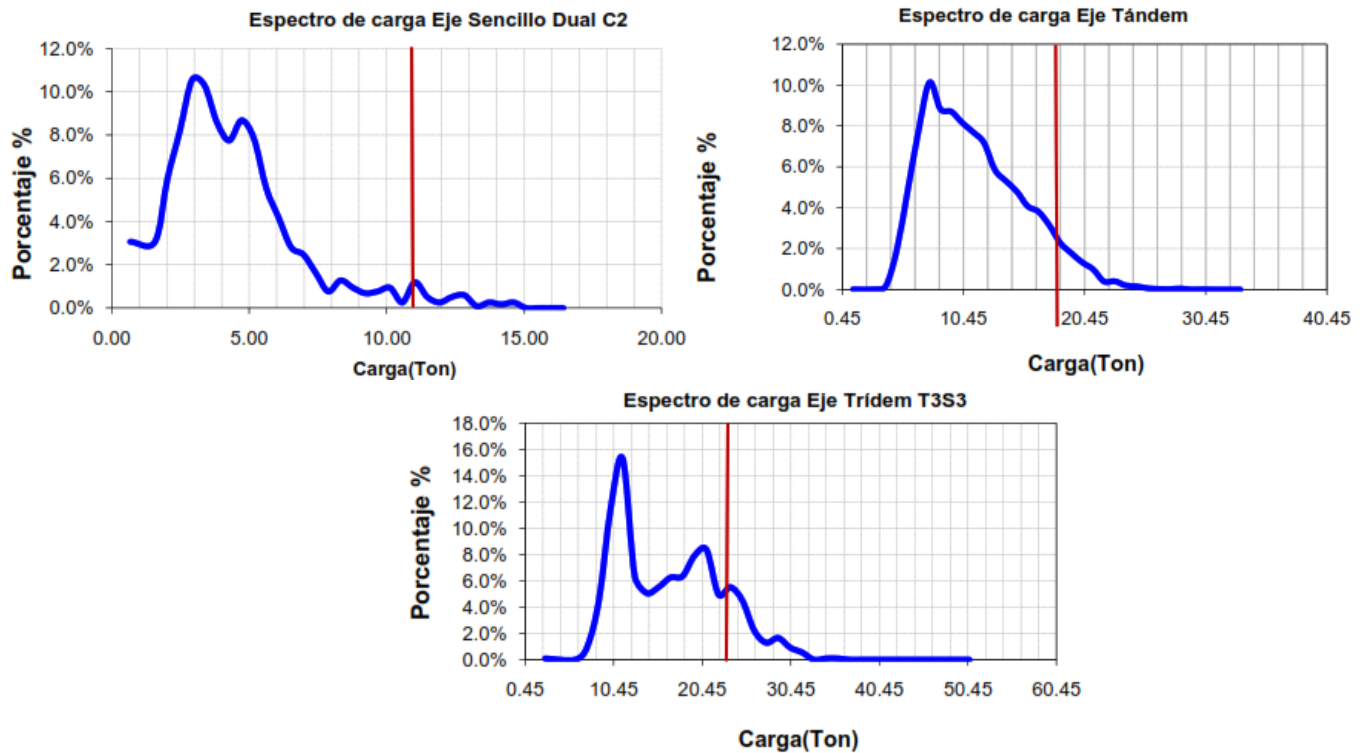
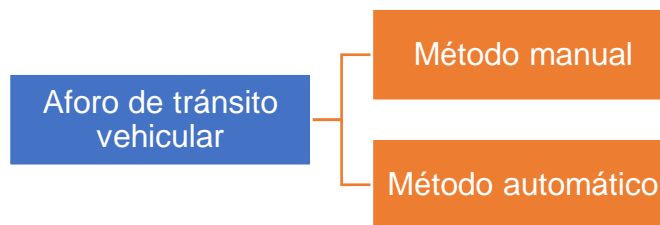


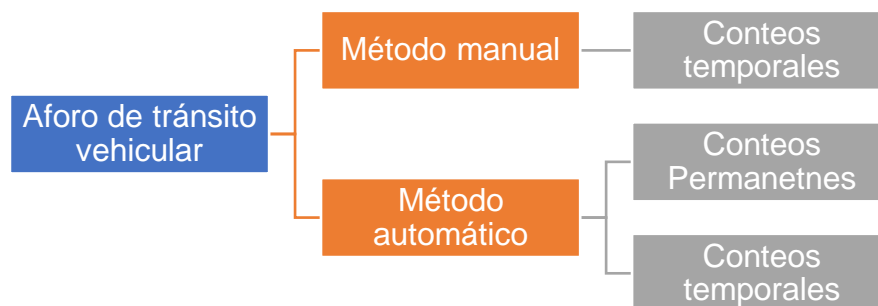
ILUSTRACIÓN 22 ESPECTROS DE CARGA EN LA CARRETERA LIBRE GÓMEZ PALACIO – JIMÉNEZ (2005); FUENTE: ESPECTROS DE CARGA Y DAÑO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS

El conocimiento permanente y oportuno del uso de una carretera, ya sea para la red básica, la red secundaria, o corredores carreteros incluso para vialidades urbanas es básico para el análisis y la toma de decisiones sobre la misma y esto tiene que ver invariablemente con el proyecto para la construcción de esta infraestructura. En cuestiones de la red vial que administra y supervisa la SCT esta misma, incluye entre sus actividades la operación de un sistema de conteo vehicular de las carreteras del país, que permite conocer anualmente los volúmenes vehiculares, clasificación y velocidades del tránsito que circula por la red de carreteras nacional.

Los datos del flujo de tránsito es un insumo básico en la planeación, proyecto, mantenimiento, gestión, evaluación económica, evaluación ambiental y administración de la infraestructura vial, Para conocer el comportamiento del flujo de tránsito (aforo de tránsito vehicular) en los trabajos de monitoreo de una red de carreteras existen dos métodos generales de conteo utilizados para la recopilación de datos:



Dependiendo de la magnitud del estudio, la precisión requerida de los datos y la asignación de recursos para este estudio, se realizan dos tipos de conteos del flujo de tránsito para cada uno de los métodos, dado que los conteos manuales son realizados por personal técnico, se torna muy complicado realizar conteos manuales de forma permanente, por eso no se considera para fines prácticos.



MÉTODO DE CONTEO MANUAL

El conteo manual es un método para obtener atributos del flujo de tránsito a través de personal que realiza el conteo vehicular de forma visual. Este método se emplea por lo general en conteos especiales de pocas horas de duración y para comprobar la exactitud de los conteos automáticos, esta actividad se lleva a cabo cuando la información deseada no puede ser obtenida mediante el uso de dispositivos automáticos o cuando las condiciones ambientales hacen imposible su empleo.

El método manual de conteo de flujo de tránsito permite clasificar a los vehículos por: tamaño, tipo, número de ocupantes, carril de circulación, dirección de circulación, entre otras propiedades muy diversas. Sin embargo, el método manual tiene desventajas como costo de empleo a personal de campo por tiempos prolongados, costo de procesamiento de información, tiempo de captura a formatos digitales y limitaciones por factores humanos.

La mecánica de este método es simple; consiste en que el personal registre y almacene la información del flujo de tránsito en un formulario especial (previamente establecido con la clasificación vehicular correspondiente). Este formulario puede ser en papel (hoja de conteo) o una tableta electrónica que cuente con una aplicación para la captura de datos, para así minimizar errores de procesamiento. (Manual para obtener los Volúmenes de tránsito en una carretera) (SCT, 2016)

MÉTODO DE CONTEO AUTOMÁTICO

El método de conteo automático se refiere al procedimiento de recopilación de datos, con un equipo automático diseñado para registrar continuamente los componentes del flujo de tránsito en un tiempo establecido, el cual puede ser: minutos, horas, días, semanas, meses o años.

Los atributos del flujo de tránsito son registrados por medio de sensores (también llamados detectores) que transmiten la información a un equipo registrador (generalmente ubicado a un lado del camino), para su almacenamiento y procesamiento. El dispositivo registrador, puede transmitir en tiempo real los datos de la información recolectada a centrales de conteo para su análisis en gabinete, mediante la ayuda de aditamentos de comunicación. (Manual para obtener los Volúmenes de tránsito en una carretera) (SCT, 2016)

CONTEO PERMANENTE DE FLUJO DE TRÁNSITO

Estos conteos registran información del flujo de tránsito permanentemente. Los lugares donde se ubican los dispositivos de conteo son llamados estaciones de conteo permanente, o estaciones maestras. Estas estaciones se colocan en lugares estratégicos a lo largo de toda la red de carreteras (federales y estatales) con el fin de representar los patrones de comportamiento del flujo de tránsito en una zona, región, grupo o conglomerado de caminos con características similares.

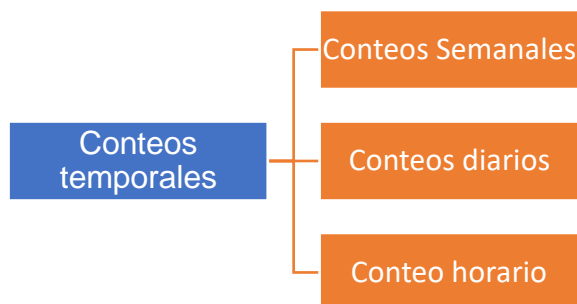
Los datos de las estaciones maestras se emplean para determinar los factores de ajuste necesarios para estimar parámetros del flujo de tránsito a partir de conteos temporales. Cabe señalar que este tipo de estaciones son una parte importante del programa de monitoreo realizado anualmente.

Para la instalación de las estaciones maestras, se debe partir del análisis del programa temporal, la necesidad de información y control de tramos específicos de carretera. Se deben definir las zonas donde se presente el mismo comportamiento de flujo vehicular, tomando como base los datos existentes y las actividades que se desarrollan en ellas. La ubicación precisa de las estaciones se determina por el o los puntos que mejor correlacionen con el resto de las mismas. (Manual para obtener los Volúmenes de tránsito en una carretera) (SCT, 2016)

CONTEO TEMPORAL DEL FLUJO DE TRÁNSITO.

Para obtener el comportamiento del flujo de tránsito en una red de carreteras es necesaria la obtención continua de datos. Sin embargo, la recolección de estos datos sobre todas las carreteras que comprenden la red, resulta poco factible debido a la gran cantidad de recursos necesarios para realizar esta tarea.

Se puede llevar a cabo una estimación razonable a través de conteos temporales y factores de ajuste, calculados a partir de las estaciones maestras. Dentro de los conteos temporales se recomienda el semanal, debido a que los viajes recreacionales, de trabajo y carga, están distribuidos con comportamientos diferentes, siguiendo patrones estacionales a lo largo de ese periodo; adicionalmente se tienen conteos de tipo especial como son los diarios y los horarios.



A continuación, se describen con mayor detenimiento los conteos mencionados:

Conteos Semanales: registra el comportamiento del flujo de tránsito durante 7 días continuos. Su función principal es calcular el Tránsito Diario Promedio Semanal (TDPS) para un punto en carretera. Al sitio donde se realiza este conteo se le conoce como estación semanal.

Conteos diarios: registra el comportamiento del flujo durante al menos 24 horas. En algunos casos este conteo puede llevarse a cabo por varios días, con el fin de calcular un Tránsito Diario Promedio (TDP) de un punto localizado en carretera.

Conteo horario: este conteo se encarga de registrar el comportamiento horario de punto específico; por lo general la duración de este registro es menor a 24 horas, aunque en ocasiones puede excederlas. Sus resultados son empleados para conocer el Tránsito Horario (TH) de un punto localizado en carretera.

Estos tipos de conteos cumplen la función de dar cobertura a los programas de monitoreo del flujo de tránsito, de tal manera, que se logren incluir todos los tramos de la red nacional de carreteras, tanto estatales como federales. Los dispositivos de conteo de las estaciones semanales se localizan en puntos específicos del tramo carretero. Este punto representa las características del segmento de carretera, considerado homogéneo respecto al volumen y clasificación de vehículos. La longitud para un segmento varía según la uniformidad del flujo de tránsito en el tramo, y la significancia del flujo de salida y entrada en las diferentes intersecciones.

La ubicación de las estaciones de conteo deberá encontrarse a suficiente distancia de puntos de conflicto vehicular (entronque, poblados, ciudades, etc.) para que la recepción de movimiento no sea alterada por movimientos locales, o deben colocarse las estaciones necesarias para diferenciar el volumen de una zona específica a la de una rural. (Manual para obtener los Volúmenes de tránsito en una carretera) (SCT, 2016)

V. EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS

DEFINICIÓN DE PAVIMENTOS

Un pavimento es un sistema de transferencia de carga de los vehículos o los factores de carga a un terreno natural, formado por el conjunto de capas de materiales diversos destinados a distribuir y retransmitir las cargas aplicadas por el tránsito a un terreno natural. Los pavimentos se pueden clasificar en dos tipos principalmente por su resistencia que presentan a la flexión. Pavimentos Flexibles (asfálticos) y pavimentos rígidos (Hidráulicos). (Zapata, 2017)

Los pavimentos flexibles son una estructura formada por una superficie de rodamiento, una carpeta de pavimento asfáltico, y un número finito de capas hidráulicas con propiedades y propósitos diferentes dependiendo el grado de exposición a la abrasión del tránsito (ver ilustración 23).



ILUSTRACIÓN 23 ESTRUCTURA COMÚN DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE; FUENTE INTERNET

Pavimentos rígidos, son una estructura formada por materiales hidráulicos protegidos por una losa de concreto hidráulico, la cual va dar una alta resistencia a la flexión y una mayor distribución de los esfuerzos a las capas que subyacen al pavimento y por ende al terreno natural.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO.

La magnitud y forma de los desplazamientos verticales registrados en las pruebas de deflexión, se encuentran fuertemente asociados con las características de resistencia y rigidez de las capas y de sus espesores.

Las deflexiones medidas cerca del plato de carga se han asociado con la rigidez relativa de las capas superiores del pavimento (Shahin, 2005) y (Goktepe, 2005); así mismo, las deflexiones en la parte media de la cuenca reflejan la rigidez relativa de las capas intermedias, mientras que las deflexiones más alejadas del eje de carga se han relacionado con la rigidez de las capas inferiores (Gopalakrishnan, 2010).

INDICADORES DERIVADOS DE LAS PRUEBAS DE DEFLEXIÓN

Deflexión máxima ($D_{m\acute{a}x}$). La deflexión registrada en el sensor ubicado en el sitio de aplicación de la carga corresponde al valor de $D_{m\acute{a}x}$; describe cómo se comporta globalmente el pavimento ante una carga, pero no necesariamente refleja la resistencia individual de alguna de las capas. Bajo el mismo nivel de carga, los sistemas de pavimento débiles tendrán mayor $D_{m\acute{a}x}$ que aquellos sistemas fuertes.

El área normalizada de la cuenca (AN). Para la obtención de AN, se divide la deflexión registrada en cada sensor por la $D_{m\acute{a}x}$ o D_0 en un arreglo de tres trapecios. Hoffman y Thompson (1982) propusieron la ecuación 1 para el cálculo del área normalizada cuando se utilizan 4 sensores separados a distancias constantes de 0.3m, con lo cual se evalúa la cuenca hasta una distancia de 0.9 m desde el eje de carga donde D_0 es la deflexión al centro del plato de carga $D_{0.3}$, $D_{0.6}$ y $D_{0.9}$. Son las deflexiones medidas a 0.3, 0.6 y 0.9 m respectivamente del plato de carga dadas en milímetros.

ECUACIÓN 1 TEORÍA DE HOFFMAN Y THOMPSON (1982)

$$AN = \frac{150(D_0 + 2D_{0.3} + 2D_{0.6} + D_{0.9})}{D_0}$$

Índice Estructural (I_e) (Orozco, 2005) propone determinar este índice adimensional, como la relación entre $D_{m\acute{a}x}$ [mm] y la distancia horizontal desde el eje de carga hasta el punto de inflexión (p_i) [mm] que exhibe la curva de deflexiones, según se ilustra en la ilustración 24.

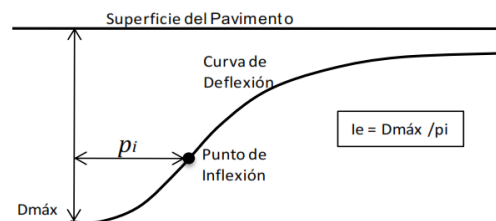


ILUSTRACIÓN 24 PUNTO DE INFLEXIÓN DE LA CUENCA NORMALIZADA; FUENTE: ANÁLISIS DE ÍNDICES DERIVADOS DE PRUEBAS DE DEFLEXIÓN POR IMPACTO GLORIA BELTRÁN ET AL (2012)

Factores de forma (BLI, MLI, LLI) (Horak E., 1988) planteó dividir las cuencas de deflexión en las tres zonas ilustradas en la ilustración 25.

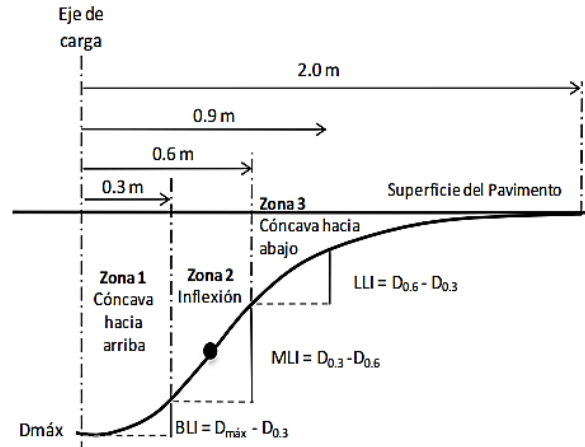


ILUSTRACIÓN 25 ZONAS DE LA CUENCA DE DEFLEXIÓN; FUENTE: ANÁLISIS DE ÍNDICES DERIVADOS DE PRUEBAS DE DEFLEXIÓN POR IMPACTO GLORIA BELTRÁN ET AL (2012)

El índice de forma F2 ($F2 = (D_{0.3} - D_{0.9}) / D_{0.3}$), evalúa la rigidez relativa de las capas granulares.

La relación de deflexión RD refleja la capacidad de las capas superiores respecto a la capacidad estructural total ($RD = D_{0.3} / D_{máx}$).

El módulo de rigidez dinámico MRD, por su parte ($MRD = Q / D_{máx}$); evalúa la resistencia global de la estructura en función de la carga aplicada, Q [kN]; bajo el mismo nivel de carga, los valores más altos reflejan mayores resistencias. (Zárate, 2011)

Determinación de las zonas homogéneas ZH, con la deflexión máxima se determinan las ZH adoptando la metodología propuesta por el Aashto 93, conforme al apéndice j de la guía de diseño estructural de pavimentos.

La Metodología se basa en los siguientes pasos:

Se realiza una hoja de cálculo donde la primera columna denotará el cadenamiento del ensayo correspondiente.

X1, X2, X3, ..., Xn

Siendo:

X1: El kilómetro en el que se realizó la deflexión 1

Xn: El kilómetro en el que se realizó la deflexión n

La segunda columna denotará la deflexión máxima normalizada, es decir la deflexión normalizada al centro del plato de carga.

La tercera columna denominada distancia del intervalo muestra la distancia entre las pruebas de deflexión de la columna 1, longitud expresada en metros.

$$\Delta X_1=0$$

$$\Delta X_2= X_2-X_1$$

$$\Delta X_n= X_n-X_{n-1}$$

La cuarta columna establecerá la distancia acumulada entre las pruebas de deflexión de la columna 3, longitud expresada en metros.

$$\sum \Delta X_1=0$$

$$\sum \Delta X_2= \Delta X_2+\Delta X_1$$

$$\sum \Delta X_3= \Delta X_1+\Delta X_2+\Delta X_3$$

$$\sum \Delta X_n= \Delta X_1+\Delta X_2+\Delta X_3+\dots+\Delta X_{n-1}+\Delta X_n$$

La quinta columna expresa el promedio de las deflexiones por intervalo, de la siguiente forma.

$$\bar{R}_1=R_1$$

$$\bar{R}_2=(R_1+ R_2)/2$$

$$\bar{R}_n=(R_{n-1}+ R_n)/2$$

La columna sexta denomina el área del intervalo, se determina mediante la expresión siguiente.

$$A_1=0$$

$$A_2=(\Delta X_2)*(\bar{R}_2)$$

$$A_n=(\Delta X_n)*(\bar{R}_n)$$

La columna séptima denomina el área acumulativa y se determina mediante la siguiente expresión.

$$\sum \Delta A_1=0$$

$$\sum \Delta A_2= \Delta A_2+\Delta A_1$$

$$\sum \Delta A_3= \Delta A_1+\Delta A_2+\Delta A_3$$

$$\sum \Delta A_n= \Delta A_1+\Delta A_2+\Delta A_3+\dots+\Delta A_{n-1}+\Delta A_n$$

Se determina el factor de diferencia mediante la siguiente fórmula.

$$F=\text{Área Acumulativa} / \text{Distancia Acumulativa}$$

$$F = \frac{\sum \Delta A_n}{\sum \Delta X_n}$$

La columna octava determina la diferencia acumulada a través de la siguiente expresión.

$$ZX_1 = 0$$

$$ZX_2 = \sum \Delta A_2 - (F * \sum \Delta A_2)$$

$$ZX_n = \sum \Delta A_n - (F * \sum \Delta A_n)$$

A este valor también se le puede llamar valor Z_x

Se realiza un gráfico Z_x VS abscisa el cual ayuda a la visualización de las secciones homogéneas. En teoría cada vez que el gráfico cambie de pendiente, esta determinará una nueva sección homogénea, se deberá tener en cuenta que las secciones muy pequeñas son antieconómicas para un tratamiento de rehabilitación.

VI. CÁLCULO DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD.

En ingeniería aplicada existen diferentes métodos para conocer la capacidad estructural, basados en métodos empíricos, inteligencia artificial con redes neuronales, elemento finito, pero en este trabajo se hablará de una técnica que habitualmente es llevada a cabo en la evaluación de la capacidad estructural de pavimentos flexibles, esta es: la predicción de los módulos de las capas del pavimento y conocer su capacidad estructural con la cual obtenemos (entre otras cosas) la vida remanente y el espesor de refuerzo para alcanzar un horizonte de proyecto con el programa Elmod.

En esta técnica se realiza un retrocálculo para obtener los módulos de todas las capas usando el cuenco de deflexiones medido con el deflectómetro de impacto, se determina la capacidad estructural global del pavimento a partir del módulo de la subrasante y la deflexión máxima medida al centro de carga del plato del deflectómetro. Aunque actualmente se han desarrollado técnicas que utilizan información adicional del cuenco de deflexiones, en esta técnica, las deflexiones medidas, o el módulo de las capas calculadas, deben ser ajustadas a un tipo particular de sistema o acción de carga y a condiciones ambientales normalizadas para su uso en el estudio de pavimentos según el país o región donde se realice el estudio. (Suárez, 2013)

Los factores relacionados con el sistema de carga son la frecuencia y nivel de la carga aplicada con FWD. El factor ambiental más importante que afecta la

superficie de pavimentos flexibles, es la temperatura de la capa asfáltica, influyendo en su módulo, así como la humedad de las capas granulares y materiales susceptibles a la humedad. En materiales no ligados, las propiedades de resistencia se ven afectadas, principalmente, por variaciones en el nivel de carga y el contenido de humedad, sin embargo, en México y particularmente en la SCT aún no se dispone de un criterio que determine el orden y rango para normalizar estos cambios por humedad en las capas durante las diferentes estaciones del año.

El Ajuste de los módulos obtenidos por retrocálculo es imperativo para la implementación de los métodos de diseño de rehabilitación presentados en la guía de diseño de pavimentos mecanística - empírica (MEPDG) AASHTO 2008, así como en el tradicional método AASHTO 1993 o el método del Elmod que basa sus algoritmos en el proceso propuesto por el Instituto del Asfalto, radio de curvatura y el ajuste del cuenco de deflexiones. (Suárez, 2013)

En la práctica tradicional, el problema de retrocálculo de módulos se reduce a un principio básico de acción (carga aplicada) – reacción (respuesta de deflexiones del pavimento), ambos relacionados mediante alguna ley o modelo convencional de respuesta del pavimento.

Una vez obtenidos los datos de la deflexión, éstos se procesan por medio de una técnica analítica conocida como retrocálculo para definir el módulo elástico equivalente de capas de pavimento que corresponde a una carga aplicada y a unas deflexiones inducidas. El análisis se puede desarrollar a partir de métodos iterativos, búsqueda en bases de datos, ecuaciones simultáneas, etc.; en este apartado se aplica análisis por métodos iterativos (ver ecuación 2).

ECUACIÓN 2 VARIABLES EN LAS DEFLEXIONES

Deflexiones = f (carga, espesores, materiales, módulos)

Se asume la hipótesis de que existe una combinación de módulos de capa que generan unas respuestas de deflexión teóricas muy aproximadas a las medidas con deflectómetro; la complejidad de los análisis aumenta con la cantidad de capas del pavimento. Para realizar los estimativos de manera eficiente, tradicionalmente se utilizan programas de cómputo con la secuencia ilustrada en la ilustración 26, acoplados con un proceso iterativo de ensayo y error.

Este procedimiento de análisis involucra la suposición de los valores de módulo elástico para una estructura de pavimento por capas, mediante el cálculo de la deflexión en la superficie a diferentes distancias radiales del punto de aplicación de la carga. Una vez obtenidas las deflexiones calculadas, se comparan con las

deflexiones medidas; así, el proceso se repite cambiando el módulo elástico de las capas en cada iteración, hasta que la diferencia entre las deflexiones medidas y las calculadas se encuentren dentro de las tolerancias especificadas, o cuando se haya alcanzado el máximo número de iteraciones (ver ilustración 26). Alternativamente, el procedimiento de análisis puede involucrar investigaciones a bases de datos de cuencas de deflexión pre-calculadas a partir de módulos de capa y espesores conocidos, hasta que la cuenca se aproxime lo suficiente a la de deflexiones medidas.

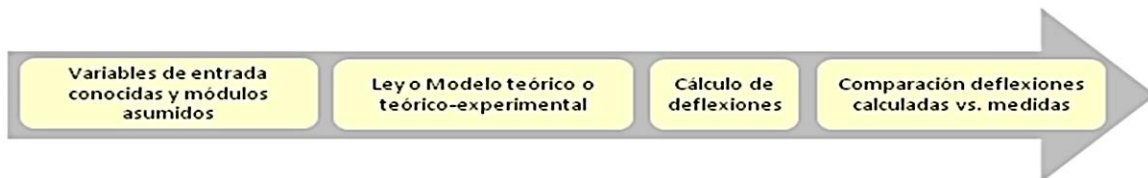


ILUSTRACIÓN 26 OBTENCIÓN DE MÓDULOS CON EL PROGRAMA ELMOD FUENTE: BELTRÁN (2012)

Es importante destacar que el módulo de capa calculado con este procedimiento es una condición específica de carga y para las condiciones ambientales en el momento de hacer las mediciones. Para que ese módulo se pueda utilizar en evaluación de pavimentos y diseño de sobrecapas, es necesario hacer ajustes por temperatura, época del año y carga de diseño.

Las consideraciones implícitas utilizadas en la solución se basan en la existencia de un arreglo representativo de módulos de capa para las condiciones particulares de carga (magnitud y área) y de temperatura, de tal manera que la cuenca de deflexiones calculada (mediante la teoría elástica multicapa cuasiestática, y suponiendo características estáticas en el equipo de pruebas no destructivas) se aproxima en gran medida a la cuenca de deflexiones medida. (Alfonso Pérez Salazar, 2004)

En este trabajo se utilizan los principios de espesor equivalente (MET) y multicapa elástica (MLET) desarrollado por Nils Odemark en 1949, el cual es un modelo simplificado que permite calcular la respuesta tensodeformacional en un sistema multicapa elástico, mediante la transformación de dicho sistema en un semiespacio homogéneo y lineal equivalente, con un módulo elástico único. La ventaja de dicha transformación es que las tensiones, deformaciones y desplazamientos en este caso se pueden obtener a partir de las ecuaciones relativamente sencillas.

El método de los espesores equivalentes de Odemark se basa en la hipótesis de que las tensiones y deformaciones que se producen bajo una capa dependen únicamente de la rigidez de dicha capa la cual es proporcional a la ecuación 3

ECUACIÓN 3 EQUIVALENCIA DE ODEMARK

$$\frac{h^3 \cdot E}{1-\nu^2}$$

Donde

- hi: el espesor de la capa i
- Ei: el módulo de la capa i
- vi: es el módulo de poisson de la capa i

De este modo, si varían el espesor h, el módulo elástico E o el coeficiente de Poisson de una capa, de tal forma que su rigidez global se mantenga constante, las tensiones y deformaciones bajo dicha capa permanecerán aproximadamente invariables (ver ecuación 4). Por ejemplo, la transformación que se muestra en la siguiente figura no tendría influencia, a efectos de cálculo de las tensiones y deformaciones en la capa 2, si se cumple que (ver ilustración 27):

ECUACIÓN 4 EQUIVALENCIA DE ODEMARK II

$$\frac{h_1^3 \cdot E_1}{1-\nu_1^2} = \frac{h_{e,1}^3 \cdot E_2}{1-\nu_2^2} \Rightarrow h_{e,1} = h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1 \cdot 1-\nu_2^2}{E_2 \cdot 1-\nu_1^2}}$$

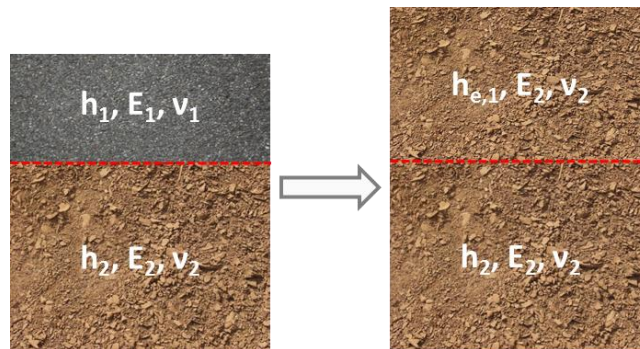


ILUSTRACIÓN 27 'ESPESOR EQUIVALENTE' DE LA CAPA 1 RESPECTO A LA CAPA 2; FUENTE: INTERNET

El sistema equivalente de la parte derecha de la figura no es más que un semiespacio infinito para el que son aplicables las ecuaciones de Boussinesq y las derivadas a partir de ellas para cargas distribuidas (ecuaciones de Foster y Ahlvin), pero únicamente para calcular tensiones, deformaciones de desplazamientos por debajo de la interfaz. (Gutiérrez, 2018)

RMS

El RMS, es una medida estadística del ajuste que se obtiene al comparar las curvas de deflexión medida en campo por medio del FWD y la deflexión calculada durante el análisis. Errores con valores cercanos a cero (0) indican que existe un muy buen ajuste entre las curvas comparadas, por lo que consecuentemente habrá una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos, sin embargo, la teoría y la experiencia indican que es relativamente difícil conseguir un RMS igual a cero, por lo cual un valor menor o igual a 5% indica que los resultados son satisfactorios". (Corrales, 2015)

El valor de la media cuadrática o RMS que se muestra en la ecuación 5, se emplea para calcular las diferencias entre las deflexiones medidas y calculadas, con el cual se puede medir la confiabilidad de los resultados obtenidos. Un valor de RMS deseable es menor del 5% sin embargo, es sumamente importante el criterio para definir los límites de aceptación.

ECUACIÓN 5 CALCULO DE RMS (%)

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

Donde:

d_{ci} deflexión calculada a la distancia del geófono i

d_{mi} deflexión medida a con el geófono i

n número de geófonos

n_d número de total de geófonos

En realidad, lo anterior depende de la tolerancia que se permita en el procedimiento y en la relación entre el número de capas evaluadas y el número de geófonos que estén activos durante la medición de deflexión; varias combinaciones de módulo pueden causar que las dos cuencas se ajusten (o estén dentro de tolerancia) en forma razonable. Es necesario aplicar juicios ingenieriles para evaluar estas alternativas de solución, y seleccionar la combinación más aplicable o eliminar soluciones irracionales, o ambas (ver ilustración 28).

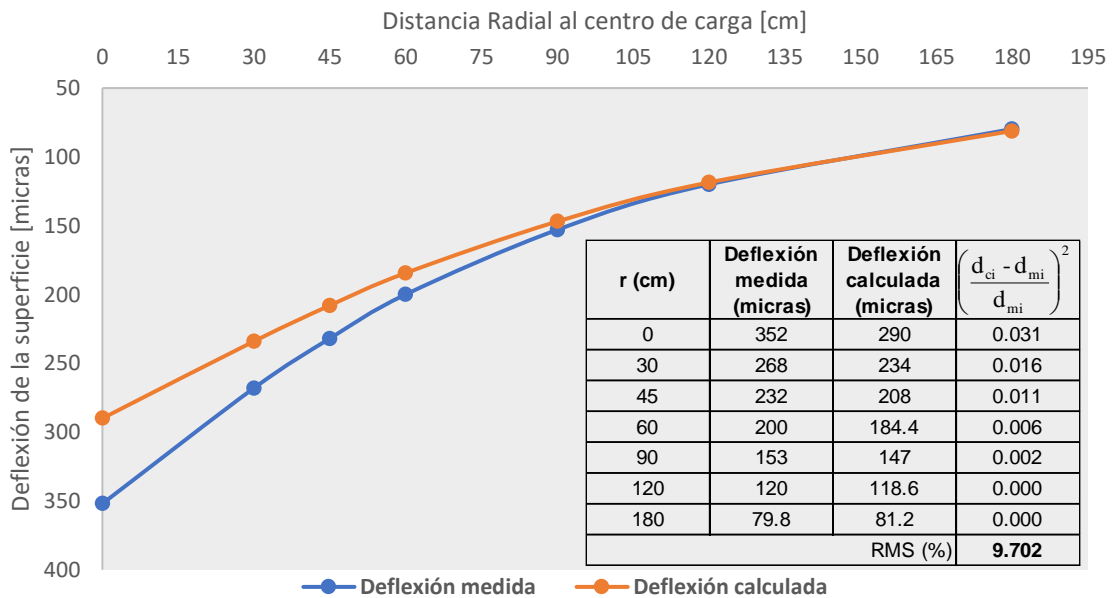


ILUSTRACIÓN 28 EJEMPLO DE DEFLEXIONES MEDIDAS Y CALCULADAS; FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

MÓDULO SUPERFICIAL

El módulo superficial obtenido de la respuesta de un pavimento a la aplicación de una carga representa la rigidez equivalente o la rigidez aparente del pavimento. Se puede utilizar para evaluar la calidad de los datos obtenidos de deflexiones del pavimento al momento de realizar las mediciones o bien denotar una idea de la complejidad de la estructura como la que se está trabajando. “al graficar los módulos superficiales contra la ubicación de los geófonos se puede obtener información muy importante para realizar la modelación de la estructura”. (Molenaar, 2009)

Realizar este análisis permite obtener mucha información sobre las características del pavimento analizado, principalmente identificar la no linealidad de la subrasante de la estructura del pavimento y ayuda a detectar capas rígidas a poca profundidad siendo esto último muy importante al momento de realizar el retrocálculo.

En la ilustración 29, se observa la variación de los módulos superficiales a partir de las deflexiones por geófono. En esta imagen existen dos curvas: una en azul que representa los módulos superficiales calculados a partir de las deflexiones medidas y otra en rojo que representa los módulos superficiales calculados a partir de las deflexiones calculadas, las cuales son calculadas a partir de los módulos propuestos en el retrocálculo. Al igual que la ilustración 28 esta se puede utilizar para determinar si el ajuste de los módulos retrocalculados es bueno, haciendo el

retrocálculo se busca minimizar las diferencias en las series y tratar de hacerlas coincidir.

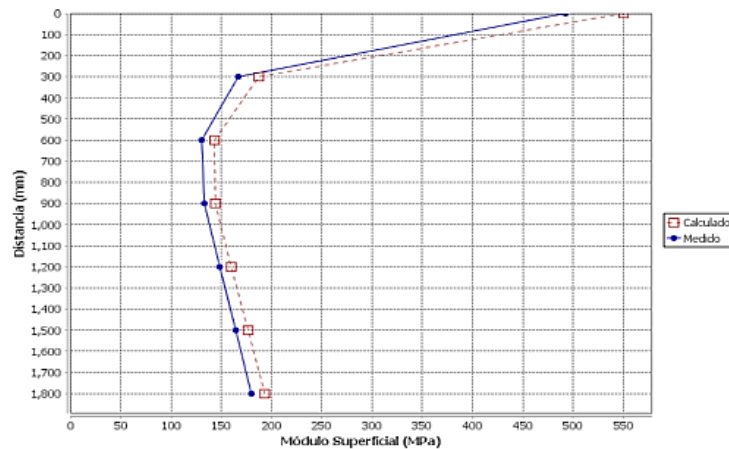


ILUSTRACIÓN 29 EJEMPLO DE MÓDULO SUPERFICIAL DE DEFLEXIONES MEDIDAS Y CALCULADAS; FUENTE: TESIS “HERRAMIENTA DE CÁLCULO PARA RETROCÁLCULO DE MÓDULOS Y DISEÑO DE SOBRECAPAS ASFÁLTICAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES”

Para calcular el módulo superficial bajo el punto de aplicación de la carga se utiliza la ecuación 6 y para calcular el módulo superficial en posiciones diferentes al punto de aplicación se puede utilizar la ecuación 7.

ECUACIÓN 6 CALCULO DE MODULO SUPERFICIAL EN EL PUNTO DE APLICACIÓN DE CARGA

$$E_0 = \frac{2P(1 - \mu^2)}{\pi a d_0}$$

Donde:

E_0 = Módulo superficial bajo la carga.

P = Carga aplicada.

μ = Razón de Poisson.

a = Radio del plato de carga.

d_0 = Deflexión bajo la carga.

ECUACIÓN 7 CALCULO DE MODULO SUPERFICIAL EN PUNTOS DIFERENTES AL DE APLICACIÓN DE CARGA

$$E_r = \frac{P(1 - \mu^2)}{\pi r d_r}$$

Donde:

E_r = Módulo superficial a distancia r de la carga.

P = Carga aplicada.

μ = Razón de Poisson.

r = distancia r al geófono.

dr = Deflexión a distancia r.

En la ilustración 30, se pueden apreciar cinco ejemplos de situaciones de módulos superficiales para diferentes estructuras. Para todos los casos se aplicó una carga de 40kN con un plato de carga de 150mm.

En la ilustración 31, se muestra la curva Ex1, esta representa una estructura de una sola capa (en otras palabras, la subrasante), como se puede ver de la ilustración 31, se presenta una discontinuidad en el segundo geófono, lo cual se puede deber a un vacío en la subrasante; además, aparenta tener un comportamiento lineal después de la discontinuidad (Dynatest, 2012)

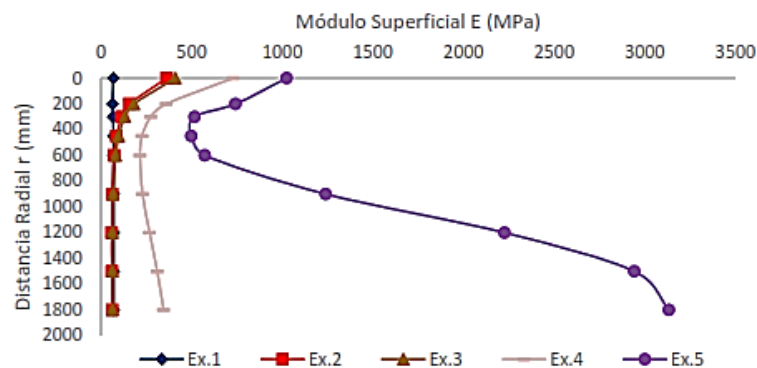


ILUSTRACIÓN 30 EJEMPLOS DE GRÁFICOS DE MÓDULO SUPERFICIAL; FUENTE: (BAZI, 2012).

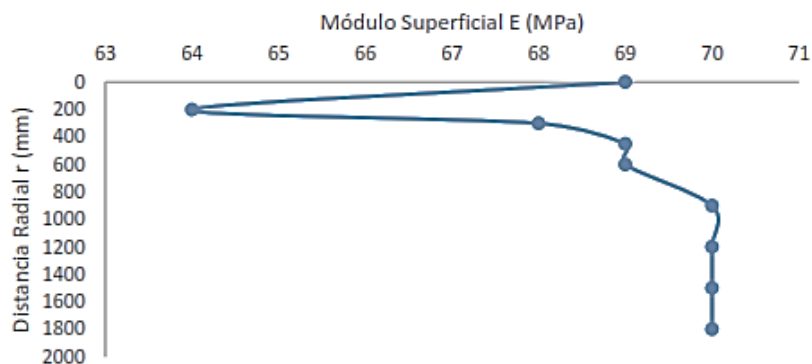


ILUSTRACIÓN 31 EJEMPLO EX.1 MÓDULO SUPERFICIAL; FUENTE: (BAZI, 2012)

La curva Ex2 de la ilustración 30 representa una estructura de dos capas, en la ilustración 32, se puede ver el caso específico el cual tiene un comportamiento lineal, la curva Ex3 de la ilustración 30 representa una estructura de cuatro capas, en la ilustración 33 se puede ver que también presenta un comportamiento lineal al

igual que Ex.2, como se puede observar de la ilustración 32 e ilustración 33 tienen una forma similar. (Bazi, 2012)

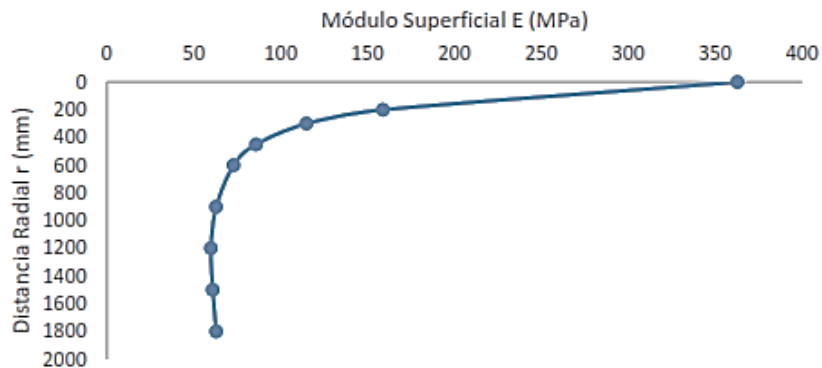


ILUSTRACIÓN 32 EJEMPLO EX.2 MÓDULO SUPERFICIAL FUENTE: (BAZI, 2012)

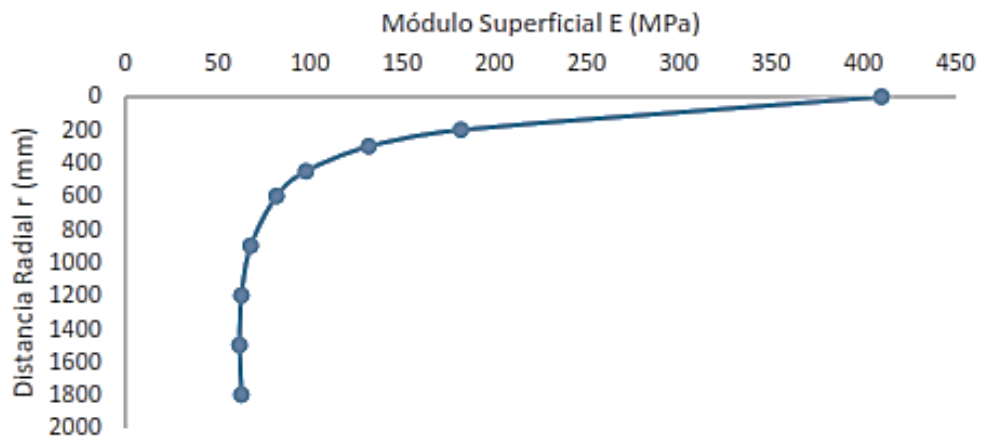


ILUSTRACIÓN 33 EJEMPLO EX.3 MÓDULO SUPERFICIAL FUENTE: (BAZI, 2012).

La curva Ex4 de la ilustración 30, representa una estructura de dos capas con una subrasante no lineal. De la ilustración 34, se puede apreciar como los módulos aumentan al alejarse del punto de aplicación de la carga, esto según Bazi es señal de la presencia de una subrasante no lineal. Este aumento en los módulos en los geófonos más exteriores también podría ser señal de una capa rígida (Bazi, 2012).

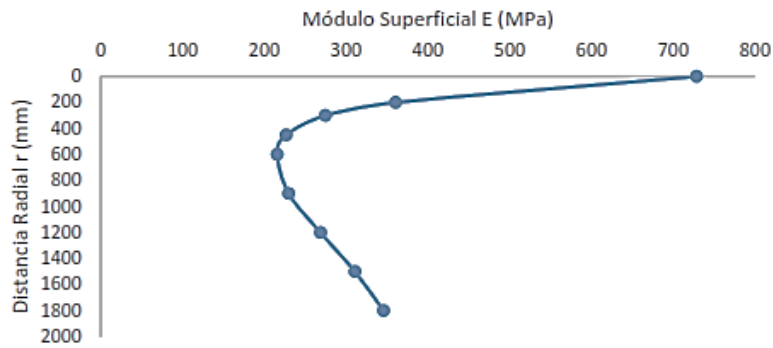


ILUSTRACIÓN 34 EJEMPLO EX.4 MÓDULO SUPERFICIAL FUENTE: (BAZI, 2012)

La curva Ex5 de la ilustración 30, representa una estructura de tres capas sobre una capa rígida. En la ilustración 35, se puede apreciar los módulos aumentan al igual que Ex.4; pero, con una magnitud muy superior.

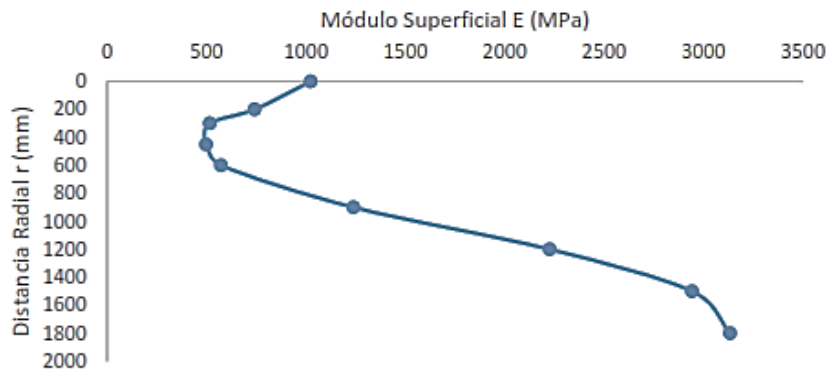


ILUSTRACIÓN 35 EJEMPLO EX.5 MÓDULO SUPERFICIAL FUENTE: (BAZI, 2012).

Es importante resumir que de acuerdo a Bazi, los gráficos de módulo superficial, proveen de manera visual información sobre las características del pavimento, pueden mostrar la dificultad de los datos a evaluar, si la subrasante tiene un comportamiento no lineal, si hay una capa rígida, o si hay vacíos en la estructura. (Bazi, 2012)

RETROCÁLCULO CON ELMOD

A continuación se describe el proceso para realizar el retrocálculo con el programa Elmod, primero se realiza la importación de la base de datos de los archivos *.mdb al programa Elmod (ver ilustración 36).

Vista y edición de datos

archivo **seg 11 baja 1**
 Base de datos **D:\S11\SEGMEN TO 11 BAJA.mde**

Número de puntos con datos: **348** Número de caídas: **3** Estación de inicio: **147.799** Estación final: **189** Fecha: **sábado, 20 de febrero c** Info del archivo

Número de geofonos activos: **7** Radio del: **150.** Ver posiciones de geofonos

Distancia de los geofonos
 1: **0** 2: **300** 3: **450** 4: **600** 5: **900** 6: **1200** 7: **1800**

Metrage	Punto	Caida	Tensiyn KPa	Carga (L KN	D1 Micr.	D2 Micr.	D3 Micr.	D4 Micr.	D5 Micr.	D6 Micr.	D7 Micr.	T _{asp} °C	T _{surf} °C	T _{air} °C	tiempo	JointID	PosID
174.315	214	1	1057	74.71	417.3	238.2	192.4	154.0	113.8	87.2	59.1		36.7	35.6	10:22	0	0
		2	762	53.86	266.9	164.6	132.6	104.8	78.3	62.3	42.0						
		3	761	53.79	267.3	163.5	131.8	103.9	78.2	61.7	41.4						
174.401	215	1	1054	74.50	614.4	346.3	307.4	270.4	215.1	165.4	104.0		38.2	35.6	10:22	0	0
		2	757	53.51	318.2	245.5	217.4	189.6	150.9	116.0	73.4						
		3	759	53.65	318.6	245.8	217.2	189.5	150.5	116.2	72.8						
174.5	216	1	1045	73.87	534.8	334.3	263.2	204.4	137.8	95.6	56.9		39.3	35.6	10:21	0	0
		2	748	52.87	364.6	221.9	174.3	135.6	93.6	65.7	38.9						
		3	749	52.94	361.0	221.7	174.7	135.8	93.7	66.1	37.4						
174.601	217	1	1041	73.58	707.7	395.5	331.7	269.1	198.6	148.0	100.2		30.6	35.5	10:18	0	0
		2	746	52.73	377.0	262.1	222.9	182.3	138.2	104.7	71.9						
		3	750	53.01	378.0	263.1	224.7	183.1	139.3	105.5	72.1						
174.7	218	1	1045	73.87	475.2	329.6	257.9	208.4	140.4	99.3	56.4		36.4	35.3	10:14	0	0
		2	754	53.30	322.6	220.3	172.5	139.2	95.9	67.8	38.7						

<Alt> + click Metrage para remover el ensayo
 Botón derecho en Metrage o punto a marcar/desmarcar

Dividir archivo Gráficos de temperatura Insertar temperaturas del asfalto Guardar nuevos datos Cancelar

ILUSTRACIÓN 36 ANÁLISIS DE DATOS CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE

Inmediatamente después se procede a capturar los resultados de los espesores GPR para cada una de las secciones que se tenga disponible (ver ilustración 37).

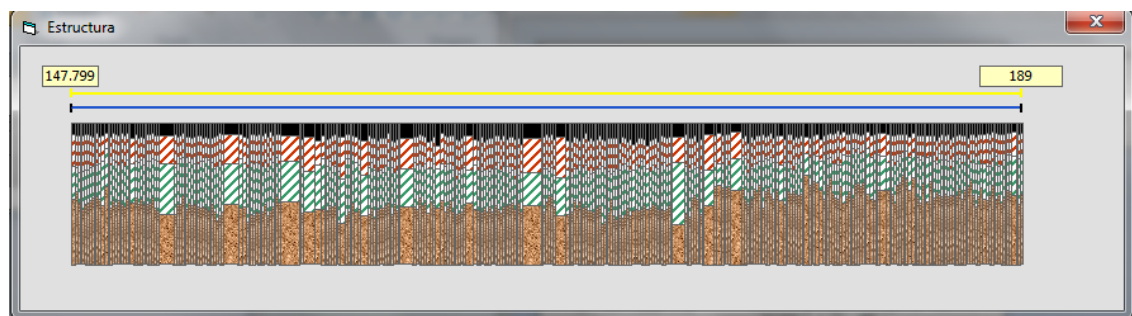


ILUSTRACIÓN 37 ANÁLISIS DE ESPESORES GPR CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE

Se procese a realizar el ajuste del cuenco de deflexiones considerando un ajuste de temperatura “Bells” el cual contempla la temperatura media de un día anterior a la fecha de mediciones, por lo que hay que consultar la estación meteorológica más cercana para determinar esta temperatura media, y realizar el ajuste por temperatura de las capas asfálticas (ver ilustración 38).

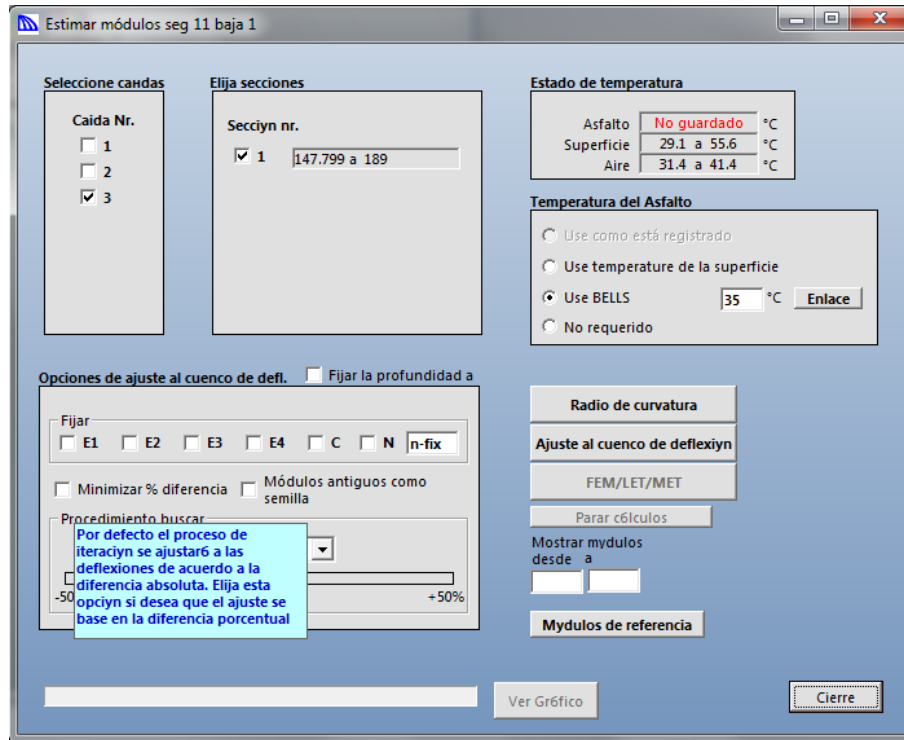


ILUSTRACIÓN 38 AJUSTE DEL CUENCO DE DEFLEXIONES CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE

Se inspeccionan las deflexiones en bruto para identificar las posibles zonas homogéneas y el cambio en la tendencia de la respuesta estructural de pavimento a lo largo del camino evaluado (ver ilustración 39), nótese que las deflexiones que se presentan abarcan del km. 147+000 al 189+000, no obstante, el tramo en estudio corresponde a los últimos 15 kilómetros, los cuales representan el estado más crítico del tramo en general.

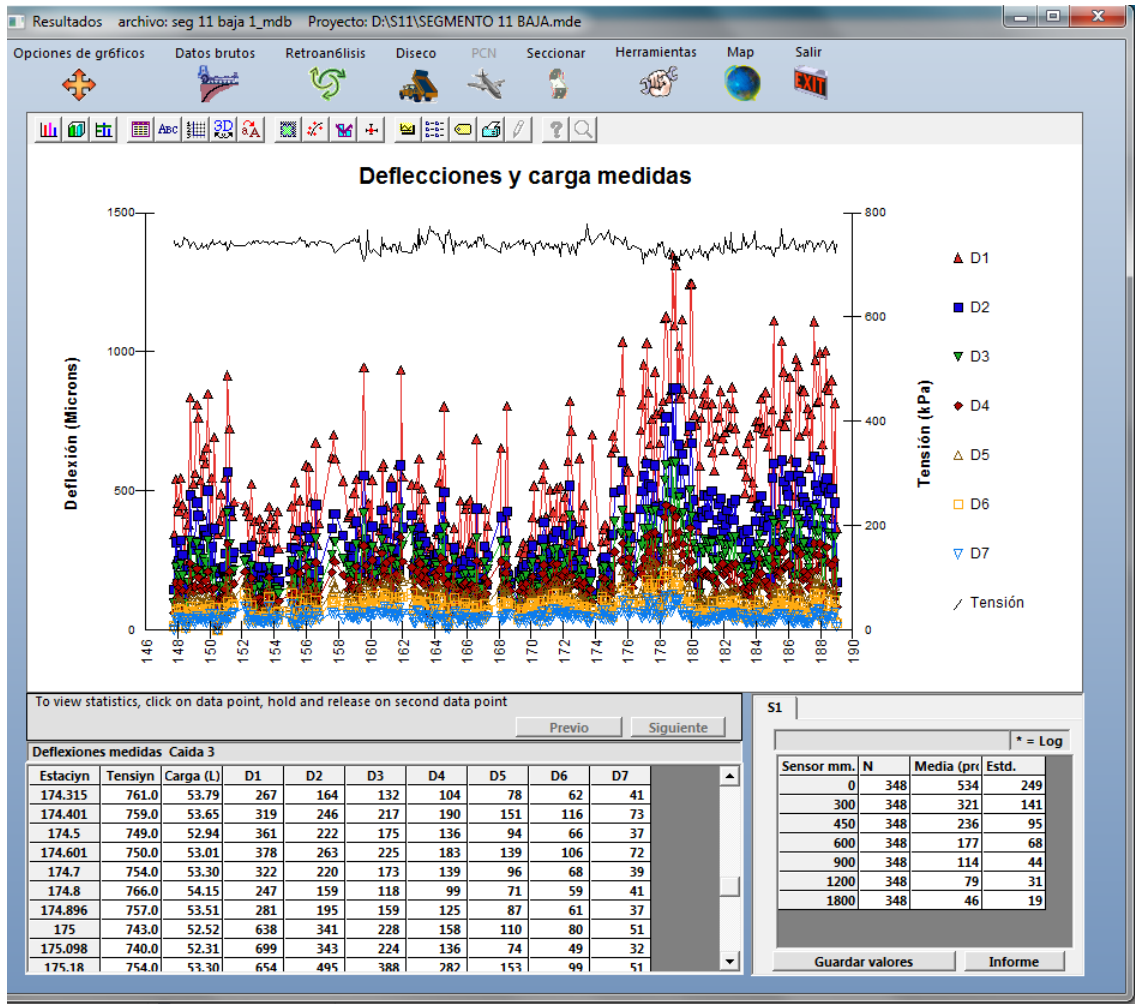


ILUSTRACIÓN 39 DISTRIBUCIÓN DE DEFLEXIONES CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE

Se realiza una inspección visual de los módulos en los gráficos que presenta el programa después del retrocálculo (ver ilustración 40)

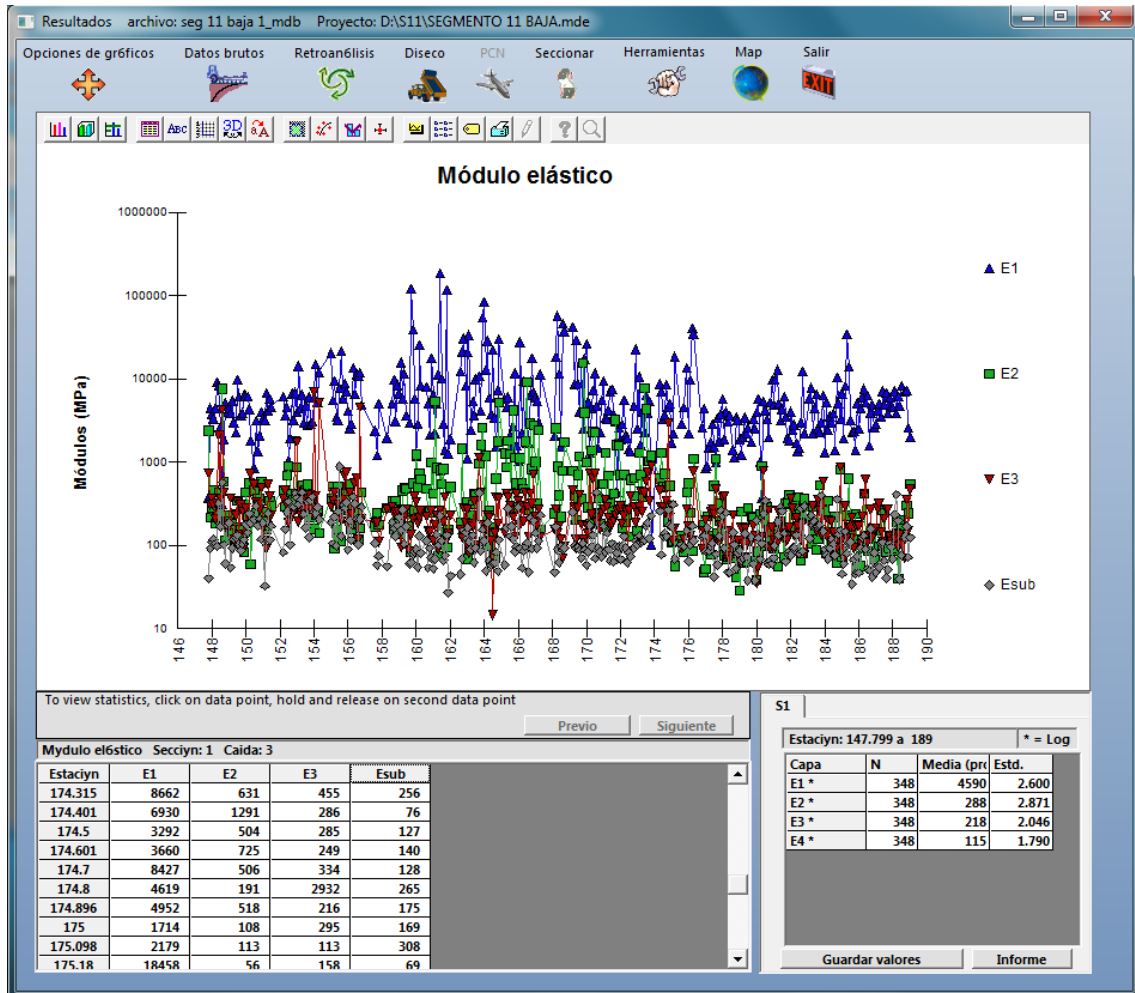


ILUSTRACIÓN 40 ANÁLISIS DE MÓDULOS CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE

Se realiza el análisis de comparación de las deflexiones calculadas con las deflexiones reales y se obtiene el RMS(%) para verificar la compatibilidad de los resultados con los datos de campo (ver ilustración 41)

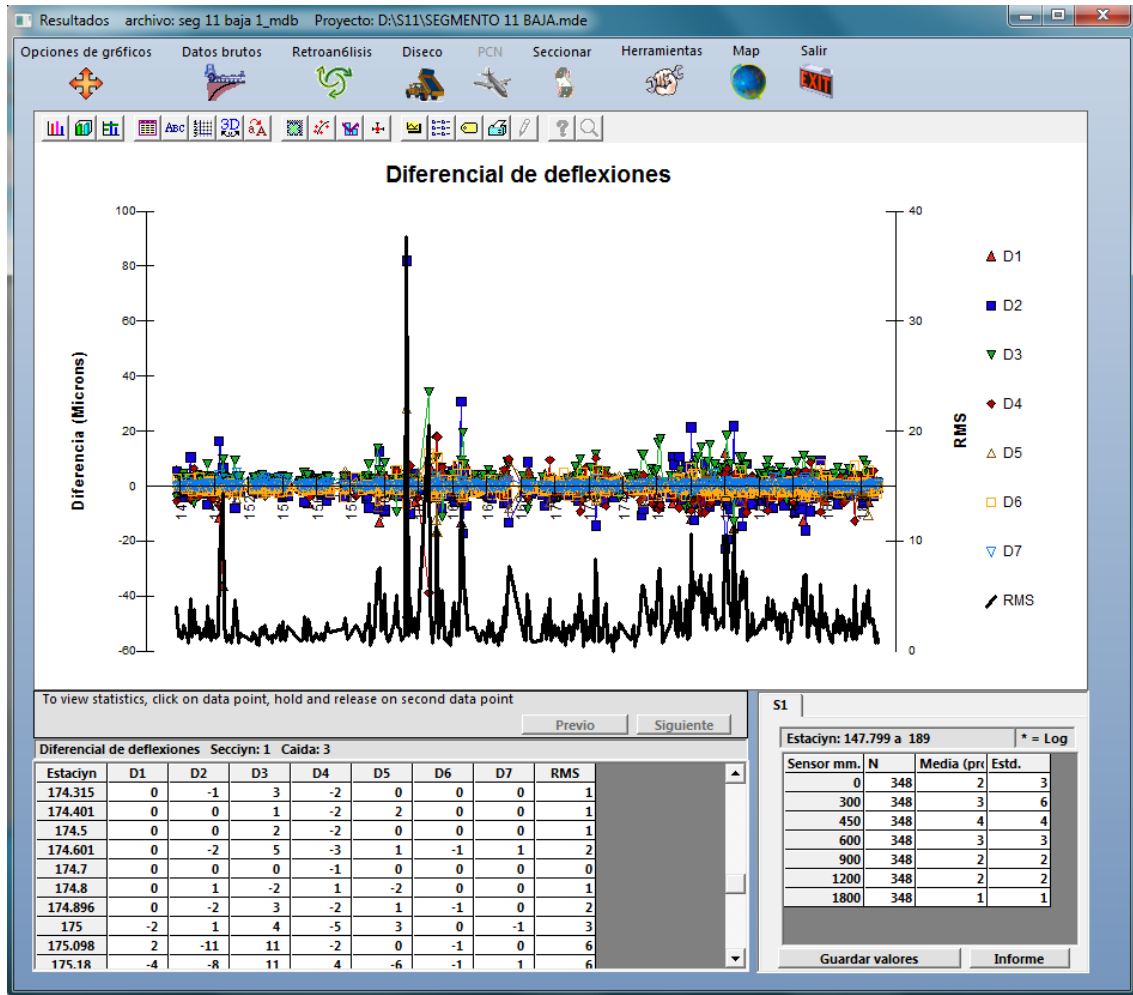


ILUSTRACIÓN 41 ANÁLISIS DE DEFLEXIONES TEÓRICAS CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE

Es importante mencionar que se utilizó el sistema elástico de las 3 capas para los dos carriles existentes (Alta y Baja). En capítulo XII se presentan los valores promedio de los módulos de elasticidad obtenidos en los tramos evaluados en este trabajo.

VII. ANÁLISIS DE VIDA REMANENTE

FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Los estados de falla utilizados con más frecuencia para el diseño de pavimentos flexibles, son el desempeño por fatiga y deformación permanente. “La fatiga puede denotarse como grietas que aparecen en la superficie debido a la compresión producto del paso de los vehículos y también como un reflejo de las grietas que aparecen en la parte inferior de la carpeta asfáltica debido a la tensión en la fibra extrema” (Trejos, 2015)

La fatiga en pavimentos flexibles se basa en los esfuerzos horizontales en la fibra inferior de la carpeta asfáltica (ver ilustración 42). Los criterios de falla se relacionan al número permisible de repeticiones de la carga de esfuerzo a tensión, que una viga de material asfáltico soportaría. La deformación permanente se visualiza principalmente como roderas o ahuellamiento. Se debe a las altas cargas a las que está sometido el pavimento y a la poca resistencia del pavimento debido a espesores insuficientes de alguna de las capas o a la baja resistencia de alguna de las capas, lo cual lleva a la falla”.(Trejos, 2015)



ILUSTRACIÓN 42 FATIGA DE UN PAVIMENTO; FUENTE: INTERNET

La deformación permanente ocurre principalmente en los pavimentos flexibles y se da por dos mecanismos: falla estructural del pavimento, que se percibe por un descenso en el nivel de la superficie (deformación/roderas), justo en la línea bajo las llantas de los vehículos, y falla del material que constituye la carpeta asfáltica, por pérdida de la resistencia al corte del material (Fatiga).

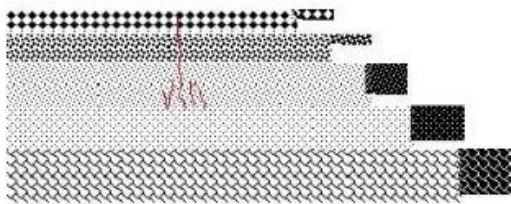
Existen dos métodos de diseño para controlar la deformación estructural permanente, el primero es asegurar que el esfuerzo vertical compresivo en la parte superior de la subrasante, cumpla con el desempeño de campo. Un buen control de la calidad de los agregados durante la construcción puede reducir la deformación permanente a un grado aceptable, incluso mayor a lo esperado. El segundo método busca limitar la deformación a un valor establecido. Este método se basa en calcular la deformación directamente basándose en correlaciones empíricas, partiendo de un principio simple, para reducir la deformación se requiere aumenta el espesor de las capas superiores. (Matamoros, 2017)

MODELO DE ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO POR FATIGA

Los esfuerzos de tensión generalmente se presentan y son disipados en la capa superior, ya sea construida por un material pétreo aglutinado con asfalto o con cemento Portland, de tal forma que el paso sucesivo de las cargas dinámicas

genera el fenómeno de fatiga en esta capa. En el diseño de la estructura del pavimento se analiza que la falla por fatiga no ocurra durante el periodo de servicio del proyecto, para lo cual se considera el uso de materiales en los que se revisa en pruebas dinámicas de laboratorio que presenta una alta resistencia a la fatiga, determinando además un espesor de la capa superior que “rigidice” y asegure la resistencia a la fatiga para la vida de servicio del pavimento.

La fatiga de la capa superior del pavimento ocasiona la aparición de pequeñas grietas que generalmente inician entre la unión de la capa superior y la capa de apoyo, como se puede observar en la ilustración 43 El paso de las cargas dinámicas de los vehículos durante un determinado tiempo, continúa favoreciendo el desarrollo de las grietas a través del espesor de la capa superior, hasta que empiezan a ser visibles en la superficie de rodadura.



- Capa asfáltica de desgaste
- Capa asfáltica intermedia
- Capa asfáltica inferior
- Base hidráulica
- Capa subrasante

ILUSTRACIÓN 43 INICIO Y DESARROLLO DE LAS GRIETAS OCASIONADAS POR FATIGA; FUENTE: INTERNET

El agrietamiento por fatiga de la capa superior, puede continuar evolucionando, observándose inicialmente un agrietamiento reticular en la superficie, sobre todo en las zonas de pavimento por donde se canaliza el tráfico, siendo crítico cuando ya se observa un agrietamiento en forma de “panal” o de “piel de cocodrilo” (ver ilustración 44), porque en esa condición el pavimento ya requiere la sustitución de la capa superior o la reutilización de materiales para construir una nueva capa. De no tomar medidas oportunas para atender este tipo de falla, lo más probable es que el pavimento en corto tiempo sufra una desintegración paulatina de la capa de rodadura que la vuelva intransitable o con un nivel de servicio muy bajo. (DGST, Dirección General de Servicios Tecnicos, 2014)



ILUSTRACIÓN 44 AGRIETAMIENTO EN FORMA DE “PANAL” O DE “PIEL DE COCODRILO”; FUENTE: INTERNET

En la siguiente tabla se presentan las leyes de fatiga más utilizadas en los pavimentos por diferentes organismos en desarrollo (ver tabla 3).

TABLA 3 LEYES DE FATIGA PARA LA DEFORMACIÓN RADIAL ADMISIBLE EN LA BASE DE LA CARPETA ASFÁLTICA. (HIGUERA, 2007)

Instituto de Asfalto(1981)	$N = 0.0796 * \epsilon^{-3.291} * E^{-0.854}$ (Asphalt, 1981)	Ley de fatiga para cualquier tipo de mezcla Bituminosa
Model shell	$\epsilon_r = (0.856 V_b + 1.08)(10^6 E)^{-0.36} \left(\frac{N}{K}\right)^{-0.2}$ (Shell, 1978)	V_b = % contenido de betun s_{mix} = módulo de la mezcla en Pa
US Army Corps of Engineers	$N = 497.156 * \epsilon^{-5} * E^{-2.66}$ (Khana et al., 2013)	Ley de fatiga desarrollada por US Army Corps of Engineers
Belgian Road Research Center	$N = 4.92 * 10^{-14} * \epsilon^{-4.76} E$ (Verstraeten et al., 1982)	Desarrollada en el centro de Investigación de caminos Bélgica en el año 1982
UC-Berkeley	$N = 0.0636 * \epsilon^{-3.291} * E^{-0.854}$ (Craus et al., 1984).	Ley de fatiga determinada en la universidad UC-Berkeley de California en 1984.
Transport and Road Research Laboratory	$N = 1.66 * 10^{-10} * \epsilon^{-4.32}$ (Powell et al, 1984)	Desarrollada en el centro de investigación de transporte y carreteras en 1984 (USA).
Illinois- Department of Transportation	$N = 5 * 10^{-6} * \epsilon^{-3}$ (Thompson, 1987)	Ley de fatiga determinada en el estado de Illinois en 1987 (USA).
U.S. Army model	$N = 478.63 * \epsilon^{-5} * E^{-2.66}$ (Defence, 1988)	Desarrollada por un modelo del ejercito de los EE.UU en 1998.
Minnesota 1998	$N = 2.83 * 10^{-6} * \epsilon^{-3.21}$ (Timm et al., 1998)	Ley de fatiga determinada en el estado de Minnesota 1998 (USA).
Indian model	$N = 0.1001 * \epsilon^{-3.565} * E^{-1.4747}$ (Das y Pandey, 1999)	Frecuencia del ensayo 10Hz, Temperaturas entre (20-30)°C, Instituto tecnológico India, Carga de prueba entre (80-800)N (India)

Donde

E (psi): Módulo de elasticidad de la mezcla de concreto asfáltico.

ϵ : Deformación radial admisible en la base de la carpeta asfáltica.

N: Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes acumulados de 8.2 Toneladas en carril de diseño.

MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

“La curva de deformación permanente a lo largo de la vida útil del pavimento para cualquiera de las capas que componen la carpeta asfáltica muestra tres etapas: una etapa primaria de crecimiento acelerado de la deformación, la secundaria en que se da un crecimiento lineal y una etapa terciaria luego del punto de flujo, difícil de predecir, por lo cual se supone que mantendrá el mismo comportamiento mostrado en la etapa secundaria de acumulación de deformación permanente” (Trejos, 2015)

No importa el tipo de material considerado, de manera general existen estas tres etapas del comportamiento de la deformación permanente, para los materiales que conforman la estructura del pavimento bajo cargas específicas, en la ilustración 45 se puede observar la curva teórica de deformación (ver tabla 4 y tabla 5).

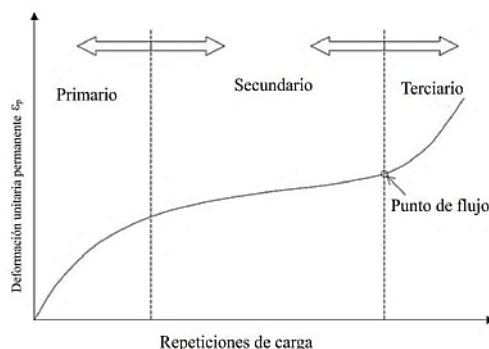


ILUSTRACIÓN 45 CURVA TEÓRICA DE DEFORMACIÓN PERMANENTE A LO LARGO DE LA VIDA ÚTIL FUENTE: (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004)

TABLA 4 LEYES DE FATIGA DISPONIBLES PARA USO EN EL CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN VERTICAL ADMISIBLE EN LA SUBRASANTE (HIGUERA, 2007).

Universidad de Nottingham	$\epsilon_z = 2.16 * 10^{-2} N^{-0.28}$	Citada en (Reyes, 2003)
LCPC	$\epsilon_z = 2.1 * 10^{-2} N^{-0.24}$	Ley de fatiga para subrasante en calzadas nuevas, (LCPC- Setra, 1997)
Centro investigación de Bélgica	$\epsilon_z = 1.1 * 10^{-2} N^{-0.23}$	(Verstraeten et al., 1982)
Chevron	$\epsilon_z = 1.05 * 10^{-2} N^{-0.223}$	Citada en (Higuera, 2007)
Dormon y Mercalf	$\epsilon_z = 1.16 * 10^{-2} N^{-0.21}$	Citada en (Hidalgo, 2007)
TRRL	$\epsilon_z = 1.49 * 10^{-2} N^{-0.253}$	Ley de deformación vertical para una confiabilidad del 85%: Citada en (Higuera, 2007)
Shell	$\epsilon_z = 2.8 * 10^{-2} N^{-0.25}$	Ley de deformación vertical para una confiabilidad del 50% (Shell, 1978)
Shell	$\epsilon_z = 2.13 * 10^{-2} N^{-0.253}$	Ley de deformación vertical para una confiabilidad del 85% (Shell, 1978)
Shell	$\epsilon_z = 1.79 * 10^{-2} N^{-0.253}$	Ley de deformación vertical para una confiabilidad del 95% (Shell, 1978)
INGLESA	$\epsilon_z = 0.56 * 10^{-2} N^{-0.24}$	Citada en (Higuera, 2007)
Instituto de Asfalto	$N = 1.36 * 10^{-9} * \epsilon_z^{-4.477}$	(Asphalt, 1981)

Donde:

N: Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes acumulados de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

TABLA 5 LEYES DE FATIGA DISPONIBLES PARA CALCULAR LA DEFLEXIÓN ADMISIBLE DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO (HIGUERA, 2007)

Autor	Ley de fatiga (mm)
Criterio del instituto de Asfalto	$\Delta_z adm = 25.64 N^{-0.2383}$ (Asphalt Institute, 1969)
Criterio Checoslovaco	$\Delta_z adm = 8.035 N^{-0.16}$
Criterio de Yang H. Huang	$\Delta_z adm = 26.3 N^{-0.2438}$
Criterio de la RTAC de Canadá	$\Delta_z adm = 65.024 N^{-0.3}$ (Transportation Association of Canada, 1997)
Criterio de Ivanow	$\Delta_z adm = 5.248 N^{-0.12}$
Criterio de Ruiz	$\Delta_z adm = 24.76 N^{-0.2523}$
Criterio de la AASHTO Road Test (Pt=2.5)	$\Delta_z adm = 63.735 N^{-0.2383}$
Criterio de la CGRA de Canadá	$\Delta_z adm = 52.275 N^{-0.237}$
Criterio Belga	$\Delta_z adm = 242 N^{-0.334}$

Y por último se calcula el espesor de refuerzo requerido para un horizonte de proyecto dado, este cálculo se determina considerando el tránsito en ejes equivalentes por año (ver ilustración 46).

The screenshot shows the 'Diseño de recapeo' software interface. The window title is 'Diseño de recapeo seg 11 baja 1_mdb'. The interface is divided into several sections:

- Basar diseo en:** Radio buttons for 'Pavimento existente' (selected), 'Capas no ligadas existentes', and 'Subrasante existente'.
- Seleccine Parómetros:** A dropdown menu showing 'YUTAVE 5 ANIOS'.
- Agregar nuevas capas:** A table with columns 'Espesor', 'Material (M)', and 'Modulo'. The last row is filled with 'CARPETA ASFALTICA' and '3100'.
- Fresado de la capa 1:** A text input field with 'mm'.
- Table of Layers:**

No	Secciyñ	Caida	Elegido	desde	a	método	Capas	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5
1	1	3	OK	147.799	189	Basin	4	CARPETA ASFAL'	BASE HIDRAULIK	SUB BASE HIDR/	TERRAPLEN	
- Tráfico:**
 - Input field for 'Pasadas totales por aco'.
 - Text: 'Distribuciyñ porcentual por tipos. Total = 100.0 %'.
 - Buttons: 'Resetear', 'Predecir', 'TMDA a EE', 'WIM a EE', 'Importar tráfico'.
 - Text: '100.00 ESAL'.
- Bottom:** Buttons for 'Ver Gráfico', 'Cancelar', and 'Comenzar diseo'.

ILUSTRACIÓN 46 REVISIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE

Con ello se determina la condición actual del pavimento para las condiciones de tránsito que se está proponiendo como tránsito de diseño, por lo que es de esperar que haya puntos, tramos o secciones donde el deterioro del pavimento es tal que aun pudiera resistir las solicitaciones que se esperan en el nuevo periodo de diseño, así mismo se puede determinar la vida remanente del tramo y las capas críticas puesto que se revisa por deformación y por fatiga las capas que componen la estructura del pavimento (ver ilustración 47 e ilustración 48).

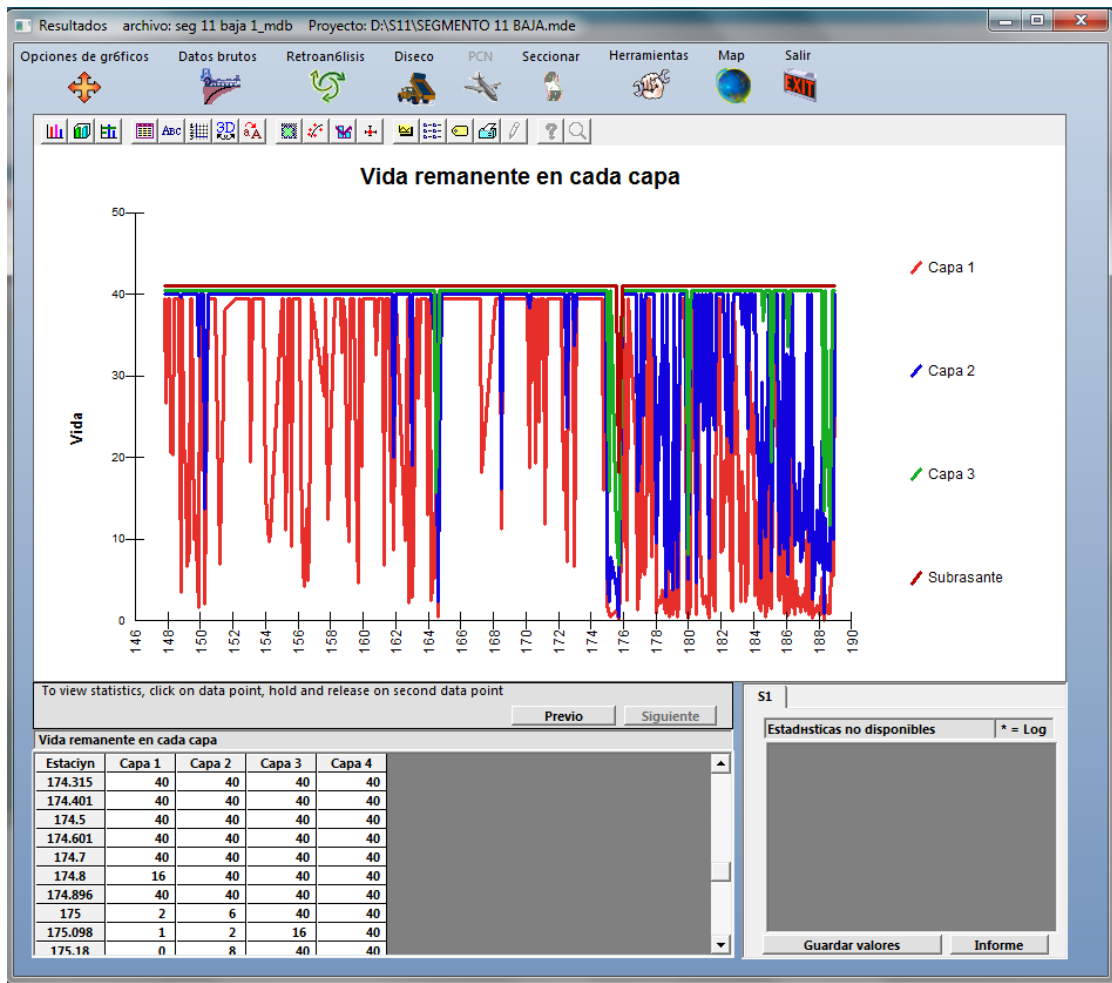


ILUSTRACIÓN 47 ANÁLISIS DE VIDA REMANENTE CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE

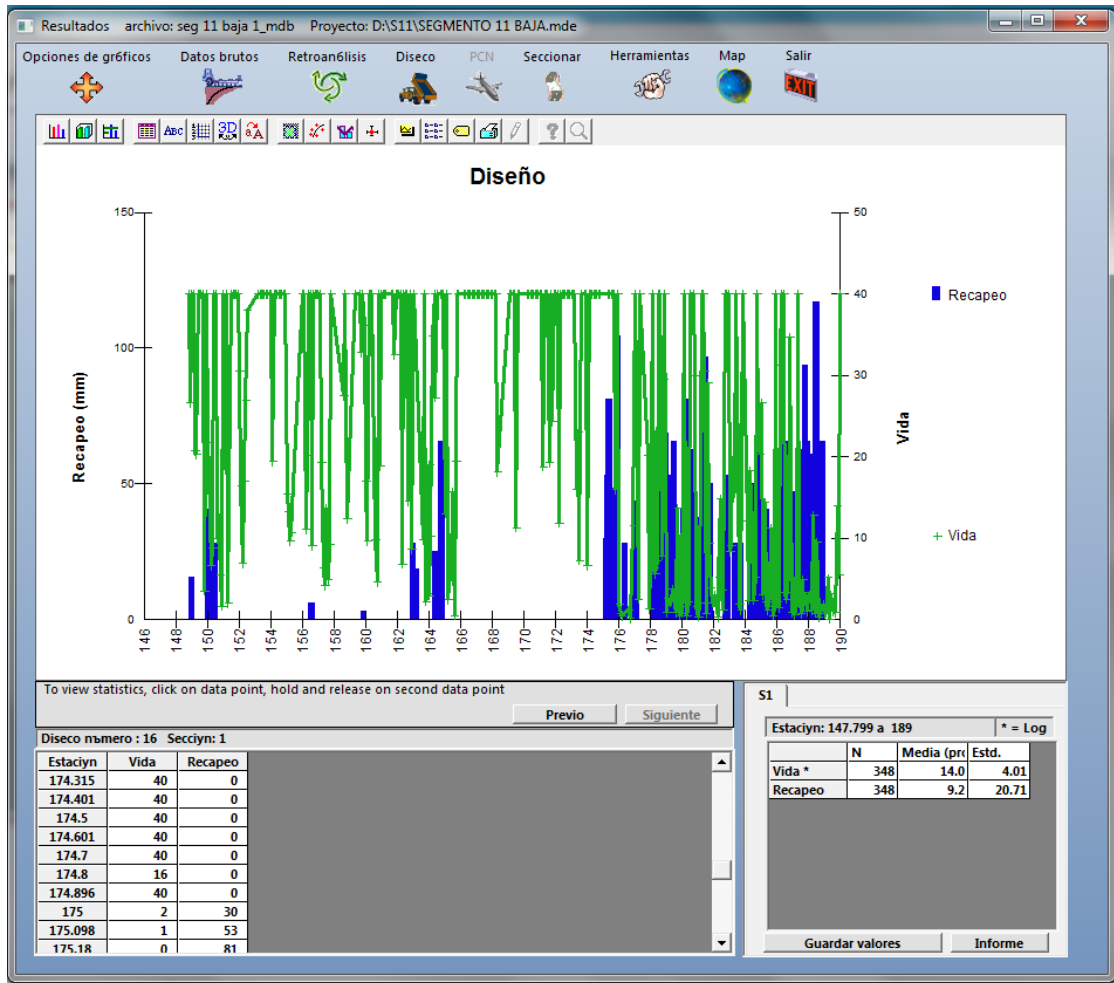


ILUSTRACIÓN 48 ANÁLISIS DE VIDA REMANENTE CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE

VIII. DESCRIPCIÓN DE LOS TRAMOS

LOCALIZACIÓN

El tramo evaluado se encuentra en el estado de Chiapas forma parte de la carretera MEX 200, comunicando la Ciudad de Arriaga (Chiapas) con la Ciudad de Tapachula (Chiapas), cruza por los municipios de Tonalá, Pijijiapan, Mapastepec, Huixtla y Tapachula (ver ilustración 49). Esta ruta es parte de la vía que comunica las ciudades mexicanas de Tapachula y Tepic a lo largo de la costa mexicana del Pacífico por lo cual es un eje importante de comunicaciones en la zona ya que cruza por el estado de Chiapas y 6 estados más de la costa, además es libre de peaje, por ello se considera una ruta mexicana de principal relevancia.

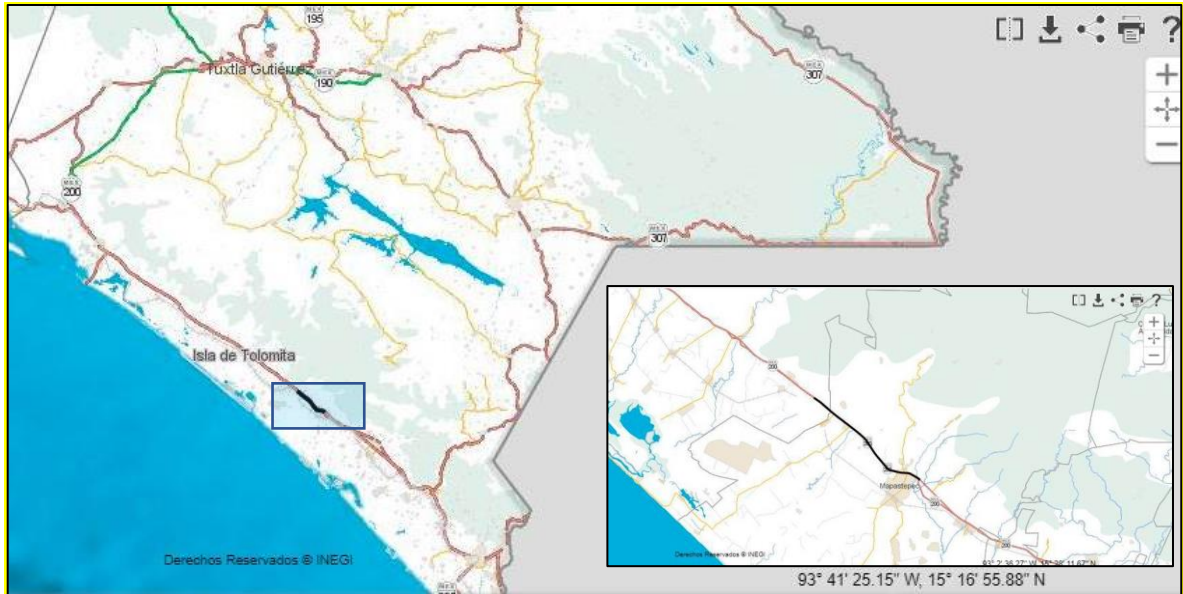


ILUSTRACIÓN 49 UBICACIÓN DE LA CARRETERA ARRIAGA – TAPACHULA; FUENTE: INEGI

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS TRAMOS

El tramo en estudio pertenece a la carretera Arriaga - Tapachula en el tramo de Pijijiapan - Mapastepec (cpo. B) del km 174+000 al km 189+000 y presenta las siguientes características: la estructura del camino es de pavimento asfáltico con capas granulares. Este subtramo está formado, en casi toda su longitud, por terraplenes de baja altura, tangentes pronunciadas y algunos cortes en las zonas de lomeríos, cabe aclarar que, este segmento cuenta con dos carriles (Alta y Baja velocidad) (ver ilustración 50).



ILUSTRACIÓN 50 OROGRAFÍA DE LA CARRETERA ARRIAGA – TAPACHULA; FUENTE: INEGI

TOPOGRAFÍA DE LOS TRAMOS

El tramo presenta topografía muy variadas que van desde terrenos planos a lomeríos ya que se localiza en la zona de transición entre la costa del pacífico con la sierra madre de Chiapas (ver ilustración 51), en la figura se puede observar el tramo objeto de estudio en planta y el perfil de este, se observa que las pendientes varían del 7.6 al -12.6% del km. 174+000 al km. 189+000, se trata de un camino sinuoso pasando por lomeríos y algunas curvas importantes (ver ilustración 52).

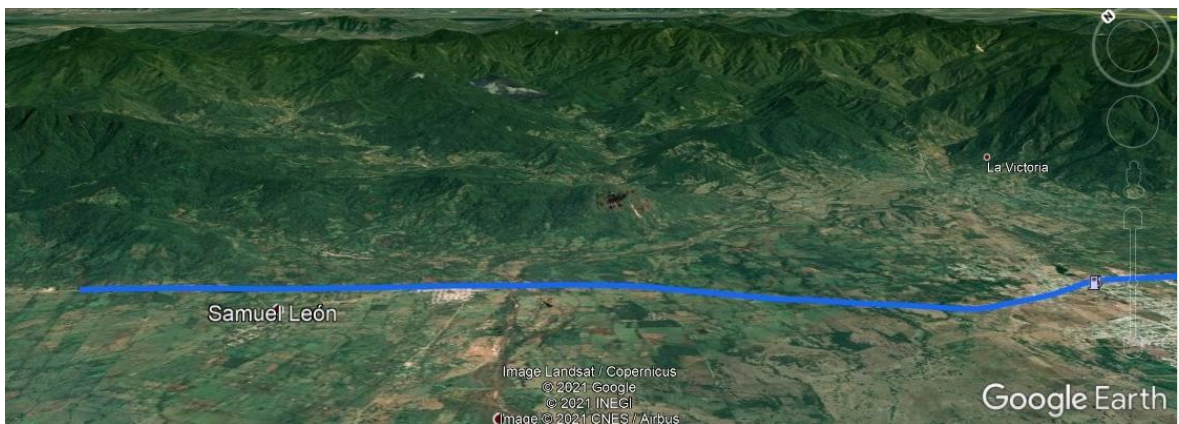


ILUSTRACIÓN 51 VISTA EN PLANTA DE LA CARRETERA ARRIAGA – TAPACHULA; FUENTE: GOOGLE EARTH



ILUSTRACIÓN 52 ELEVACIONES DE LA CARRETERA ARRIAGA – TAPACHULA; FUENTE: GOOGLE EARTH

UNIDADES CLIMÁTICAS

El 100% de la carretera presenta clima cálido subhúmedo (ver ilustración 53), la temperatura media anual de la carretera se encuentra paralela a la isólinea de 28°C (ver ilustración 54), la precipitación media es de 2500 a 3000 mm anuales variando a lo largo de todo el tramo con mayor precipitación en el lado sureste de la carretera (ver ilustración 55), la permanencia de humedad del suelo varia de forma alternada dependiendo la orografía del lugar con periodos de entre 6 y 7 meses (ver ilustración 56).



ILUSTRACIÓN 53 CLIMA DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI

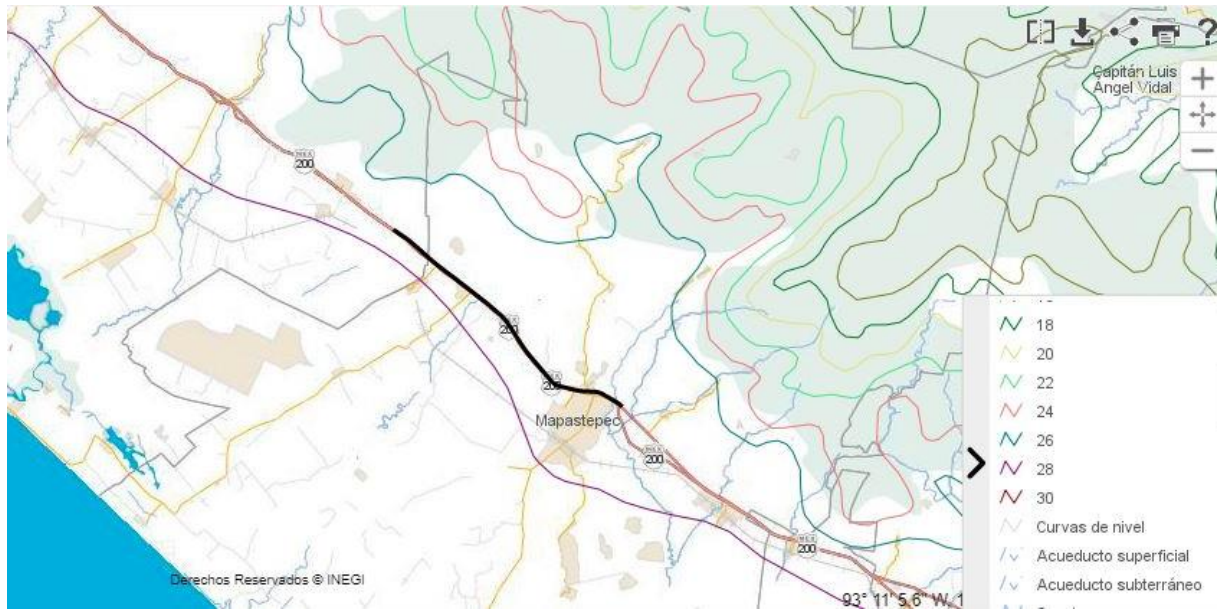


ILUSTRACIÓN 54 TEMPERATURA DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI

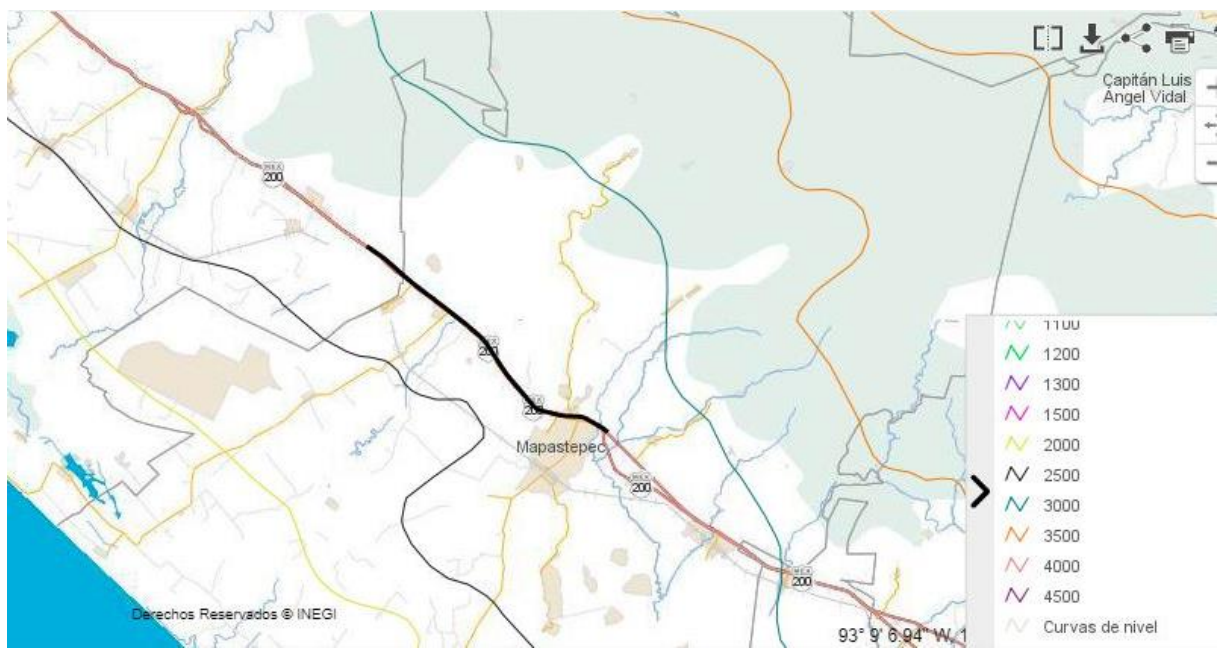


ILUSTRACIÓN 55 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI

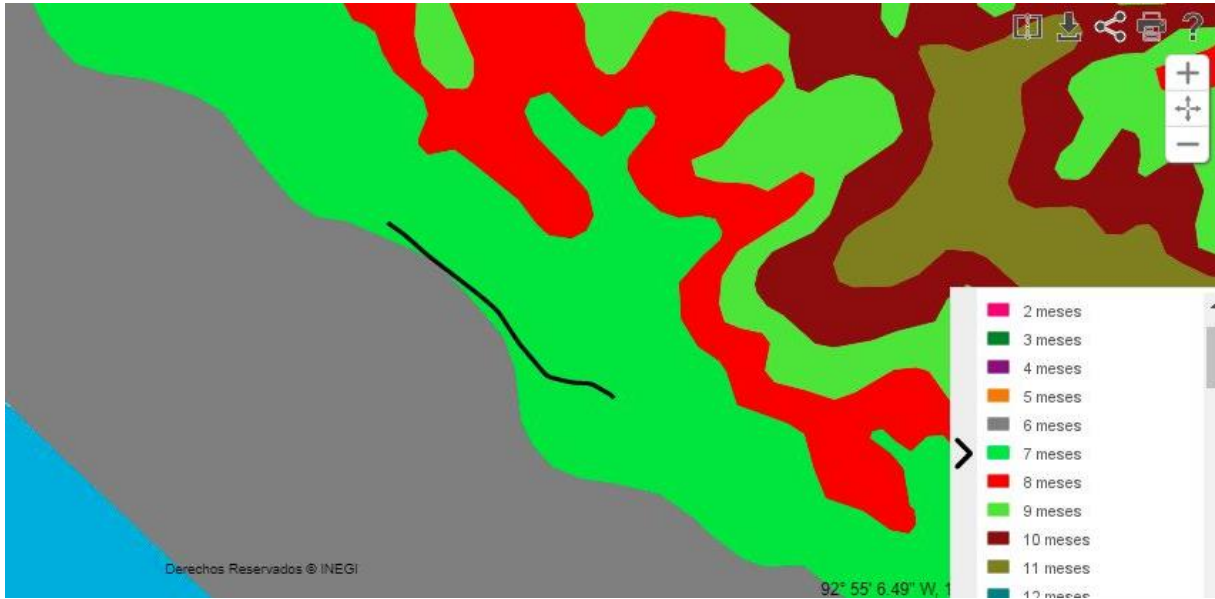


ILUSTRACIÓN 56 HUMEDAD DEL SUELO DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI

AGUAS SUPERFICIALES

El tramo se encuentra situado en las cuencas hidrológicas de la costa de Chiapas (ver ilustración 57), mayormente en la cuenca de R Novillero, el coeficiente de escurrimiento del tramo se presenta entre el 10 y 30% (ver ilustración 58).

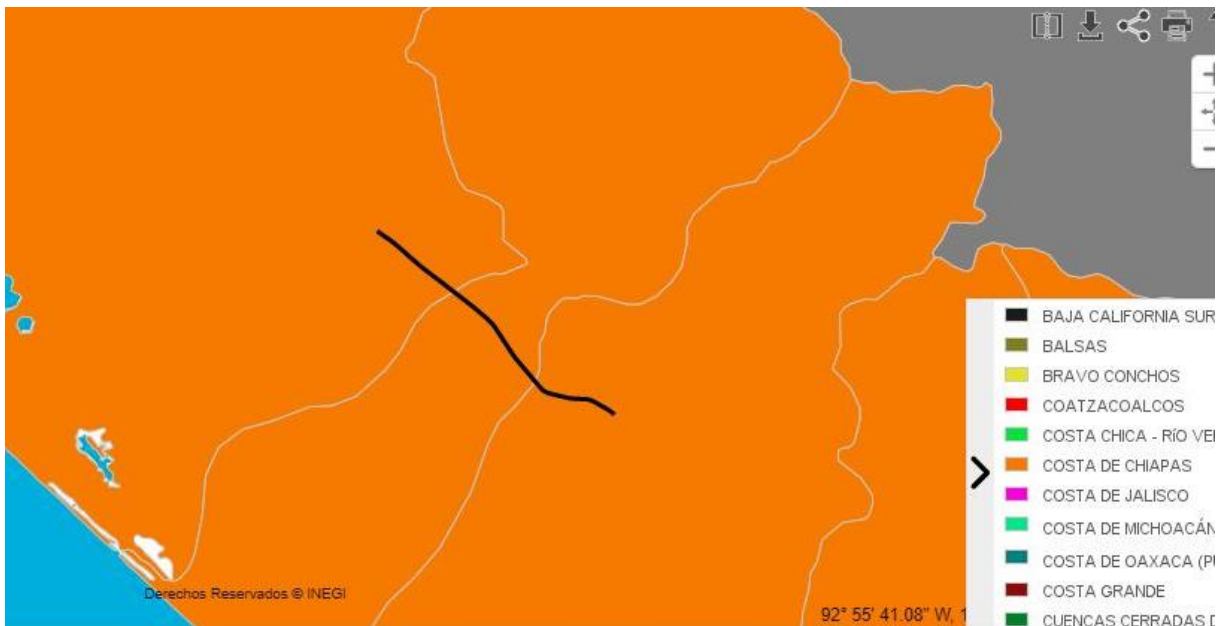


ILUSTRACIÓN 57 REGIÓN HIDROLÓGICA DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI



ILUSTRACIÓN 58 ESCORRIMENTÍA DEL SUELO DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI

GEOLOGÍA

El tramo se encuentra situado en la provincia de la cordillera de Centroamérica particularmente cruzando por la llanura costera del istmo en el municipio de Mapastepec y de la llanura costera de Chiapas y Guatemala; por lo general en estos tramos se encuentran rocas ígneas intrusivas, rocas graníticas y algunas tobas, el tramo no cruza por fallas geológicas importantes (ver ilustración 59).



ILUSTRACIÓN 59 GEOLOGÍA DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI

SUELO

El tramo se encuentra alojado sobre diferentes suelos, principalmente cambisol, fluvisol y luvisol (ver ilustración 60), en selva perennifolia arbustiva (ver ilustración 61).

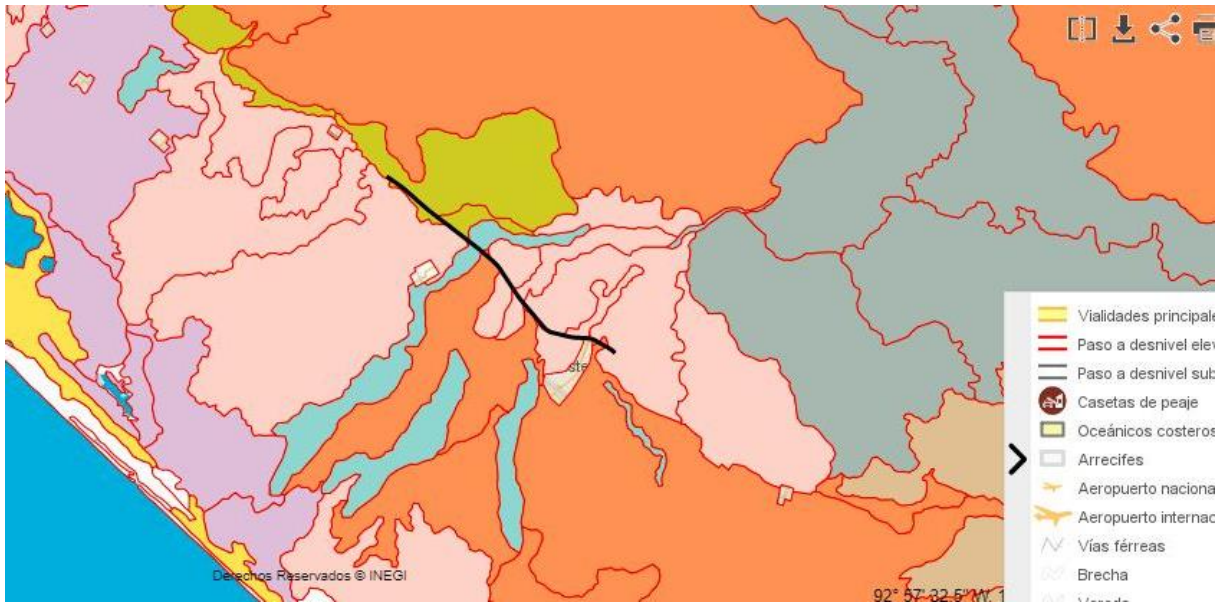


ILUSTRACIÓN 60 USO DE SUELO DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI

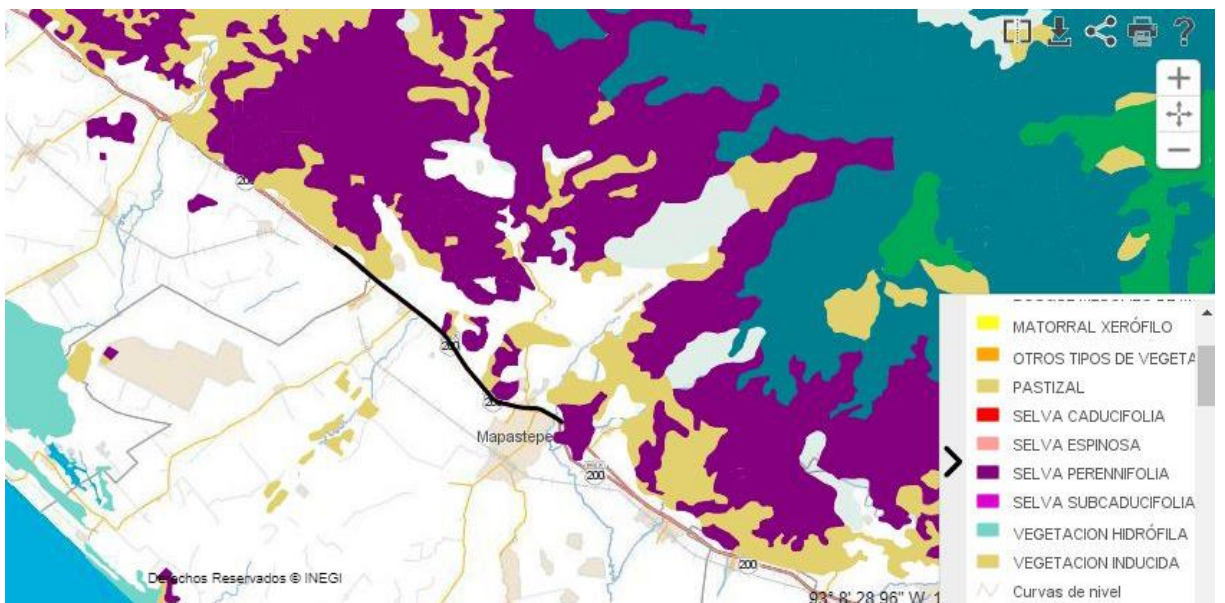
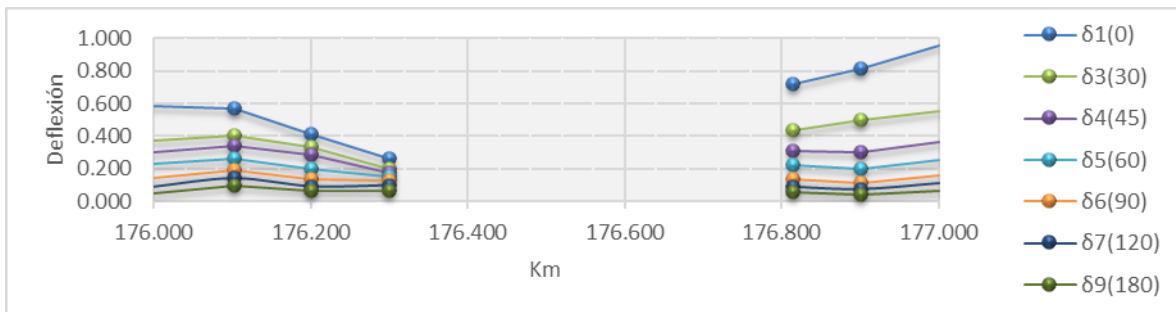
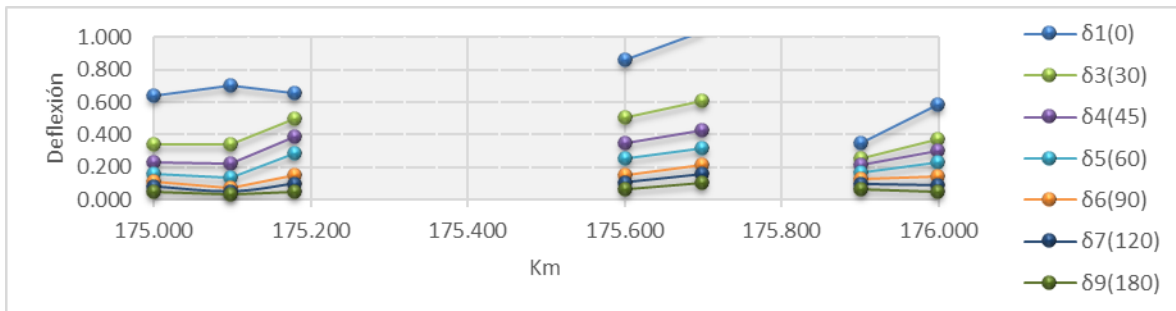
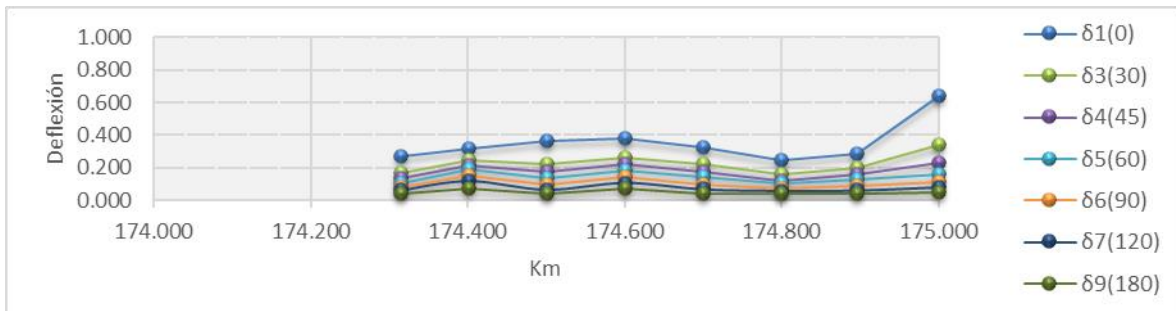


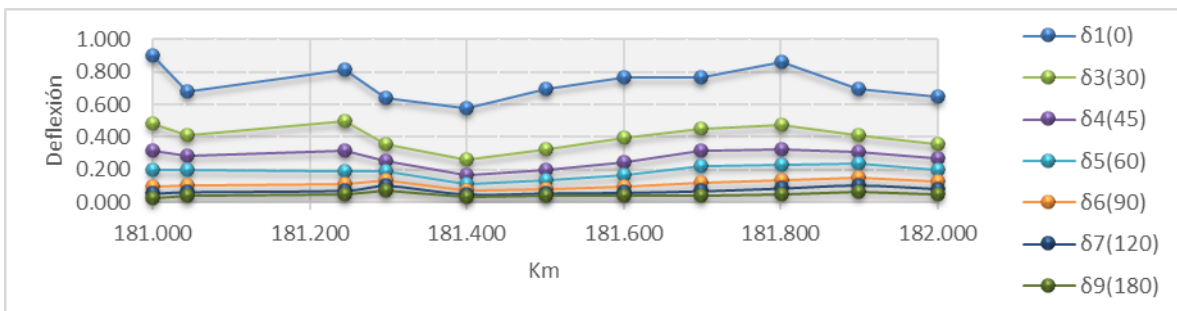
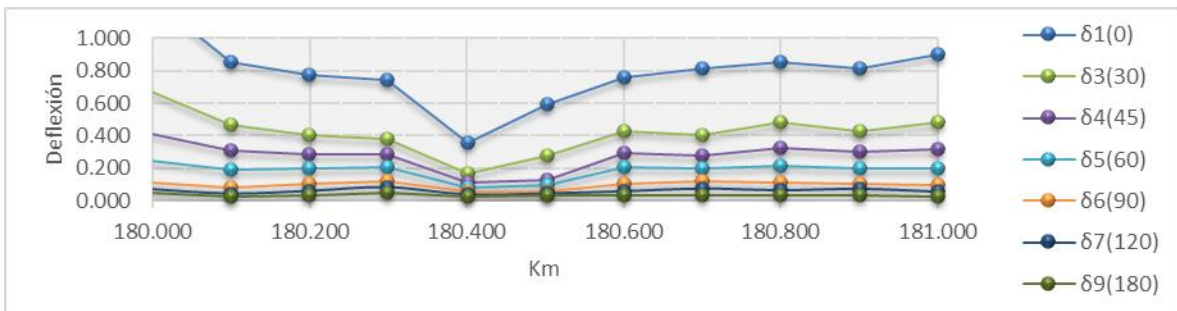
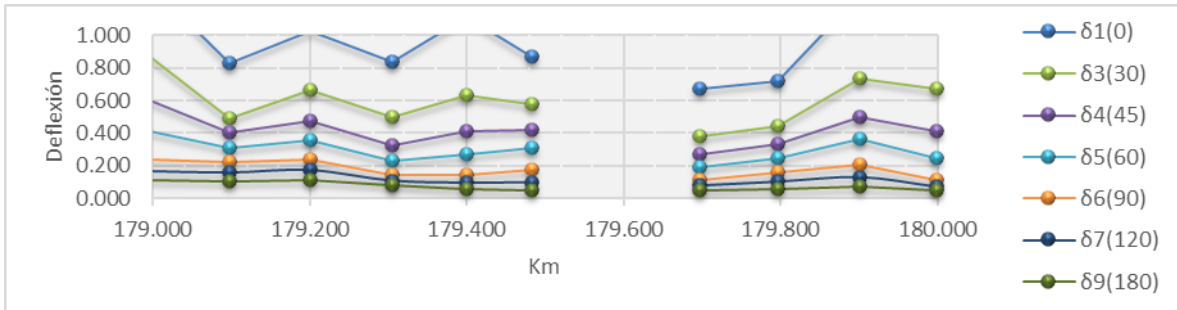
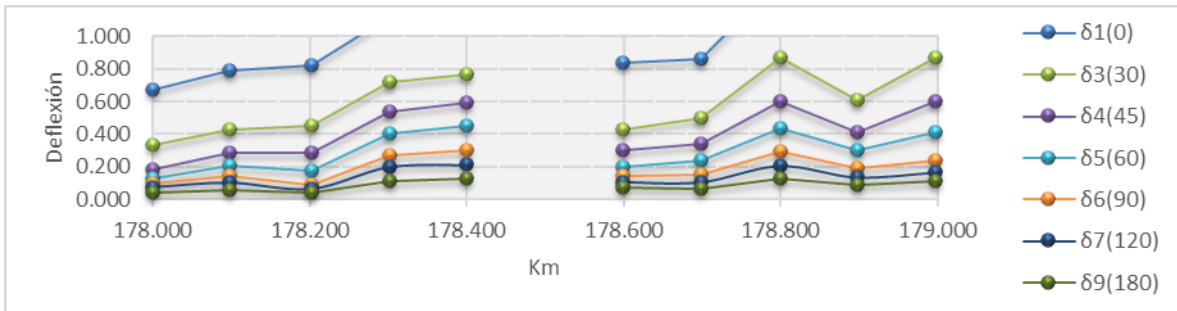
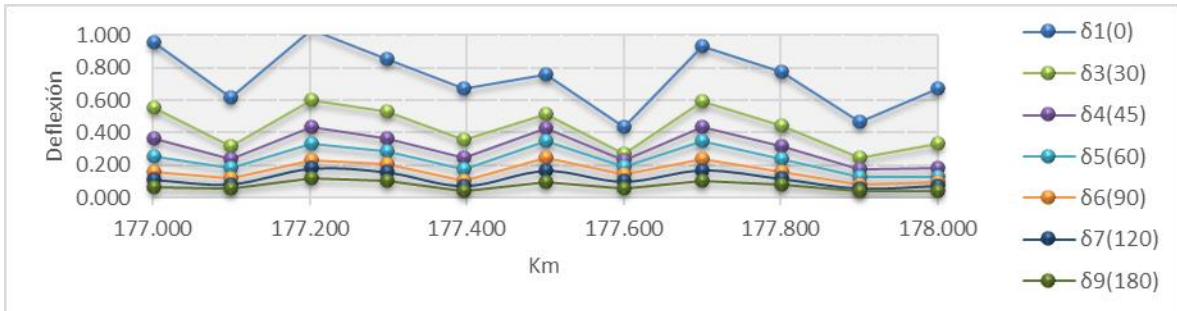
ILUSTRACIÓN 61 EDAFOLOGÍA DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI

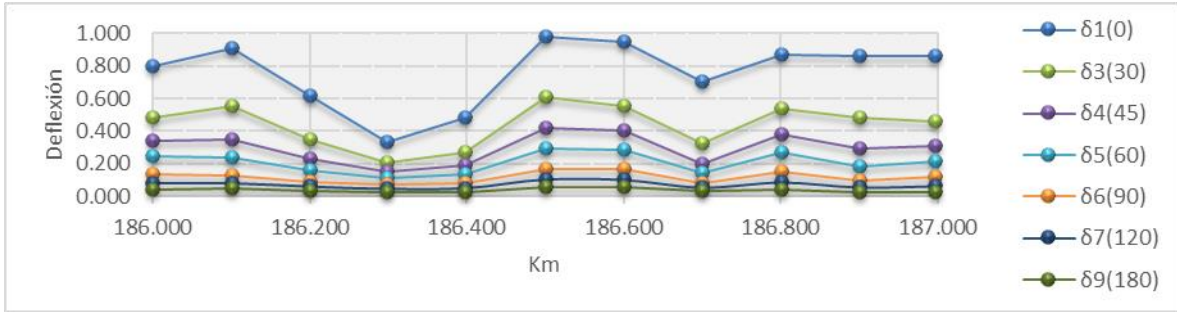
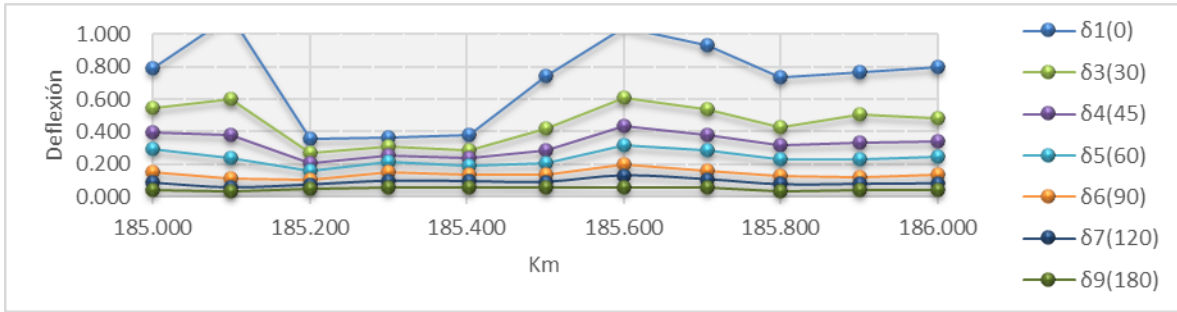
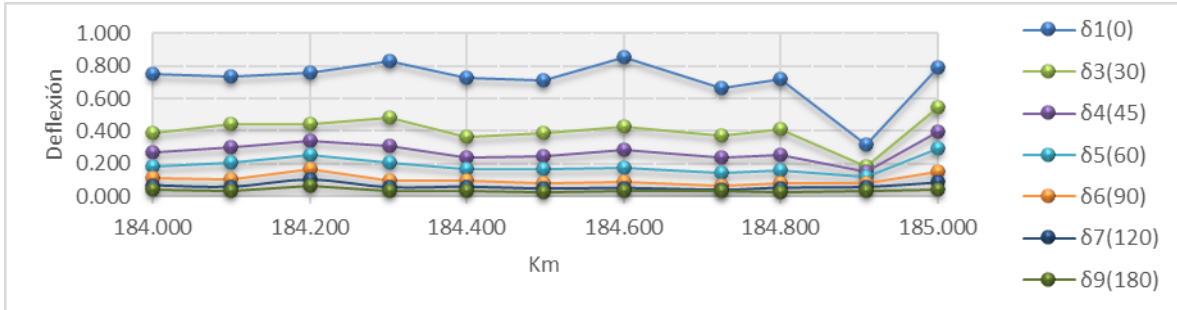
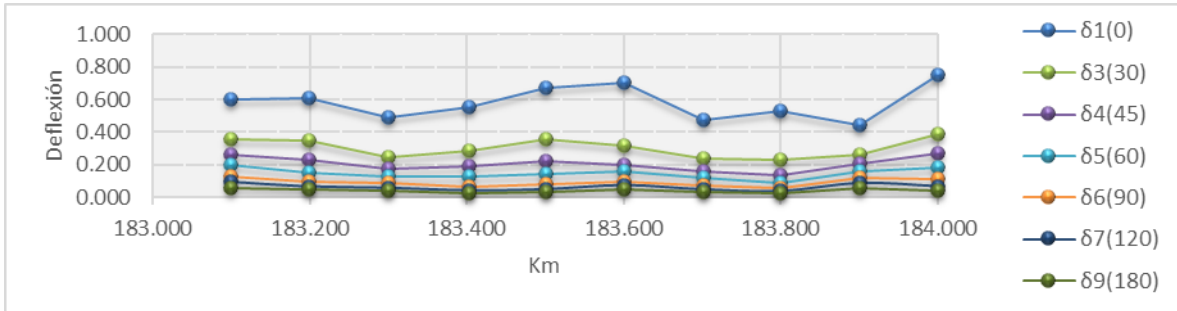
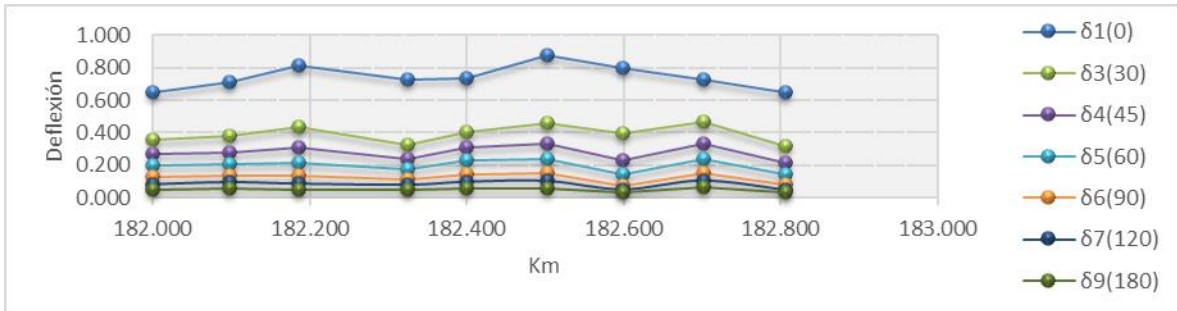
IX. COLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO

De acuerdo al procedimiento indicado en el tema medición de deflexiones se realizó la colección de datos en campo, siguiendo los lineamientos que ahí se mencionan y las consideraciones que se hacen en la normativa SCT, particularmente en el manual 020. Determinación de las deflexiones con equipo de impacto M·MMP·4·07·020/17.

MEDICIÓN EN EL CARRIL DE BAJA







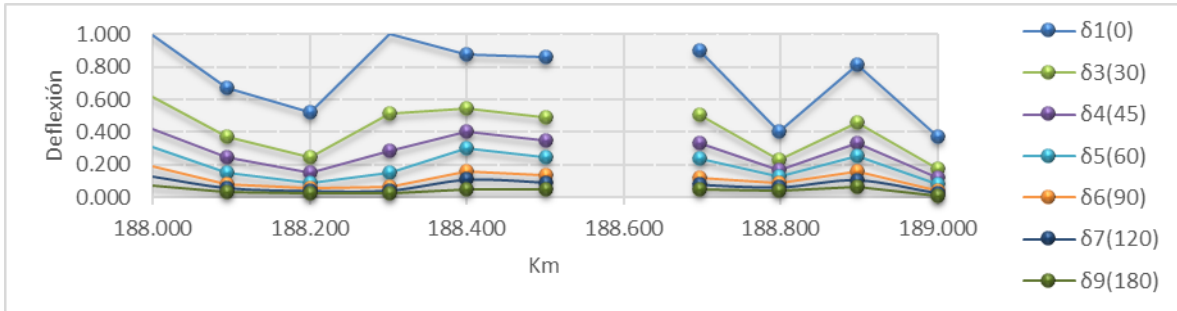
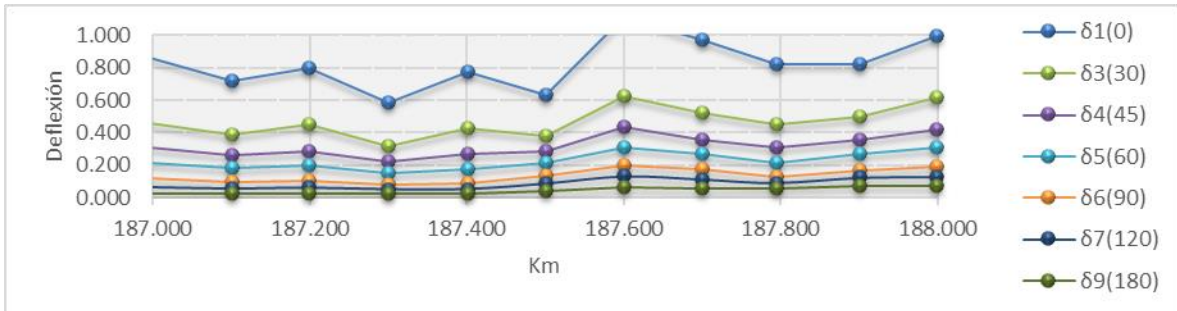
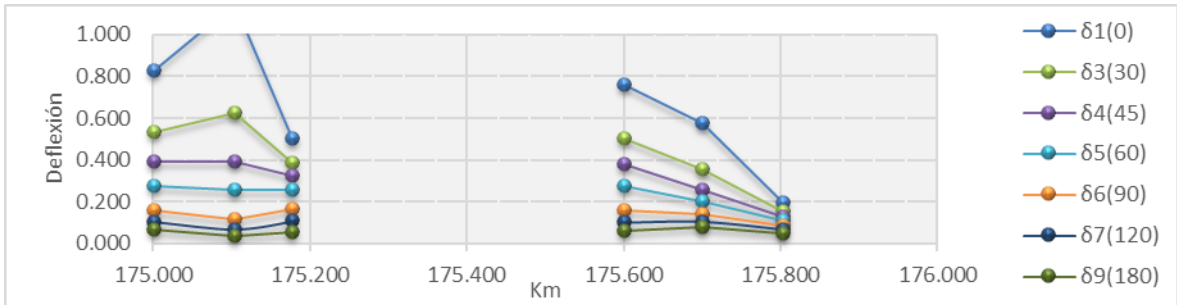
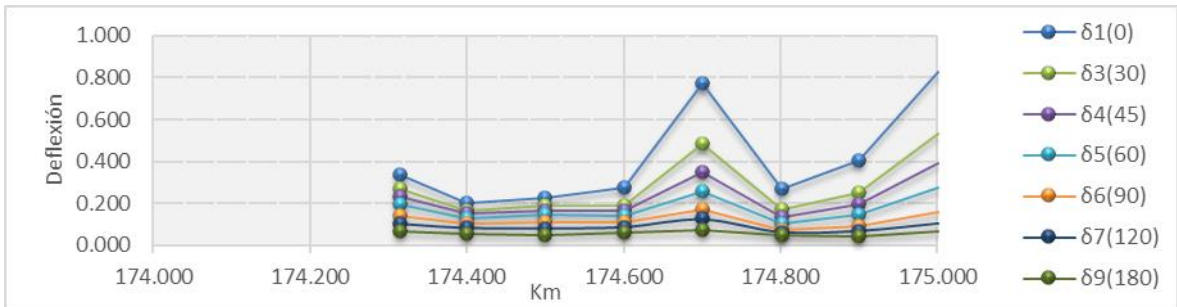
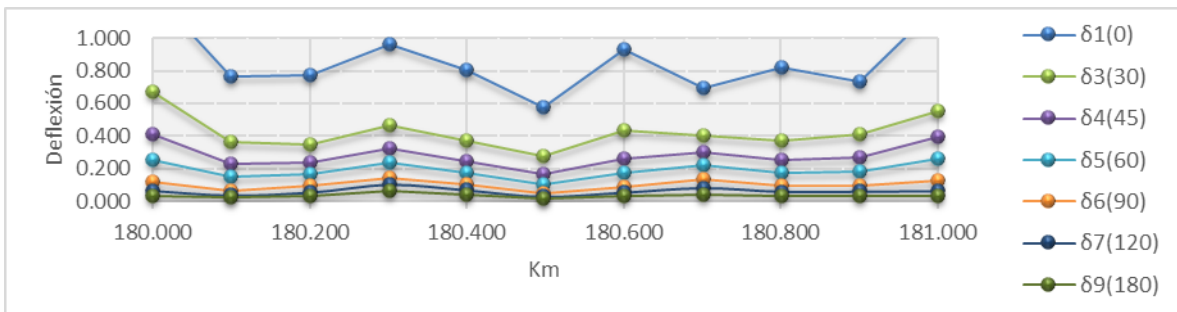
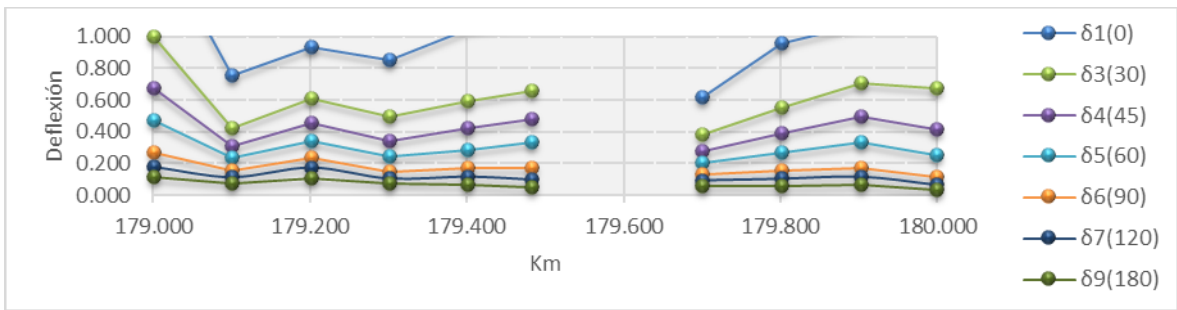
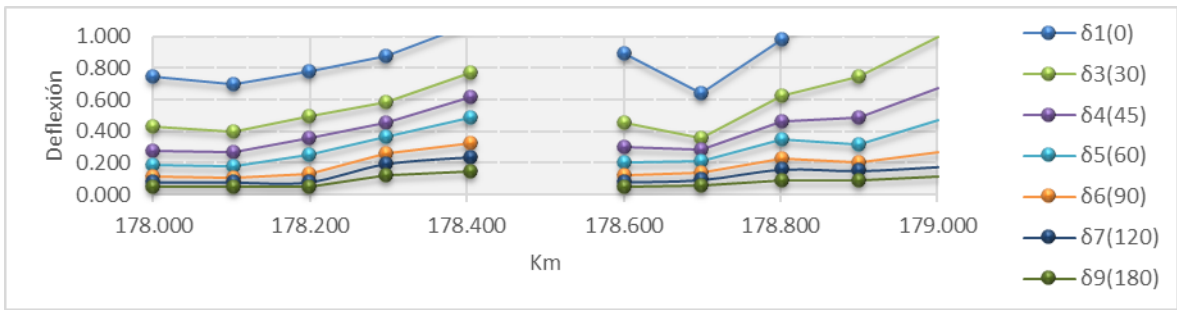
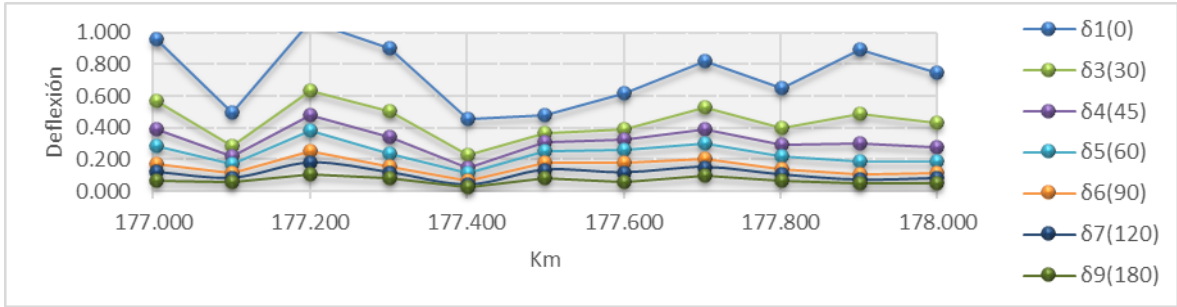
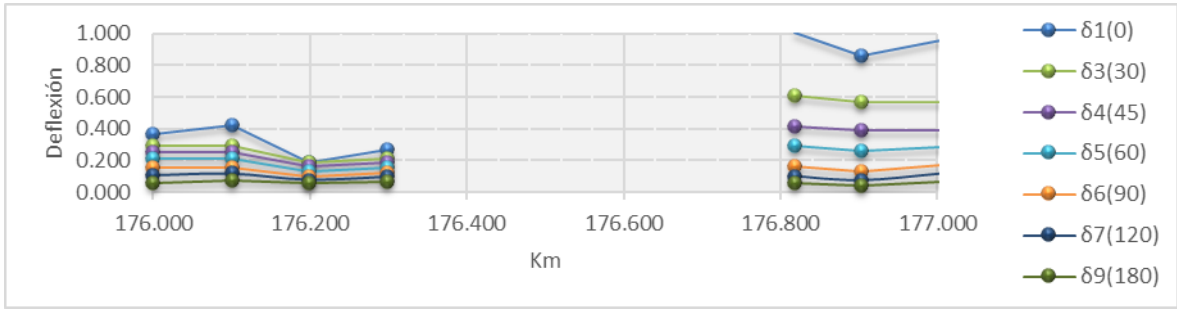
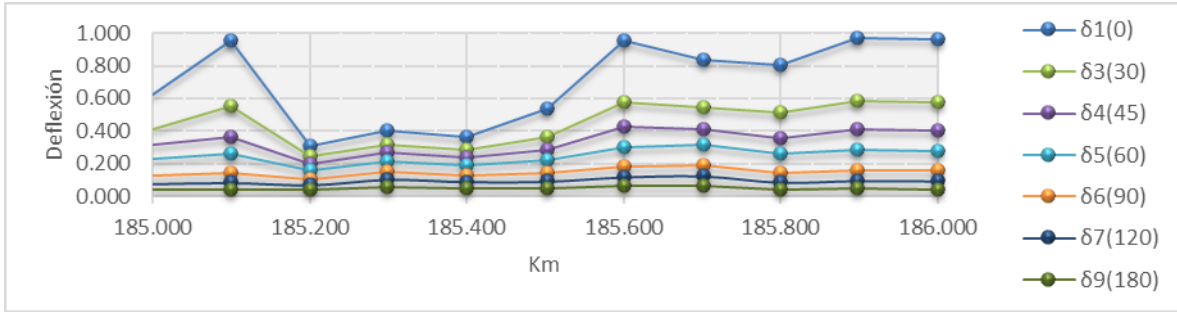
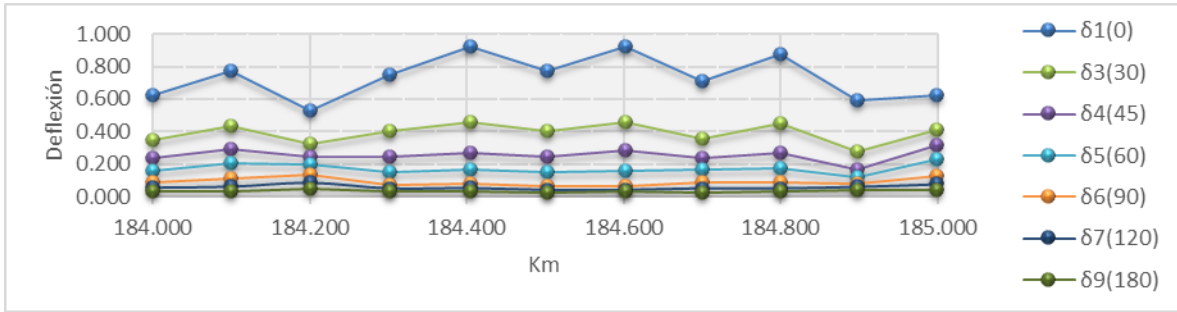
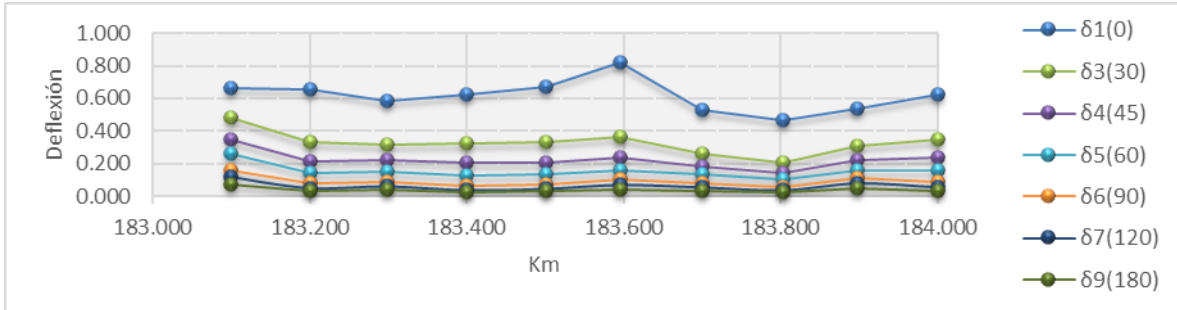
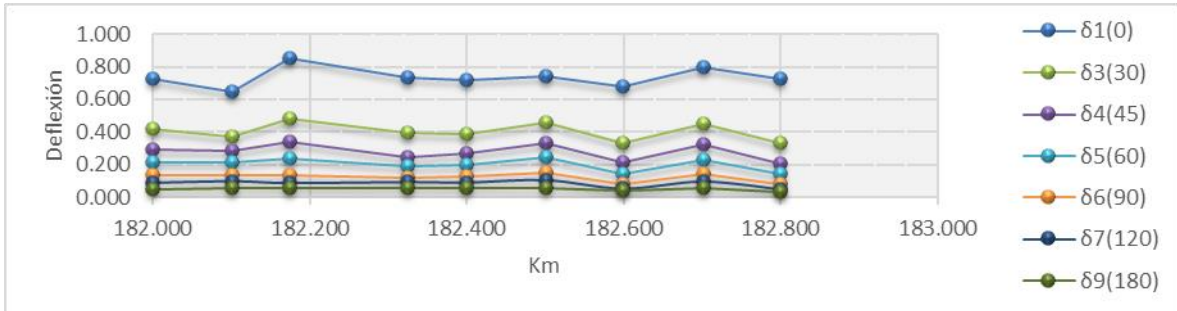
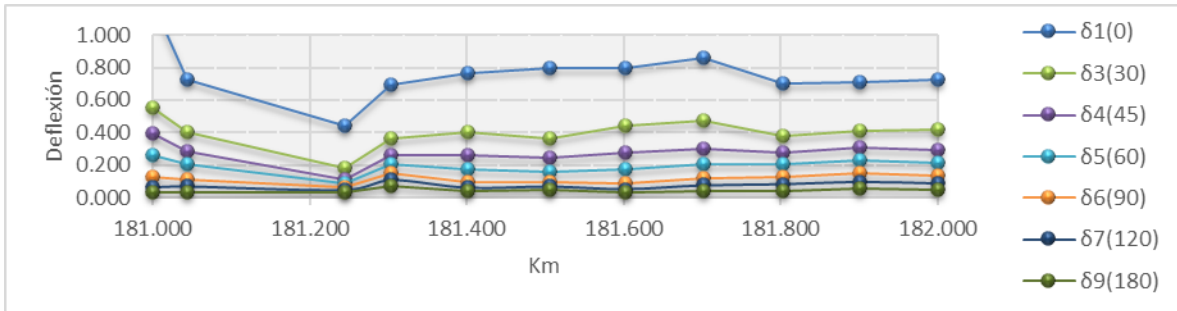


ILUSTRACIÓN 62 DEFLEXIONES POR KM EN EL CARRIL DE BAJA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

MEDICIÓN EN EL CARRIL DE ALTA







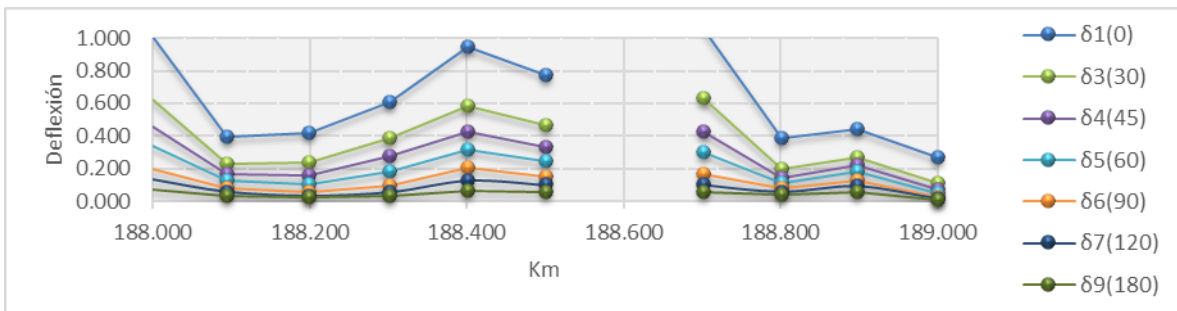
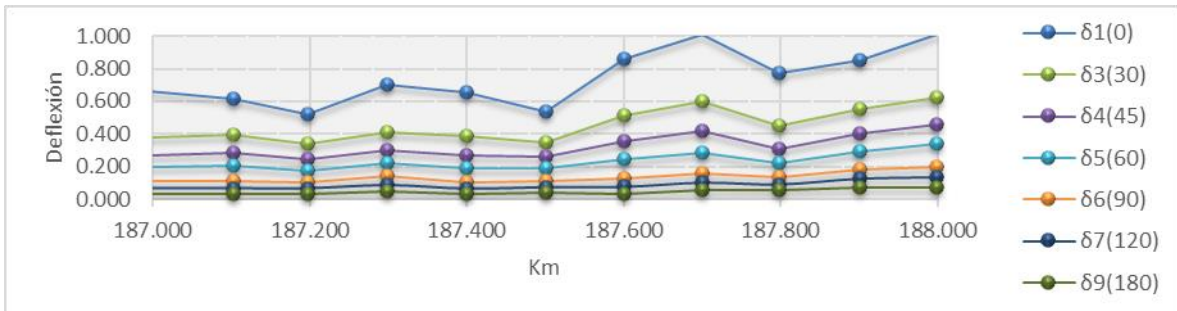
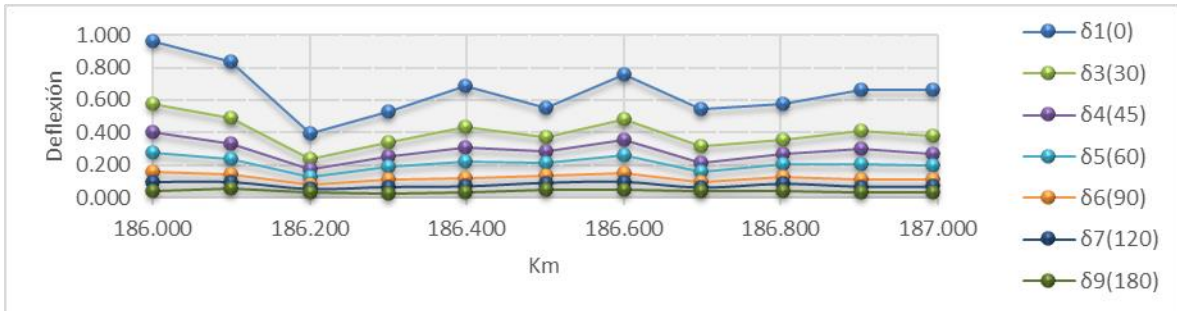


ILUSTRACIÓN 63 DEFLEXIONES POR KM EN EL CARRIL DE ALTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

NORMALIZACIÓN

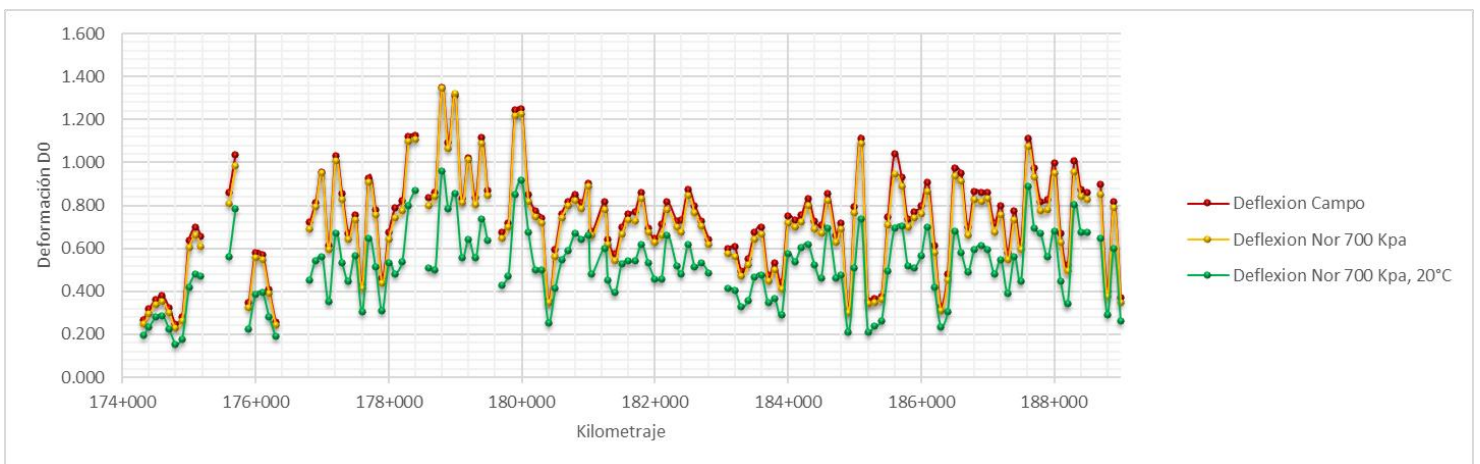


ILUSTRACIÓN 64 PROCESO DE NORMALIZACIÓN Y COMPARATIVA CARRIL DE BAJA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

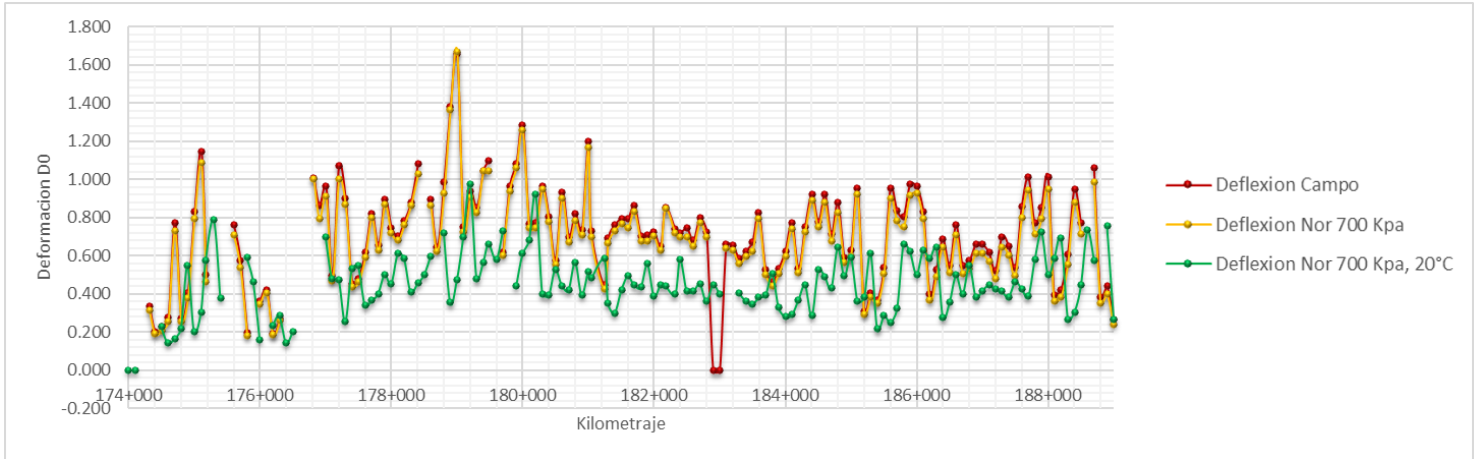


ILUSTRACIÓN 65 PROCESO DE NORMALIZACIÓN Y COMPARATIVA CARRIL DE ALTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

DEFLECTOGRÁMAS CON ZONAS HOMOGÉNEAS CARRIL DE BAJA

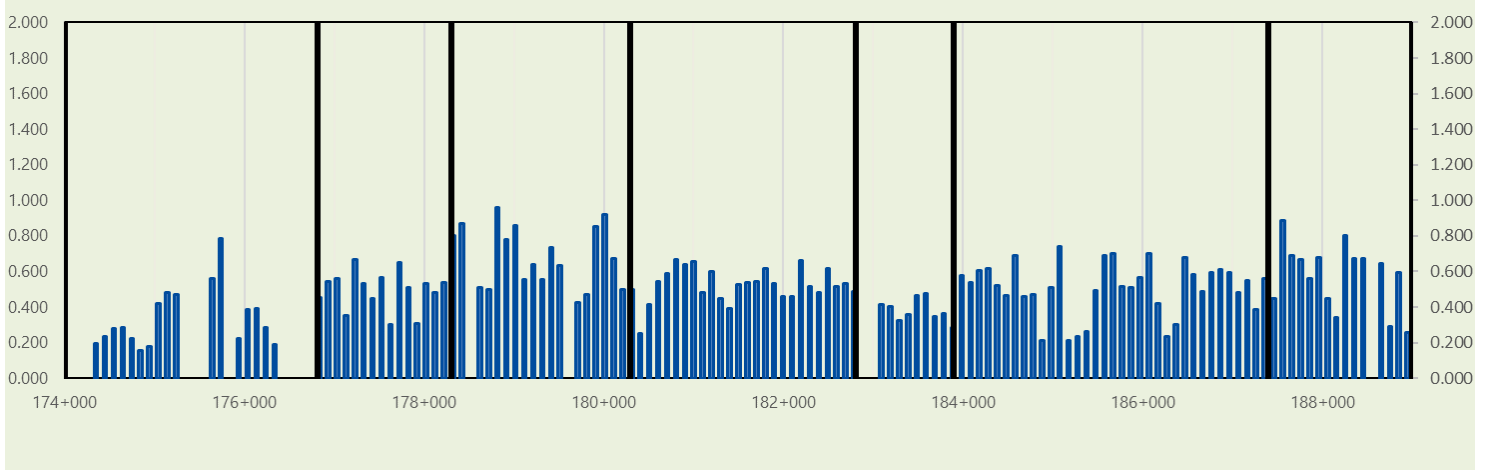


ILUSTRACIÓN 66 DEFLECTOGRÁMA CON ZONAS HOMOGÉNEAS EN EL CARRIL DE BAJA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

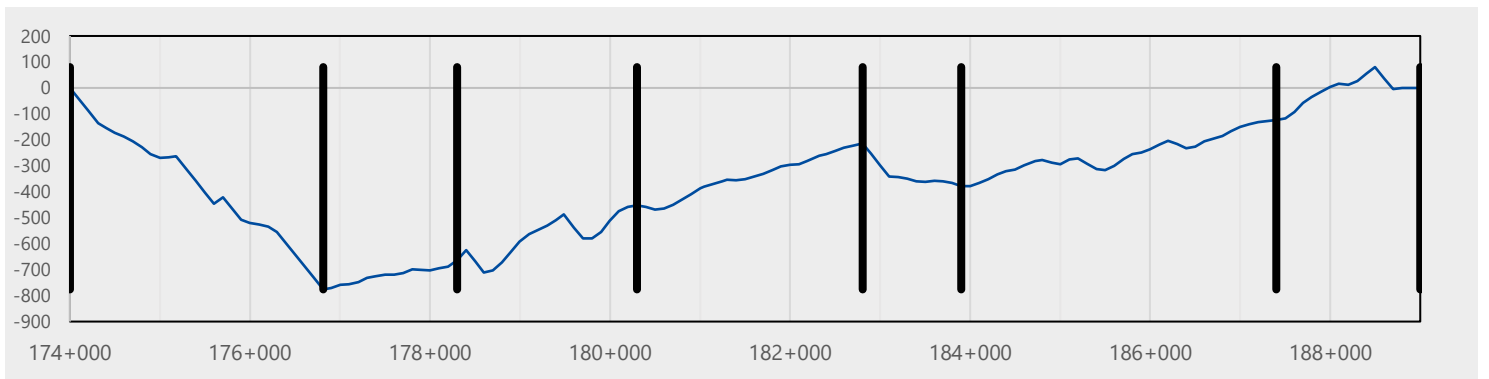


ILUSTRACIÓN 67 GRÁFICA ZX PARA DETERMINAR LAS ZONAS HOMOGÉNEAS EN EL CARRIL DE BAJA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

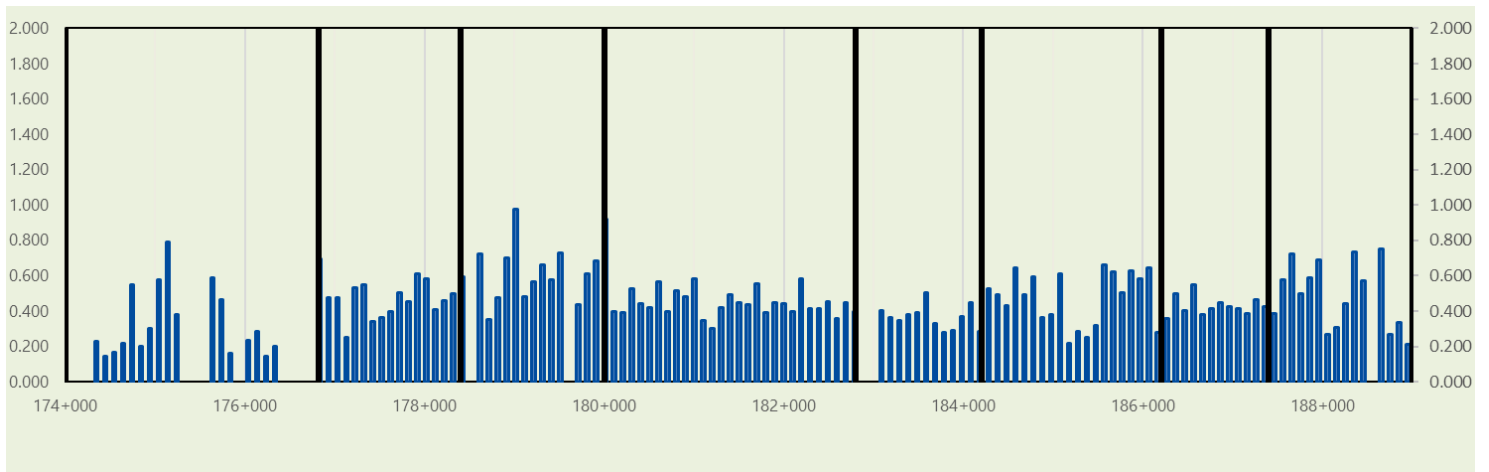


ILUSTRACIÓN 68 DEFLECTOGRÁMA CON ZONAS HOMOGÉNEAS EN EL CARRIL DE ALTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

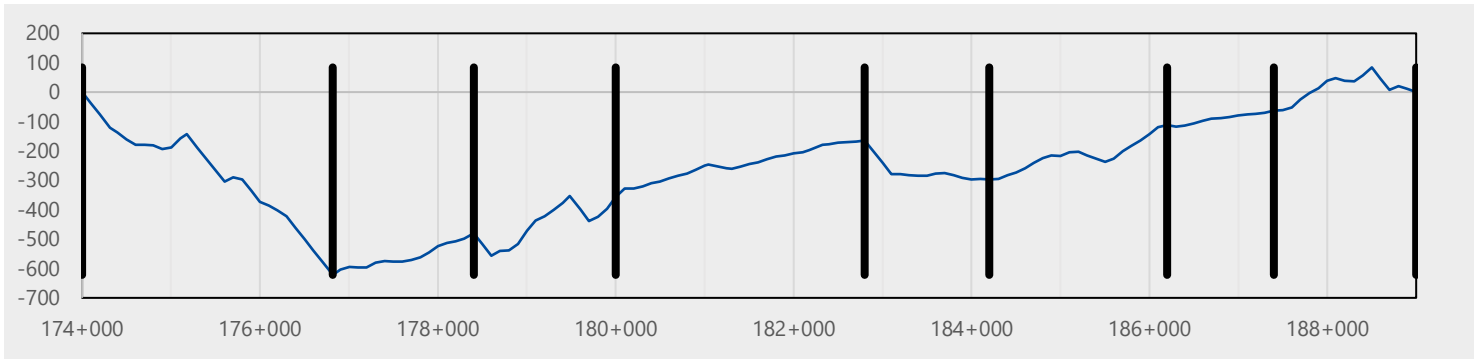


ILUSTRACIÓN 69 GRÁFICA ZX PARA DETERMINAR LAS ZONAS HOMOGÉNEAS EN EL CARRIL DE ALTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

ESPEORES OBTENIDOS CON GPR

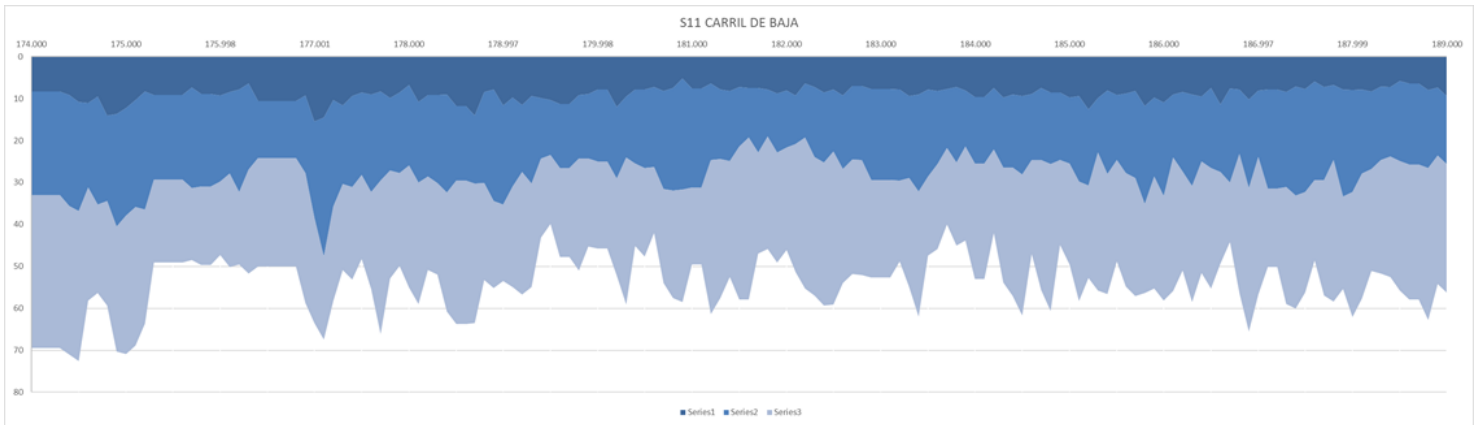


ILUSTRACIÓN 70 ESPEORES OBTENIDOS CON GPR EN EL CARRIL DE BAJA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

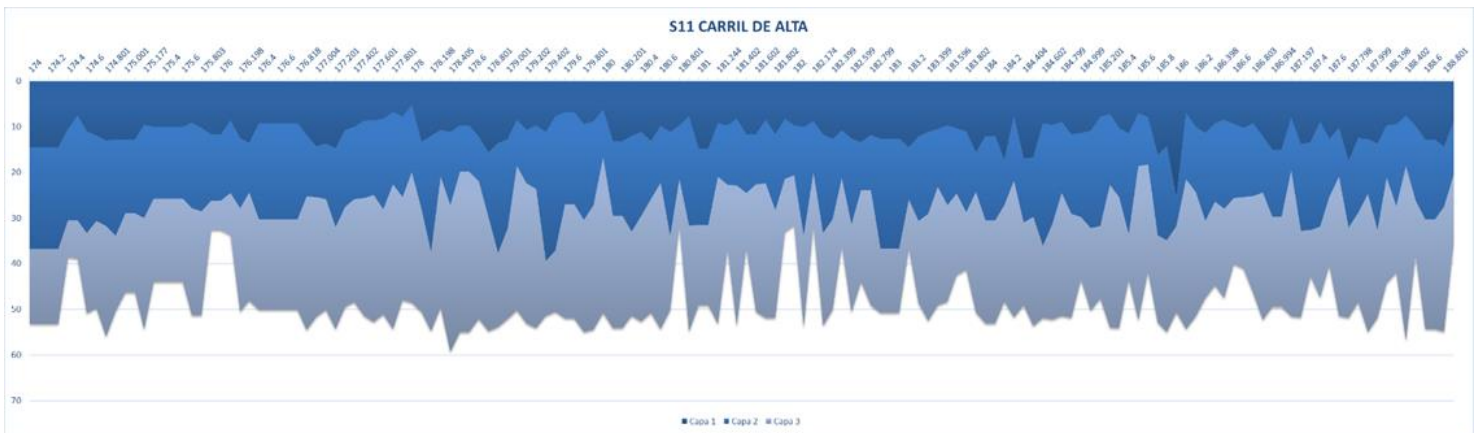


ILUSTRACIÓN 71 ESPEORES OBTENIDOS CON GPR EN EL CARRIL DE ALTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

X. TRÁNSITO DE DISEÑO

Para realizar el estudio de tránsito y el cálculo de los ejes equivalentes de diseño se obtienen los datos históricos registrado en el acervo de datos viales de la DGST de la SCT, la cual se concentra en la siguiente tabla 6 para la estación de conteo más cercana al tramo en estudio, la cual en este caso corresponde a la estación T. der. Mapastepec.

TABLA 6 HISTÓRICO DE TRÁNSITO DIARIO PROMEDIO ANUAL Y CONFIGURACIÓN DE TRÁNSITO; FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE LA DGST

	2.- T. Der. Mapastepec	TDPA	M	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS	TE	SC
Numero	AÑO.	TDPA											
	(X)	(V)											
1	2013	3392	7	71.3	2.9	6.7	1.9	5.5	1.4	3	0.3	3	2
2	2014	3871	6.9	70.7	3.1	6.9	2.1	5.8	1.2	2.9	0.4	3	2
3	2015	3736	8.3	65.4	3.7	8.1	2.2	7.1	1.3	3.6	0.3	3	2
4	2016	3801	10.7	63.1	3.8	8.7	1.9	6.5	1.3	3.7	0.3	3	2
5	2017	3841	12.8	64.3	3.3	7.8	2	4.7	1	3.7	0.4	3	2
6	2018	3835	13.8	61.2	4	8.3	1.9	6.5	1.1	3	0.2	3	2
7	2019	4081	14.6	59.5	3.9	9.1	1.7	6.8	1.2	3.1	0.1	3	2

Con estos datos históricos se realiza una estimación del tránsito a diferentes años proyectando los datos actuales, se utiliza un ajuste lineal y uno de interés simple, se extrapola el tránsito hasta el año el cual se contempla el periodo de diseño (ver ilustración 72).

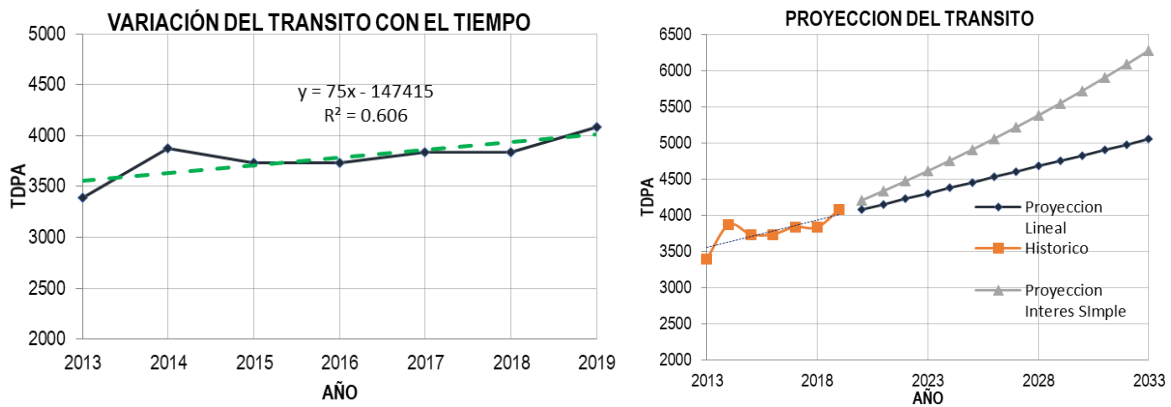

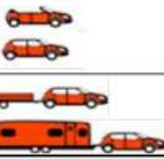
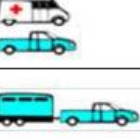





ILUSTRACIÓN 72 AJUSTE Y PROYECCIÓN DEL TDPA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En consecuencia se calcula el daño que ejerce cada tipo de vehículo sobre el pavimento, este daño, en general depende de cada vehículo, de cada configuración de los ejes con los que cuenta, el peso que transporta, la velocidad, la presión de inflado de llantas y las mismas dimensiones de los neumáticos, a partir de estos datos se obtiene el coeficiente de daño de cada tipo de eje y se realiza una

conversión equivalente a un eje sencillo estándar dual de 8.2 toneladas el cual en lo sucesivo lo determinaremos como eje equivalente.







El daño que representa cada vehículo se representa como una parte proporcional al daño que ejerce un eje equivalente y a esta proporcionalidad la determinamos como coeficiente unitario de daño equivalente, con esto se determina la cantidad de ejes equivalentes en función de una configuración de tránsito dada y el volumen de vehículos que se contabilizaron en el aforo a continuación de ilustra los tipos de vehículos que tienen mayor probabilidad de circular por las carreteras mexicanas (ver ilustración 73). (PT5-IMT, Instituto Mexicano Del Transporte, 1992)

ADMINISTRACIÓN FEDERAL DE CARRETERAS		DATOS VIALES
Clase 1 Motocicletas 		M
Clase 2 Automóviles 		A
Clase 3 Unitario, 4 llantas 		

AUTOBUS (B)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
B2	2	6	
B3	3	8 o 10	
B4	4	10	




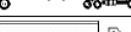
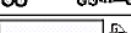
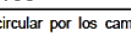
Nota: Los autobuses deben circular por los caminos y puentes de jurisdicción federal con las luces encendidas permanentemente.

ILUSTRACIÓN 73 CLASIFICACIÓN DEL TRÁNSITO; FUENTE NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-012-SCT-2-2017


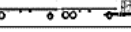
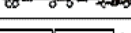
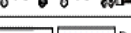
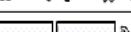
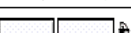

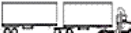


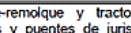
CAMIÓN UNITARIO (C)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
C2	2	6	
C3	3	8-10	
CAMIÓN-REMOLQUE (C-R)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
C2-R2	4	14	
C3-R2	5	18	
C2-R3	5	18	
C3-R3	6	22	

Nota: Los camiones unitarios y camión remolque deben circular por los caminos y puentes de jurisdicción federal con las luces encendidas permanentemente.

TABLA 5.2.3

TRACTOCAMION ARTICULADO (T-S)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1	3	10	
T2-S2	4	14	
T2-S3	5	18	
T3-S1	4	14	
T3-S2	5	18	
T3-S3	6	22	

Nota: Las configuraciones de tractocamión articulado deben circular por los caminos y puentes de jurisdicción federal con las luces encendidas permanentemente.

TRACTOCAMIÓN SEMIRREMOLQUE-REMOLQUE (T-S-R)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1-R2	5	18	
T2-S2-R2	6	22	
T2-S1-R3	6	22	
T3-S1-R2	6	22	
T3-S1-R3	7	26	
T3-S2-R2	7	26	
T3-S2-R3	8	30	
T3-S2-R4	9	34	
T2-S2-S2	6	22	
T3-S2-S2	7	26	
T3-S3-S2	8	30	

Nota: Las configuraciones de tractocamión semirremolque-remolque y tractocamión semirremolque-semirremolque deben circular por los caminos y puentes de jurisdicción federal con las luces encendidas permanentemente.

Para realizar el calculo de los coeficientes unitarios de daño equivalente se empleo la teoría desarrollada por el Instituto de Ingeniería la cual considera la ley de acumulación de deformación para los diversos materiales definida empíricamente, así como que la distribución de esfuerzos obedece a la teoría de Boussinesq ampliada por Burmister para un sistema bicapa.

De esta forma si se requiere determinar el coeficiente de daño (Di) correspondiente a un eje dual que trasmite una carga (Q) a una presión de contacto (p) se aplica la ecuación:

$$\log(Di) = \frac{\log \sigma_z(i) - \log \sigma_z(Nor)}{\log 1.5} \quad \text{con} \quad \sigma_z(i) = p \left[1 - \frac{z^3}{(a_i^2 - z^2)^{3/2}} \right] \quad \text{y} \quad \sigma_z(Nor) = p \left[1 - \frac{z^3}{(15^2 - z^2)^{3/2}} \right]$$

donde: z es la profundidad a_i el radio equivalente de un circulo que representa las llantas gemelas del eje dual.

TABLA 7 CALCULO DE FACTORES DE DAÑO POR VEHÍCULO CON LA CONFIGURACIÓN DE TRÁNSITO DE LA DGST - SCT. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

			2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
C. Sentido	1.00	Coficiente	Ejes Sencillos	Ejes Sencillos	Ejes Sencillos	Ejes Sencillos	Ejes Sencillos	Ejes Sencillos	Ejes Sencillos	Ejes Sencillos	Ejes Sencillos	Ejes Sencillos	Ejes Sencillos	Ejes Sencillos	Ejes Sencillos	Ejes Sencillos
C. Distribucion	0.80	Daño	6.2 Ton	6.2 Ton	6.2 Ton	6.2 Ton	6.2 Ton	6.2 Ton	6.2 Ton	6.2 Ton	6.2 Ton	6.2 Ton	6.2 Ton	6.2 Ton	6.2 Ton	6.2 Ton
Cargados	0.60	Carpeta	Carpeta	Carpeta	Carpeta	Carpeta	Carpeta	Carpeta	Carpeta	Carpeta	Carpeta	Carpeta	Carpeta	Carpeta	Carpeta	Carpeta
Vacios	0.40	Z = 5 cm	Z = 5 cm	Z = 5 cm	Z = 5 cm	Z = 5 cm	Z = 5 cm	Z = 5 cm	Z = 5 cm	Z = 5 cm	Z = 5 cm	Z = 5 cm	Z = 5 cm	Z = 5 cm	Z = 5 cm	Z = 5 cm
A-2	Cargados	0.60	0.00280	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125	0.00125
	Vacios	0.40	0.00226	0.00067	0.00067	0.00067	0.00067	0.00067	0.00067	0.00067	0.00067	0.00067	0.00067	0.00067	0.00067	0.00067
B-2	Cargados	0.60	2.01892	0.04724	0.04724	0.04724	0.04724	0.04724	0.04724	0.04724	0.04724	0.04724	0.04724	0.04724	0.04724	0.04724
	Vacios	0.40	1.64277	0.02563	0.02563	0.02563	0.02563	0.02563	0.02563	0.02563	0.02563	0.02563	0.02563	0.02563	0.02563	0.02563
C-2	Cargados	0.60	2.44424	0.13346	0.13346	0.13346	0.13346	0.13346	0.13346	0.13346	0.13346	0.13346	0.13346	0.13346	0.13346	0.13346
	Vacios	0.40	1.29541	0.04715	0.04715	0.04715	0.04715	0.04715	0.04715	0.04715	0.04715	0.04715	0.04715	0.04715	0.04715	0.04715
C-3	Cargados	0.60	3.52802	0.03599	0.03599	0.03599	0.03599	0.03599	0.03599	0.03599	0.03599	0.03599	0.03599	0.03599	0.03599	0.03599
	Vacios	0.40	1.67200	0.01137	0.01137	0.01137	0.01137	0.01137	0.01137	0.01137	0.01137	0.01137	0.01137	0.01137	0.01137	0.01137
T3-S1	Cargados	0.60	4.10614	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	Vacios	0.40	2.23828	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
T3-S2	Cargados	0.60	6.14955	0.25090	0.25090	0.25090	0.25090	0.25090	0.25090	0.25090	0.25090	0.25090	0.25090	0.25090	0.25090	0.25090
	Vacios	0.40	2.35716	0.06411	0.06411	0.06411	0.06411	0.06411	0.06411	0.06411	0.06411	0.06411	0.06411	0.06411	0.06411	0.06411
T3-S3	Cargados	0.60	7.33319	0.05280	0.05280	0.05280	0.05280	0.05280	0.05280	0.05280	0.05280	0.05280	0.05280	0.05280	0.05280	0.05280
	Vacios	0.40	2.49582	0.01198	0.01198	0.01198	0.01198	0.01198	0.01198	0.01198	0.01198	0.01198	0.01198	0.01198	0.01198	0.01198
T3-S2-R4	Cargados	0.60	10.48043	0.20122	0.20122	0.20122	0.20122	0.20122	0.20122	0.20122	0.20122	0.20122	0.20122	0.20122	0.20122	0.20122
	Vacios	0.40	2.98745	0.03824	0.03824	0.03824	0.03824	0.03824	0.03824	0.03824	0.03824	0.03824	0.03824	0.03824	0.03824	0.03824
ESAL/AÑO			1,098,715	1,136,209	1,168,571	1,205,148	1,242,870	1,285,283	1,321,891	1,363,267	1,405,938	1,453,916	1,495,327	1,542,132	1,590,401	1,644,674

Con ello se estima el comportamiento del tránsito durante el periodo de diseño en ejes equivalentes, en este caso se considera un periodo de diseños de 5 años, por lo cual se determina el promedio aritmético de los ejes equivalentes por año, dato que es requerido por el programa de retrocálculo con un promedio 1,427,359 de ejes equivalentes de 8.2 ton en el carril de diseño, considerando un 60% de vehículos cargados con un coeficiente de distribución del carril de diseño del 80%.

	del	al		Ejes Sencillos
ESAL 10 años	2020	2030	14,177,136	8.2 Ton
ESAL 5 años	2020	2025	7,136,797	

XI. EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL PAVIMENTO CON DEFLEXIONES

Se presentan las tablas con los resultados del análisis deflectométrico expuesto en el punto “EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS” este proceso se realiza en una tabla de excel para mejorar la trabajabilidad de datos.

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD



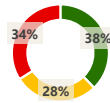
Información

Clave: Def-Arr-Tap-174000-189000-S11
 Carretera: ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo: PUJIAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)
 Cuerpo: B Carril Izq (Baja)

No.	Cadenamiento	Deflexión normalizada 700 kPa [mm]							Tipo de superficie	Radio de curvatura 700 kPa, (m)	Espesor Pav (cm)	Temperatura [° c]	Factor por Temperatura	Deflexión normalizada 700 kPa, 20° C; [mm]									Tipo de superficie	Radio de curvatura 20° C (m)
		S1	S3	S4	S5	S6	S7	S9						S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9		
149	188+798	0.375	0.213	0.156	0.120	0.081	0.057	0.036	Flexible	116	8	42	0.78	0.291	0.000	0.165	0.121	0.093	0.063	0.044	0.000	0.028	Flexible	150
150	188+897	0.790	0.444	0.324	0.245	0.155	0.101	0.060	Flexible	55	7	45	0.76	0.597	0.000	0.335	0.245	0.185	0.117	0.077	0.000	0.046	Flexible	73
151	189+000	0.347	0.162	0.111	0.077	0.040	0.024	0.010	Flexible	117	9	42	0.75	0.260	0.000	0.121	0.083	0.057	0.030	0.018	0.000	0.008	Flexible	157

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

- Bueno
- Aceptable
- No aceptable



Información

Clave: Def-Arr-Tap-144000-189000-S11
 Carretera: **ARRIAGA - TAPACHULA**
 Tramo: **LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)**
 Cuerpo: **B Carril Der (Alta)**

No.	Cadenamiento	Deflexión normalizada 700 kPa [mm]									Tipo de superficie	radio de curvatura 700 kPa [m]	Espesor Pav [cm]	Temperatura [°c]	Factor por Temperatura	Deflexión normalizada 700 kPa, 20° C; [mm]									Tipo de superficie	radio de curvatura 20° C [m]
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9						S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9		
149	188+801	0.350	0.000	0.180	0.132	0.101	0.072	0.053	0.000	0.036	Flexible	120	14	36	0.76	0.266	0.000	0.137	0.100	0.077	0.055	0.040	0.000	0.027	Flexible	158
150	188+898	0.399	0.000	0.246	0.200	0.162	0.117	0.085	0.000	0.050	Flexible	113	9	35	0.83	0.333	0.000	0.205	0.167	0.135	0.097	0.071	0.000	0.041	Flexible	136
151	189+000	0.241	0.000	0.102	0.065	0.044	0.024	0.014	0.000	0.009	Flexible	164	9	32	0.87	0.209	0.000	0.088	0.056	0.039	0.021	0.012	0.000	0.008	Flexible	189

Se establece que de acuerdo a los límites permisibles que presentan los contratos APP al cual pertenece el tramo en estudio el límite permisible para considerar dentro del parámetro que cumplen el desempeño de ese tramo son 500 micras en deflexiones, sin embargo, en la tabla 1 de la norma N·CSV·CAR·1·03·010/17 de la SCT, establece que el límite permisible para corredores como el tramo que estamos evaluando son de 400 micras o 0.4 mm

TABLA 8 RANGOS DE VALORES REPRESENTATIVOS DE DEFLEXIONES PARA LA CLASIFICACIÓN DE LOS SEGMENTOS CARRETERAS A 700 KPA Y 20 GRADOS C. FUENTE: NORMATIVA SCT

Rangos de valores representativos de deflexiones mm		
Condición estructural	Autopistas y Corredores Carreteros	Red Básica y Secundaria
Buena	0 a 0,4	0 a 0,50
Regular	--	> 0,50 y ≤ 0,80
Mala	> 0,4	> 0,80

Con esto se construye la forma de evaluar el tramo en función de su deflexión máxima o la deflexión al centro del plato siendo que las deflexiones por debajo de las 400 micras corresponden a un estado Bueno y las ubicamos en color verde, las deflexiones mayores a 400 micras y menos que 500 se consideran dentro de un estado Regular y las identificamos en color amarillo y las deflexiones que superan las 500 micras corresponden a un estado Malo identificándolas en color rojo.

TABLA 9 EVALUACIÓN DE LAS DEFLEXIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Grupo	Intervalo	Frecuencia
1	0.0 - 0.4	Bueno
2	>0.4 - 0.5	Regular
3	> 0.5	Malo

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Información

Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-S11
 Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo PIJUIAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Izq (Baja)

Analisis Estadístico DN max.

ESTADÍSTICA CARRIL DE BAJA

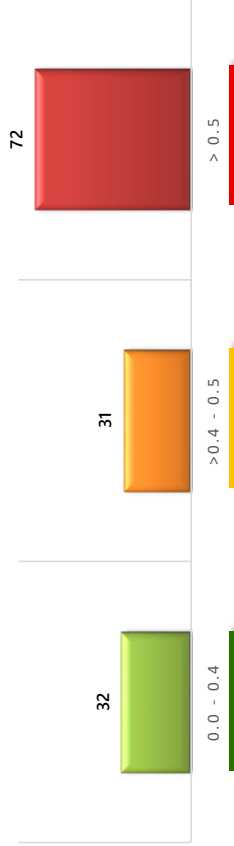
Características de clase

Grupo	Intervalos de clase	Límite inferior de clase	Límite superior de clase	Ancho de clase	Marca de clase
1	0.0 - 0.4	0.0	<= 0.4	0.4	0.2
2	>0.4 - 0.5	>0.4	<= 0.5	0.1	0.45
3	> 0.5	>0.5	-	-	-

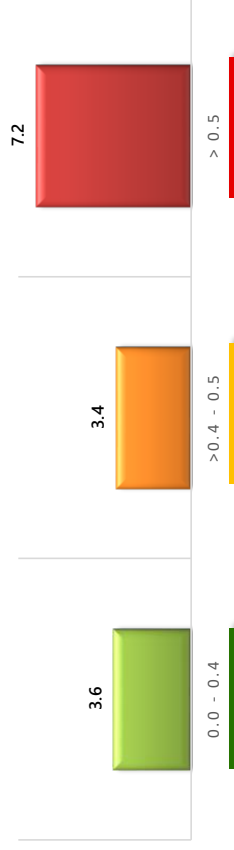
Distribución de frecuencias

Grupo	Intervalo	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada
1	0.0 - 0.4	32	23.7%	32	23.7%
2	>0.4 - 0.5	31	23.0%	63	46.7%
3	> 0.5	72	53.3%	135	100.0%

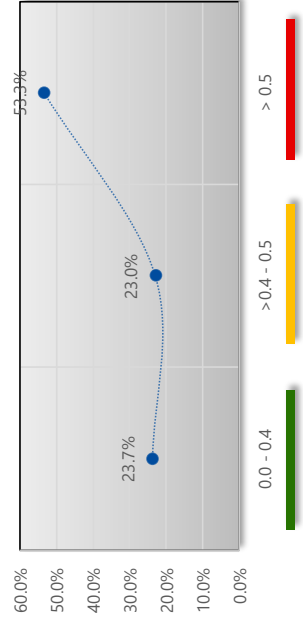
Histograma de frecuencias por número de impactos



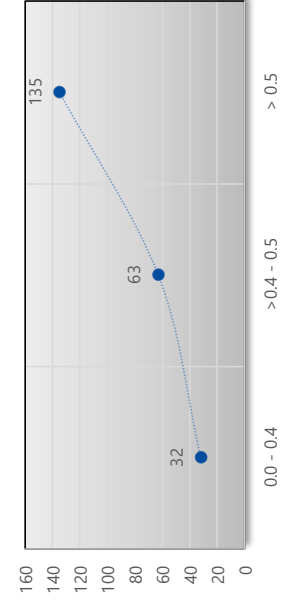
Histograma de frecuencias por kilómetro



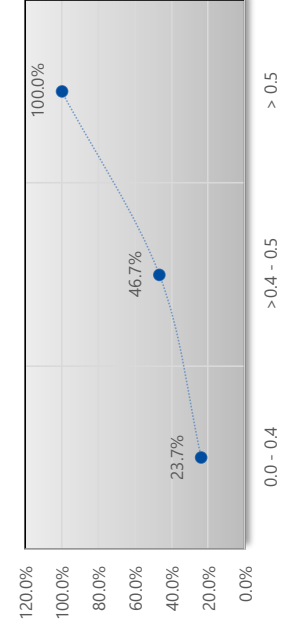
Polígono de frecuencia relativa



Polígono de frecuencia acumulada



Ojiva porcentual



Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Información

Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-S11
 Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Der (Alta)

Analisis Estadístico DN max.

ESTADÍSTICA CARRIL DE ALTA

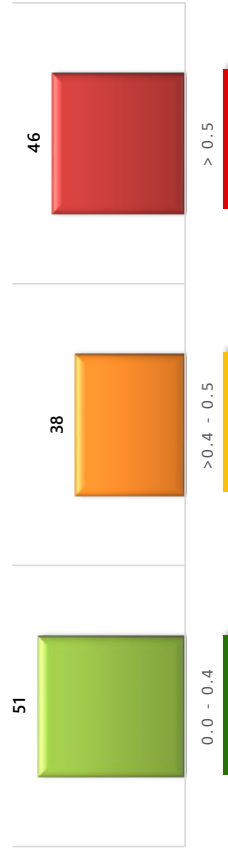
Características de clase

Grupo	Intervalos de clase	Límite inferior de clase	Límite superior de clase	Ancho de clase	Marca de clase
1	0.0 - 0.4	0.0	<= 0.4	0.5	0.25
2	>0.4 - 0.5	>0.4	<= 0.4	0.3	0.65
3	> 0.5	>0.5	-	-	-

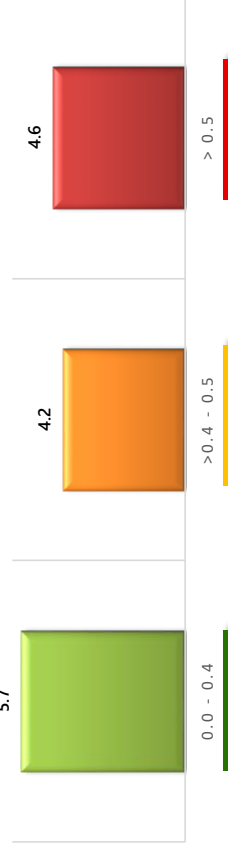
Distribución de frecuencias

Grupo	Intervalo	Frecuencia	Frecuencia relativa	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa acumulada
1	0.0 - 0.4	51	37.8%	51	37.8%
2	>0.4 - 0.5	38	28.1%	89	65.9%
3	> 0.5	46	34.1%	135	100.0%

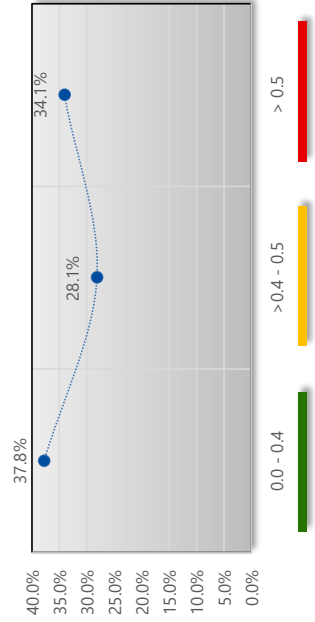
Histograma de frecuencias por número de impactos



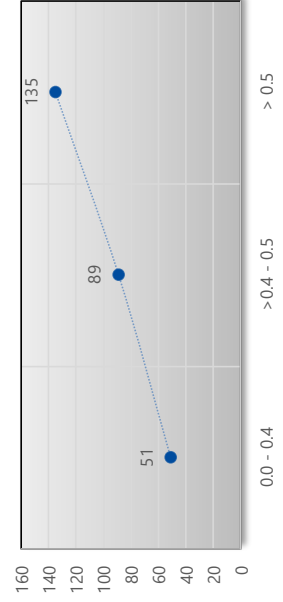
Histograma de frecuencias por kilómetro



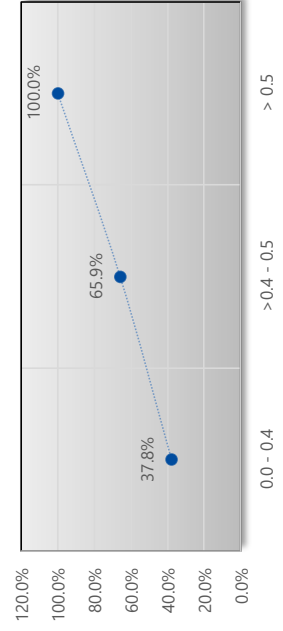
Polígono de frecuencia relativa



Polígono de frecuencia acumulada



Ojiva porcentual



El proceso de cálculo de zonas homogéneas implica realizar una tabla en la cual se identifican las columnas como se establece en el punto V Indicadores derivados de las pruebas de deflexión y el procedimiento para analizar los deflectogramas con zonas homogéneas.

Dado que el uso de grafica Zx incluye analizar los cambios de pendiente de la gráfica existen varios métodos para encontrar estos cambios, considerando la convención de los datos iniciando de izquierda a derecha.

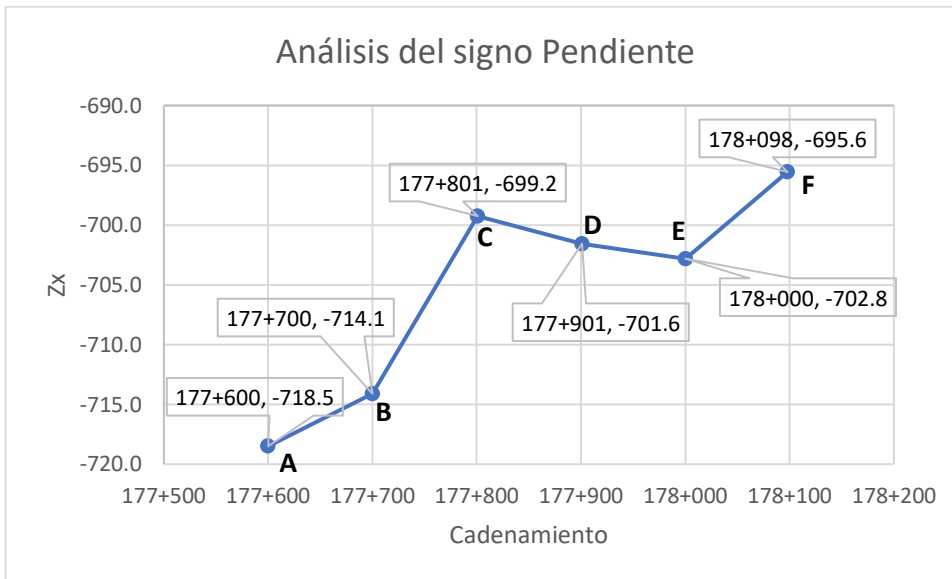


ILUSTRACIÓN 74 ANÁLISIS DE SIGNO PENDIENTE DE LA GRAFICA ZX. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se utiliza el concepto de signo pendiente entre dos puntos, es decir, La pendiente m de una recta que pasa a través de dos puntos (x_1, y_1) y (x_2, y_2) es:

ECUACIÓN 9 ECUACION DE LAPENDIENTE DE UNA RECTA CON DOS PUNTOS

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Si $m > 0$ entonces la pendiente es positiva y el signo pendiente se asigna como +1 en caso de que $m < 0$ el signo pendiente se asigna como -1 luego entonces se identifica los cambios de pendiente cuando hay un cambio en el signo pendiente.

La proposición de las zonas homogéneas se hace en dos fases: Fase 1 (cambios grandes) considerando la suma de los siguientes $N_{\text{Fase 1}}$ signos pendiente de los $N_{\text{Fase 1}}$ ensayos de Deflexión si es positivo se le asigna +1 si es negativo se le asigna -1 y como Fase 2 (ajuste a detalle), los cuales identifican los subtramos homogéneos haciendo un análisis análogo de los $N_{\text{Fase 2}}$ para la Fase 1.

ZONAS HOMOGÉNEAS CARRIL DE BAJA

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Datos	Intervalo mínimo	Información
At 6482	km 1.0	Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-S11
Lp 15000	Fase 1 5	Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
F* 0.432110667	Fase 2 2	Tramo PIJIJAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)
Tipo de red	# Zonas Homogéneas 7	Cuerpo B Carril Izq (Baja)

No.	Cadenamiento	Deflexión normalizada	Distancia intervalo	Distancia acumulada	Promedio DN por intervalo	Área del intervalo	Área acumulada	Valor Zx	Signo de pendiente	Zonas homogéneas		
										Fase 1	Fase 2	Final
1	174+000	#N/D	-	-	-	-	-	0	-1	-1	-1	1
2	174+100	#N/D	100	100	0.000	0	0	-43.2	-1	-1	-1	1
3	174+200	#N/D	100	200	0.000	0	0	-86.4	-1	-1	-1	1
4	174+315	0.194	115	315	0.000	0	0	-136.1	-1	-1	-1	1
5	174+401	0.232	86	401	0.213	18	18	-154.9	-1	-1	-1	1
6	174+500	0.279	99	500	0.256	25	44	-172.4	-1	-1	-1	1
7	174+601	0.287	101	601	0.283	29	72	-187.5	-1	-1	-1	1
8	174+700	0.223	99	700	0.255	25	97	-205.0	-1	-1	-1	1
9	174+800	0.154	100	800	0.188	19	116	-229.4	-1	-1	-1	1
10	174+896	0.177	96	896	0.165	16	132	-255.0	-1	-1	-1	1
11	175+000	0.419	104	1000	0.298	31	163	-268.9	-1	-1	-1	1
12	175+098	0.480	98	1098	0.449	44	207	-267.2	1	-1	-1	1
13	175+180	0.469	82	1180	0.475	39	246	-263.7	1	-1	-1	1
14	175+300	#N/D	120	1300	0.000	0	246	-315.6	-1	-1	-1	1
15	175+400	#N/D	100	1400	0.000	0	246	-358.8	-1	-1	-1	1
16	175+500	#N/D	100	1500	0.000	0	246	-402.0	-1	-1	-1	1
17	175+600	0.558	100	1600	0.000	0	246	-445.2	-1	-1	-1	1
18	175+699	0.784	99	1699	0.671	66	313	-421.5	1	-1	-1	1
19	175+800	#N/D	101	1800	0.000	0	313	-465.2	-1	-1	-1	1
20	175+900	0.225	100	1900	0.000	0	313	-508.4	-1	-1	-1	1
21	175+998	0.386	98	1998	0.305	30	343	-520.8	-1	-1	-1	1
22	176+102	0.393	104	2102	0.389	41	383	-525.3	-1	-1	-1	1
23	176+201	0.282	99	2201	0.338	33	416	-534.6	-1	-1	-1	1
24	176+300	0.188	99	2300	0.235	23	440	-554.1	-1	-1	-1	1
25	176+400	#N/D	100	2400	0.000	0	440	-597.3	-1	-1	-1	1
26	176+500	#N/D	100	2500	0.000	0	440	-640.5	-1	-1	-1	1
27	176+600	#N/D	100	2600	0.000	0	440	-683.7	-1	-1	-1	1
28	176+700	#N/D	100	2700	0.000	0	440	-726.9	-1	-1	-1	1
29	176+814	0.452	114	2814	0.000	0	440	-776.2	-1	1	1	1
30	176+901	0.543	87	2901	0.497	43	483	-770.5	1	1	1	2
31	177+001	0.561	100	3001	0.552	55	538	-758.6	1	1	1	2
32	177+099	0.350	98	3099	0.455	45	583	-756.3	1	1	1	2
33	177+202	0.670	103	3202	0.510	53	635	-748.3	1	1	1	2
34	177+299	0.533	97	3299	0.602	58	694	-731.8	1	1	1	2
35	177+397	0.446	98	3397	0.490	48	742	-726.2	1	1	1	2
36	177+500	0.564	103	3500	0.505	52	794	-718.7	1	1	1	2
37	177+600	0.304	100	3600	0.434	43	837	-718.5	1	1	1	2
38	177+700	0.648	100	3700	0.476	48	885	-714.1	1	1	1	2
39	177+801	0.511	101	3801	0.579	59	943	-699.2	1	1	1	2
40	177+901	0.307	100	3901	0.409	41	984	-701.6	-1	1	1	2
41	178+000	0.532	99	4000	0.420	42	1026	-702.8	-1	1	1	2
42	178+098	0.481	98	4098	0.506	50	1075	-695.6	1	1	1	2
43	178+202	0.536	104	4202	0.508	53	1128	-687.6	1	1	1	2
44	178+301	0.799	99	4301	0.668	66	1194	-664.3	1	1	1	88

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Datos	Intervalo mínimo	Información
At 6482	km 1.0	Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-S11
Lp 15000	Fase 1 5	Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
F* 0.432110667	Fase 2 2	Tramo PIJIJAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)
Tipo de red	# Zonas Homogéneas 7	Cuerpo B Carril Izq (Baja)

No.	Cadenamiento	Deflexión normalizada	Distancia intervalo	Distancia acumulada	Promedio DN por intervalo	Área del intervalo	Área acumulada	Valor Zx	Signo de pendiente	Zonas homogéneas		
										Fase 1	Fase 2	Final
45	178+400	0.869	99	4400	0.834	83	1277	-624.5	1	1	1	3
46	178+500	#N/D	100	4500	0.000	0	1277	-667.7	-1	1	1	3
47	178+598	0.509	98	4598	0.000	0	1277	-710.1	-1	1	1	3
48	178+698	0.499	100	4698	0.504	50	1327	-702.9	1	1	1	3
49	178+799	0.957	101	4799	0.728	74	1401	-673.0	1	1	1	3
50	178+897	0.781	98	4897	0.869	85	1486	-630.2	1	1	1	3
51	178+997	0.856	100	4997	0.819	82	1568	-591.5	1	1	1	3
52	179+098	0.558	101	5098	0.707	71	1639	-563.7	1	1	1	3
53	179+200	0.642	102	5200	0.600	61	1700	-546.7	1	1	1	3
54	179+305	0.553	105	5305	0.597	63	1763	-529.3	1	1	1	3
55	179+399	0.735	94	5399	0.644	61	1824	-509.4	1	1	1	3
56	179+483	0.635	84	5483	0.685	58	1881	-488.2	1	1	1	3
57	179+600	#N/D	117	5600	0.000	0	1881	-538.7	-1	1	1	3
58	179+697	0.426	97	5697	0.000	0	1881	-580.6	-1	1	1	3
59	179+797	0.471	100	5797	0.449	45	1926	-579.0	1	1	1	3
60	179+900	0.851	103	5900	0.661	68	1994	-555.4	1	1	1	3
61	179+998	0.918	98	5998	0.884	87	2081	-511.1	1	1	1	3
62	180+099	0.674	101	6099	0.796	80	2161	-474.3	1	1	1	3
63	180+199	0.499	100	6199	0.586	59	2220	-458.9	1	1	1	3
64	180+299	0.498	100	6299	0.499	50	2270	-452.3	1	1	1	3
65	180+401	0.253	102	6401	0.376	38	2308	-458.0	-1	1	1	4
66	180+502	0.413	101	6502	0.333	34	2342	-468.1	-1	1	1	4
67	180+600	0.544	98	6600	0.478	47	2388	-463.6	1	1	1	4
68	180+700	0.590	100	6700	0.567	57	2445	-450.1	1	1	1	4
69	180+800	0.667	100	6800	0.629	63	2508	-430.4	1	1	1	4
70	180+900	0.640	100	6900	0.654	65	2573	-408.3	1	1	1	4
71	181+000	0.658	100	7000	0.649	65	2638	-386.6	1	1	1	4
72	181+043	0.481	43	7043	0.570	24	2663	-380.6	1	1	1	4
73	181+244	0.600	201	7244	0.540	109	2771	-358.9	1	1	1	4
74	181+297	0.449	53	7297	0.525	28	2799	-354.0	1	1	1	4
75	181+400	0.393	103	7400	0.421	43	2842	-355.1	-1	1	1	4
76	181+501	0.529	101	7501	0.461	47	2889	-352.2	1	1	1	4
77	181+601	0.539	100	7601	0.534	53	2942	-342.0	1	1	1	4
78	181+699	0.541	98	7699	0.540	53	2995	-331.4	1	1	1	4
79	181+801	0.618	102	7801	0.579	59	3054	-316.4	1	1	1	4
80	181+899	0.531	98	7899	0.575	56	3111	-302.4	1	1	1	4
81	182+000	0.457	101	8000	0.494	50	3161	-296.2	1	1	1	4
82	182+097	0.457	97	8097	0.457	44	3205	-293.8	1	1	1	4
83	182+186	0.660	89	8186	0.559	50	3255	-282.5	1	1	1	4
84	182+325	0.518	139	8325	0.589	82	3337	-260.7	1	1	1	4
85	182+399	0.482	74	8399	0.500	37	3374	-255.7	1	1	1	4
86	182+502	0.617	103	8502	0.549	57	3430	-243.6	1	1	1	4
87	182+599	0.514	97	8599	0.566	55	3485	-230.6	1	1	1	4
88	182+701	0.532	102	8701	0.523	53	3538	-221.4	1	1	-1	89

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Datos	Intervalo mínimo	Información
At 6482	km 1.0	Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-S11
Lp 15000	Fase 1 5	Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
F* 0.432110667	Fase 2 2	Tramo PIJIJAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)
Tipo de red	# Zonas Homogéneas 7	Cuerpo B Carril Izq (Baja)

No.	Cadenamiento	Deflexión normalizada	Distancia intervalo	Distancia acumulada	Promedio DN por intervalo	Área del intervalo	Área acumulada	Valor Zx	Signo de pendiente	Zonas homogéneas		
										Fase 1	Fase 2	Final
89	182+806	0.486	105	8806	0.509	53	3592	-213.3	1	-1	-1	4
90	182+900	#N/D	94	8900	0.000	0	3592	-254.0	-1	-1	-1	5
91	183+000	#N/D	100	9000	0.000	0	3592	-297.2	-1	-1	-1	5
92	183+100	0.414	100	9100	0.000	0	3592	-340.4	-1	-1	-1	5
93	183+199	0.403	99	9199	0.409	40	3632	-342.7	-1	-1	-1	5
94	183+300	0.326	101	9300	0.365	37	3669	-349.5	-1	-1	-1	5
95	183+403	0.356	103	9403	0.341	35	3704	-359.0	-1	-1	-1	5
96	183+500	0.465	97	9500	0.410	40	3744	-361.1	-1	-1	-1	5
97	183+601	0.477	101	9601	0.471	48	3792	-357.2	1	-1	-1	5
98	183+701	0.345	100	9701	0.411	41	3833	-359.3	-1	-1	-1	5
99	183+799	0.364	98	9799	0.355	35	3867	-366.9	-1	-1	-1	5
100	183+901	0.288	102	9901	0.326	33	3901	-377.7	-1	1	1	5
101	184+000	0.577	99	10000	0.432	43	3943	-377.7	1	1	1	6
102	184+100	0.537	100	10100	0.557	56	3999	-365.2	1	1	1	6
103	184+200	0.604	100	10200	0.570	57	4056	-351.4	1	1	1	6
104	184+301	0.617	101	10301	0.611	62	4118	-333.4	1	1	1	6
105	184+400	0.521	99	10400	0.569	56	4174	-319.8	1	1	1	6
106	184+497	0.462	97	10497	0.492	48	4222	-314.0	1	1	1	6
107	184+600	0.692	103	10600	0.577	59	4281	-299.1	1	1	1	6
108	184+724	0.461	124	10724	0.576	71	4353	-281.3	1	1	1	6
109	184+800	0.473	76	10800	0.467	35	4388	-278.6	1	1	1	6
110	184+909	0.211	109	10909	0.342	37	4425	-288.5	-1	1	-1	6
111	185+000	0.508	91	11000	0.359	33	4458	-295.1	-1	-1	-1	6
112	185+100	0.738	100	11100	0.623	62	4520	-276.0	1	-1	-1	6
113	185+200	0.211	100	11200	0.475	47	4568	-271.8	1	-1	-1	6
114	185+300	0.236	100	11300	0.223	22	4590	-292.6	-1	-1	-1	6
115	185+403	0.260	103	11403	0.248	26	4616	-311.6	-1	-1	-1	6
116	185+500	0.493	97	11500	0.376	37	4652	-317.0	-1	1	1	6
117	185+600	0.692	100	11600	0.593	59	4712	-301.0	1	1	1	6
118	185+707	0.703	107	11707	0.698	75	4786	-272.5	1	1	1	6
119	185+800	0.517	93	11800	0.610	57	4843	-256.0	1	1	1	6
120	185+900	0.509	100	11900	0.513	51	4894	-248.0	1	1	1	6
121	186+000	0.566	100	12000	0.537	54	4948	-237.4	1	1	1	6
122	186+101	0.698	101	12101	0.632	64	5012	-217.2	1	1	1	6
123	186+201	0.417	100	12201	0.558	56	5068	-204.7	1	1	1	6
124	186+299	0.232	98	12299	0.325	32	5099	-215.2	-1	1	1	6
125	186+398	0.304	99	12398	0.268	26	5126	-231.5	-1	1	1	6
126	186+500	0.677	102	12500	0.490	50	5176	-225.5	1	1	1	6
127	186+601	0.581	101	12601	0.629	64	5239	-205.6	1	1	1	6
128	186+700	0.488	99	12700	0.535	53	5292	-195.5	1	1	1	6
129	186+801	0.594	101	12801	0.541	55	5347	-184.5	1	1	1	6
130	186+900	0.612	99	12900	0.603	60	5407	-167.6	1	1	1	6
131	186+997	0.592	97	12997	0.602	58	5465	-151.1	1	1	1	6
132	187+101	0.481	104	13101	0.537	56	5521	-140.2	1	1	1	90

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Datos		Intervalo mínimo		Información	
At	6482	km	1.0	Clave	Def-Arr-Tap-174000-189000-S11
Lp	15000	Fase 1	5	Carretera	ARRIAGA - TAPACHULA
F*	0.432110667	Fase 2	2	Tramo	PIJUJIAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)
Tipo de red		# Zonas Homogéneas	7	Cuerpo	B Carril Izq (Baja)

No.	Cadenamiento	Deflexión normalizada	Distancia intervalo	Distancia acumulada	Promedio DN por intervalo	Área del intervalo	Área acumulada	Valor Zx	Signo de pendiente	Zonas homogéneas		
										Fase 1	Fase 2	Final
133	187+199	0.547	98	13199	0.514	50	5571	-132.2	1	1	1	6
134	187+300	0.388	101	13300	0.468	47	5619	-128.6	1	1	1	6
135	187+401	0.562	101	13401	0.475	48	5666	-124.2	1	1	1	6
136	187+500	0.447	99	13500	0.504	50	5716	-117.1	1	1	1	7
137	187+601	0.886	101	13601	0.667	67	5784	-93.4	1	1	1	7
138	187+700	0.691	99	13700	0.789	78	5862	-58.1	1	1	1	7
139	187+795	0.668	95	13795	0.680	65	5926	-34.6	1	1	1	7
140	187+901	0.558	106	13901	0.613	65	5991	-15.4	1	1	1	7
141	187+999	0.679	98	13999	0.618	61	6052	2.8	1	1	1	7
142	188+095	0.448	96	14095	0.563	54	6106	15.4	1	1	1	7
143	188+201	0.344	106	14201	0.396	42	6148	11.6	-1	1	1	7
144	188+301	0.803	100	14301	0.573	57	6205	25.7	1	1	1	7
145	188+400	0.672	99	14400	0.738	73	6278	56.0	1	1	1	7
146	188+500	0.675	100	14500	0.674	67	6346	80.2	1	1	1	7
147	188+600	#N/D	100	14600	0.000	0	6346	36.9	-1	1	-1	7
148	188+696	0.647	96	14696	0.000	0	6346	-4.5	-1	-1	-1	7
149	188+798	0.291	102	14798	0.469	48	6394	-0.8	1	-1	-1	7
150	188+897	0.597	99	14897	0.444	44	6438	0.4	1	1	-1	7
151	189+000	0.260	103	15000	0.428	44	6482	0.0	-1	-1	-1	7

ZONAS HOMOGÉNEAS CARRIL DE ALTA

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Datos	Intervalo mínimo	Información
At 5750	km 1.0	Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-S11
Lp 15000	Fase 1 8	Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
F* 0.383362843	Fase 2 4	Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)
Tipo de red	# Zonas Homogéneas 8	Cuerpo B Carril Der (Alta)

No.	Cadenamiento	Deflexión normalizada	Distancia intervalo	Distancia acumulada	Promedio DN por intervalo	Área del intervalo	Área acumulada	Valor Zx	Signo de pendiente	Zonas homogéneas		
										Fase 1	Fase 2	Final
1	174+000	#N/D	-	-	-	-	-	0	-1	-1	-1	1
2	174+100	#N/D	100	100	0.000	0	0	-38.3	-1	-1	-1	1
3	174+200	#N/D	100	200	0.000	0	0	-76.7	-1	-1	-1	1
4	174+315	0.228	115	315	0.000	0	0	-120.8	-1	-1	-1	1
5	174+400	0.144	85	400	0.186	16	16	-137.6	-1	-1	-1	1
6	174+500	0.165	100	500	0.154	15	31	-160.5	-1	-1	-1	1
7	174+600	0.220	100	600	0.192	19	50	-179.6	-1	-1	-1	1
8	174+701	0.549	101	701	0.385	39	89	-179.4	1	-1	-1	1
9	174+801	0.202	100	801	0.376	38	127	-180.2	-1	-1	-1	1
10	174+900	0.301	99	900	0.251	25	152	-193.3	-1	-1	-1	1
11	175+001	0.575	101	1001	0.438	44	196	-187.8	1	-1	-1	1
12	175+104	0.790	103	1104	0.683	70	266	-156.9	1	-1	-1	1
13	175+177	0.378	73	1177	0.584	43	309	-142.3	1	-1	-1	1
14	175+300	#N/D	123	1300	0.000	0	309	-189.5	-1	-1	-1	1
15	175+400	#N/D	100	1400	0.000	0	309	-227.8	-1	-1	-1	1
16	175+500	#N/D	100	1500	0.000	0	309	-266.1	-1	-1	-1	1
17	175+600	0.590	100	1600	0.000	0	309	-304.5	-1	-1	-1	1
18	175+701	0.465	101	1701	0.527	53	362	-289.9	1	-1	-1	1
19	175+803	0.159	102	1803	0.312	32	394	-297.2	-1	-1	-1	1
20	175+900	#N/D	97	1900	0.000	0	394	-334.4	-1	-1	-1	1
21	176+000	0.235	100	2000	0.000	0	394	-372.7	-1	-1	-1	1
22	176+101	0.284	101	2101	0.260	26	420	-385.2	-1	-1	-1	1
23	176+198	0.144	97	2198	0.214	21	441	-401.6	-1	-1	-1	1
24	176+299	0.201	101	2299	0.172	17	458	-422.9	-1	-1	-1	1
25	176+400	#N/D	101	2400	0.000	0	458	-461.7	-1	-1	-1	1
26	176+500	#N/D	100	2500	0.000	0	458	-500.0	-1	-1	-1	1
27	176+600	#N/D	100	2600	0.000	0	458	-538.3	-1	-1	-1	1
28	176+700	#N/D	100	2700	0.000	0	458	-576.7	-1	-1	1	1
29	176+818	0.695	118	2818	0.000	0	458	-621.9	-1	1	1	1
30	176+903	0.478	85	2903	0.587	50	508	-604.6	1	1	1	2
31	177+004	0.476	101	3004	0.477	48	556	-595.2	1	1	1	2
32	177+101	0.253	97	3101	0.365	35	592	-597.0	-1	1	1	2
33	177+201	0.533	100	3201	0.393	39	631	-596.0	1	1	1	2
34	177+302	0.546	101	3302	0.540	55	686	-580.2	1	1	1	2
35	177+402	0.339	100	3402	0.443	44	730	-574.2	1	1	1	2
36	177+499	0.366	97	3499	0.353	34	764	-577.2	-1	1	1	2
37	177+601	0.400	102	3601	0.383	39	803	-577.3	-1	1	1	2
38	177+703	0.502	102	3703	0.451	46	849	-570.4	1	1	1	2
39	177+801	0.452	98	3801	0.477	47	896	-561.2	1	1	1	2
40	177+902	0.614	101	3902	0.533	54	950	-546.1	1	1	1	2
41	178+000	0.586	98	4000	0.600	59	1009	-524.9	1	1	1	2
42	178+103	0.411	103	4103	0.498	51	1060	-513.0	1	1	1	2
43	178+198	0.457	95	4198	0.434	41	1101	-508.2	1	1	1	2
44	178+297	0.499	99	4297	0.478	47	1148	-498.9	1	1	1	92

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Datos	Intervalo mínimo	Información
At 5750	km 1.0	Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-S11
Lp 15000	Fase 1 8	Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
F* 0.383362843	Fase 2 4	Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)
Tipo de red	# Zonas Homogéneas 8	Cuerpo B Carril Der (Alta)

No.	Cadenamiento	Deflexión normalizada	Distancia intervalo	Distancia acumulada	Promedio DN por intervalo	Área del intervalo	Área acumulada	Valor Zx	Signo de pendiente	Zonas homogéneas		
										Fase 1	Fase 2	Final
45	178+405	0.596	108	4405	0.547	59	1208	-481.2	1	1	1	2
46	178+500	#N/D	95	4500	0.000	0	1208	-517.6	-1	1	1	3
47	178+600	0.721	100	4600	0.000	0	1208	-556.0	-1	1	1	3
48	178+699	0.353	99	4699	0.537	53	1261	-540.7	1	1	1	3
49	178+801	0.474	102	4801	0.414	42	1303	-537.6	1	1	1	3
50	178+900	0.700	99	4900	0.587	58	1361	-517.5	1	1	1	3
51	179+001	0.977	101	5001	0.838	85	1446	-471.6	1	1	1	3
52	179+100	0.480	99	5100	0.728	72	1518	-437.4	1	1	1	3
53	179+202	0.567	102	5202	0.523	53	1571	-423.2	1	1	1	3
54	179+301	0.662	99	5301	0.614	61	1632	-400.3	1	1	1	3
55	179+402	0.579	101	5402	0.621	63	1695	-376.3	1	1	1	3
56	179+483	0.732	81	5483	0.655	53	1748	-354.3	1	1	1	3
57	179+600	#N/D	117	5600	0.000	0	1748	-399.2	-1	1	1	3
58	179+701	0.439	101	5701	0.000	0	1748	-437.9	-1	1	1	3
59	179+801	0.609	100	5801	0.524	52	1800	-423.8	1	1	1	3
60	179+903	0.681	102	5903	0.645	66	1866	-397.1	1	1	1	3
61	180+000	0.923	97	6000	0.802	78	1944	-356.5	1	1	1	3
62	180+100	0.398	100	6100	0.661	66	2010	-328.7	1	1	1	4
63	180+201	0.391	101	6201	0.395	40	2050	-327.6	1	1	1	4
64	180+302	0.528	101	6302	0.459	46	2096	-319.9	1	1	1	4
65	180+400	0.443	98	6400	0.486	48	2144	-309.9	1	1	1	4
66	180+498	0.421	98	6498	0.432	42	2186	-305.1	1	1	1	4
67	180+600	0.566	102	6600	0.494	50	2236	-293.9	1	1	1	4
68	180+701	0.395	101	6701	0.481	49	2285	-284.1	1	1	1	4
69	180+801	0.516	100	6801	0.455	46	2330	-276.8	1	1	1	4
70	180+901	0.483	100	6901	0.500	50	2380	-265.2	1	1	1	4
71	181+000	0.583	99	7000	0.533	53	2433	-250.4	1	1	1	4
72	181+043	0.349	43	7043	0.466	20	2453	-246.8	1	1	1	4
73	181+244	0.299	201	7244	0.324	65	2518	-258.8	-1	1	1	4
74	181+303	0.422	59	7303	0.361	21	2540	-260.1	-1	1	1	4
75	181+402	0.492	99	7402	0.457	45	2585	-252.8	1	1	1	4
76	181+506	0.447	104	7506	0.469	49	2634	-243.9	1	1	1	4
77	181+602	0.434	96	7602	0.440	42	2676	-238.4	1	1	1	4
78	181+701	0.556	99	7701	0.495	49	2725	-227.3	1	1	1	4
79	181+802	0.389	101	7802	0.473	48	2773	-218.3	1	1	1	4
80	181+901	0.448	99	7901	0.419	41	2814	-214.8	1	1	1	4
81	182+000	0.443	99	8000	0.445	44	2858	-208.7	1	1	1	4
82	182+101	0.399	101	8101	0.421	43	2901	-204.9	1	1	1	4
83	182+174	0.582	73	8174	0.491	36	2937	-197.0	1	1	1	4
84	182+325	0.414	151	8325	0.498	75	3012	-179.7	1	1	1	4
85	182+399	0.412	74	8399	0.413	31	3042	-177.5	1	1	-1	4
86	182+501	0.452	102	8501	0.432	44	3086	-172.6	1	1	-1	4
87	182+599	0.360	98	8599	0.406	40	3126	-170.3	1	-1	-1	4
88	182+701	0.449	102	8701	0.404	41	3167	-168.2	1	-1	-1	93

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Datos	Intervalo mínimo	Información
At 5750	km 1.0	Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-S11
Lp 15000	Fase 1 8	Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
F* 0.383362843	Fase 2 4	Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)
Tipo de red	# Zonas Homogéneas 8	Cuerpo B Carril Der (Alta)

No.	Cadenamiento	Deflexión normalizada	Distancia intervalo	Distancia acumulada	Promedio DN por intervalo	Área del intervalo	Área acumulada	Valor Zx	Signo de pendiente	Zonas homogéneas		
										Fase 1	Fase 2	Final
89	182+799	0.399	98	8799	0.424	42	3209	-164.2	1	-1	-1	4
90	182+900	#N/D	101	8900	0.000	0	3209	-202.9	-1	-1	-1	5
91	183+000	#N/D	100	9000	0.000	0	3209	-241.3	-1	-1	-1	5
92	183+100	0.404	100	9100	0.000	0	3209	-279.6	-1	-1	-1	5
93	183+200	0.362	100	9200	0.383	38	3247	-279.7	-1	-1	-1	5
94	183+299	0.345	99	9299	0.353	35	3282	-282.6	-1	-1	-1	5
95	183+399	0.381	100	9399	0.363	36	3319	-284.7	-1	-1	-1	5
96	183+500	0.394	101	9500	0.387	39	3358	-284.3	1	-1	-1	5
97	183+596	0.504	96	9596	0.449	43	3401	-278.0	1	-1	-1	5
98	183+700	0.330	104	9700	0.417	43	3444	-274.5	1	-1	-1	5
99	183+802	0.279	102	9802	0.304	31	3475	-282.6	-1	-1	-1	5
100	183+898	0.290	96	9898	0.285	27	3502	-292.0	-1	-1	1	5
101	184+000	0.368	102	10000	0.329	34	3536	-297.6	-1	1	1	5
102	184+100	0.446	100	10100	0.407	41	3577	-295.3	1	1	1	5
103	184+200	0.285	100	10200	0.365	37	3613	-297.1	-1	1	1	5
104	184+302	0.527	102	10302	0.406	41	3655	-294.7	1	1	1	6
105	184+404	0.491	102	10404	0.509	52	3707	-281.9	1	1	1	6
106	184+503	0.431	99	10503	0.461	46	3752	-274.2	1	1	1	6
107	184+602	0.643	99	10602	0.537	53	3805	-259.0	1	1	1	6
108	184+700	0.492	98	10700	0.568	56	3861	-241.0	1	1	-1	6
109	184+799	0.593	99	10799	0.542	54	3915	-225.2	1	1	-1	6
110	184+898	0.364	99	10898	0.478	47	3962	-215.8	1	-1	-1	6
111	184+999	0.382	101	10999	0.373	38	4000	-216.9	-1	-1	-1	6
112	185+099	0.613	100	11099	0.497	50	4049	-205.5	1	-1	1	6
113	185+201	0.215	102	11201	0.414	42	4092	-202.4	1	1	1	6
114	185+299	0.287	98	11299	0.251	25	4116	-215.4	-1	1	1	6
115	185+400	0.250	101	11400	0.269	27	4143	-227.0	-1	1	1	6
116	185+503	0.321	103	11503	0.286	29	4173	-237.0	-1	1	1	6
117	185+600	0.660	97	11600	0.491	48	4220	-226.6	1	1	1	6
118	185+701	0.621	101	11701	0.641	65	4285	-200.6	1	1	1	6
119	185+800	0.502	99	11800	0.562	56	4341	-183.0	1	1	1	6
120	185+898	0.630	98	11898	0.566	55	4396	-165.1	1	1	1	6
121	186+000	0.583	102	12000	0.606	62	4458	-142.3	1	1	1	6
122	186+099	0.644	99	12099	0.613	61	4519	-119.6	1	1	1	6
123	186+200	0.278	101	12200	0.461	47	4565	-111.7	1	1	1	6
124	186+300	0.356	100	12300	0.317	32	4597	-118.4	-1	1	1	7
125	186+398	0.498	98	12398	0.427	42	4639	-114.1	1	1	1	7
126	186+501	0.401	103	12501	0.449	46	4685	-107.3	1	1	1	7
127	186+600	0.547	99	12600	0.474	47	4732	-98.4	1	1	1	7
128	186+699	0.381	99	12699	0.464	46	4778	-90.4	1	1	1	7
129	186+803	0.416	104	12803	0.399	41	4819	-88.8	1	1	1	7
130	186+902	0.447	99	12902	0.432	43	4862	-84.0	1	1	1	7
131	186+994	0.423	92	12994	0.435	40	4902	-79.3	1	1	1	7
132	187+102	0.412	108	13102	0.418	45	4947	-75.6	1	1	1	94

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Datos		Intervalo mínimo		Información	
At	5750	km	1.0	Clave	Def-Arr-Tap-144000-189000-S11
Lp	15000	Fase 1	8	Carretera	ARRIAGA - TAPACHULA
F*	0.383362843	Fase 2	4	Tramo	LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)
Tipo de red		# Zonas Homogéneas	8	Cuerpo	B Carril Der (Alta)

No.	Cadenamiento	Deflexión normalizada	Distancia intervalo	Distancia acumulada	Promedio DN por intervalo	Área del intervalo	Área acumulada	Valor Zx	Signo de pendiente	Zonas homogéneas		
										Fase 1	Fase 2	Final
133	187+197	0.384	95	13197	0.398	38	4985	-74.2	1	1	1	7
134	187+299	0.464	102	13299	0.424	43	5028	-70.1	1	1	1	7
135	187+400	0.426	101	13400	0.445	45	5073	-63.8	1	1	1	7
136	187+501	0.387	101	13501	0.407	41	5114	-61.5	1	1	1	8
137	187+600	0.578	99	13600	0.483	48	5162	-51.6	1	1	1	8
138	187+700	0.722	100	13700	0.650	65	5227	-25.0	1	1	1	8
139	187+798	0.499	98	13798	0.611	60	5287	-2.7	1	1	1	8
140	187+900	0.586	102	13900	0.543	55	5342	13.6	1	1	-1	8
141	187+999	0.691	99	13999	0.639	63	5406	38.9	1	1	-1	8
142	188+094	0.268	95	14094	0.479	46	5451	48.0	1	-1	-1	8
143	188+198	0.305	104	14198	0.287	30	5481	37.9	-1	-1	-1	8
144	188+302	0.444	104	14302	0.375	39	5520	37.0	-1	-1	-1	8
145	188+402	0.733	100	14402	0.589	59	5579	57.5	1	-1	-1	8
146	188+500	0.574	98	14500	0.654	64	5643	84.0	1	-1	-1	8
147	188+600	#N/D	100	14600	0.000	0	5643	45.7	-1	-1	-1	8
148	188+701	0.754	101	14701	0.000	0	5643	7.0	-1	-1	-1	8
149	188+801	0.266	100	14801	0.510	51	5694	19.6	1	-1	-1	8
150	188+898	0.333	97	14898	0.299	29	5723	11.5	-1	-1	-1	8
151	189+000	0.209	102	15000	0.271	28	5750	0.0	-1	-1	-1	8

Para realizar el análisis de la cuenca se consideran los índices estructurales mencionados en el apartado V, considerando la Deflexión normalizada 700 kPa, 20° C; [mm], Área normalizada [mm], Factor de forma (F2), Índice de Curvatura Superficial (SCI), Relación de deflexión (RD), Módulo de Rigidez Dinámico (MRD) kN/mm, Factores de forma: BLI, MLI, LLI, Índice Estructural (Orozco 2005)", Área Cuenca (Ie) mm², Calificación Según Área Calificación Ie (Orozco).

Se considera las siguientes calificaciones:

Para la evaluación de pavimento de acuerdo al área de la cuenca se utiliza la propuesta por Orozco (2005).

Área (mm ²)	Condición	Calificación
0 a 100	Excelente	10
100 a 200	Muy bueno	9
200 a 400	Bueno	8
400 a 800	Regular	7
800 a 1600	Malo	6
Mayor a 1600	Pésimo	5

Fuente: Orozco (2005)

Para la evaluación del camino con el analizando el punto de inflexión de la cuenca Se utiliza el propuesto por Orozco (2005)

Ie	Calificación	Condición	Solución
0.0 a 0.05	10	Excelente	Tratamiento superficial
0.05 a 0.1	9	Muy buena	Tratamiento superficial
0.1 a 0.2	8	Buena	Reforzamiento
0.2 a 0.3	7	Regular	Reforzamiento
0.3 a 0.4	6	Mala	Recuperación <i>in situ</i>
> 0.4	5	Pésima	Recuperación <i>in situ</i>

Fuente: Orozco (2005)

Y finalmente para evaluar las capas se utiliza la propuesta de Horack y Emery (2006)

Tabla 4. Rangos de valores de índices estructurales

	Cond.	Dmáx(mm)	RoC	BLI(mm)	MLI(mm)	LLI(mm)
BG	A	< 0.5	> 0.1	< 0.2	< 0.1	< 0.05
	R	0.5-0.75	0.05-0.1	0.2-0.4	0.1-0.2	0.05-0.1
	G	> 0.75	< 0.05	> 0.4	> 0.2	> 0.1
BC	A	< 0.2	> 0.15	< 0.1	< 0.05	< 0.04
	R	0.2-0.4	0.08-0.15	0.1-0.3	0.05-0.1	0.04-0.08
	G	> 0.4	< 0.08	> 0.3	> 0.1	> 0.08

BG: Base Granular; BC: Base Cementada; A: Adecuada; R: Riesgo; G: Grave

Fuente: adaptada de Horak y Emery (2006)

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Información

Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-S11
 Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo PIJUJIAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Izq (Baja)

No.	Cadenamiento	Deflexión normalizada 700 kPa, 20° C, [mm]										Área normalizada (mm ²)	Factor de forma (F2)	Índice de Curvatura Superficial (SCI)	Relación de deflexión (RD)	Módulo de Rigidez Dinámico (MRD) kN/mm	Factores de forma			Índice Estructural (Orozco, 2005)	Área Cuadrada (Ie) mm ²	Calificación Según Área	Calificación Ie (Orozco)
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	BLI						MLI	LLI					
		0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800													
149	188+798	0.291	0.000	0.165	0.121	0.093	0.063	0.044	0.000	0.028	448.35	0.35	0.13	0.57	181.41	0.13	0.07	0.03	0.16	125.22	9.00	8.00	
150	188+897	0.597	0.000	0.335	0.245	0.185	0.117	0.077	0.000	0.046	440.92	0.37	0.26	0.56	85.65	0.26	0.15	0.07	0.30	244.93	8.00	7.00	
151	189+000	0.260	0.000	0.121	0.083	0.057	0.030	0.018	0.000	0.008	373.64	0.35	0.14	0.47	201.99	0.14	0.06	0.03	0.10	81.95	10.00	8.00	

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Información

Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-S11

Carretera ARRIAGA - TAPACHULA

Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SURTAPACHULA (CPO. B)

Cuerpo B Carril Der (Alta)

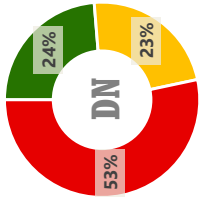
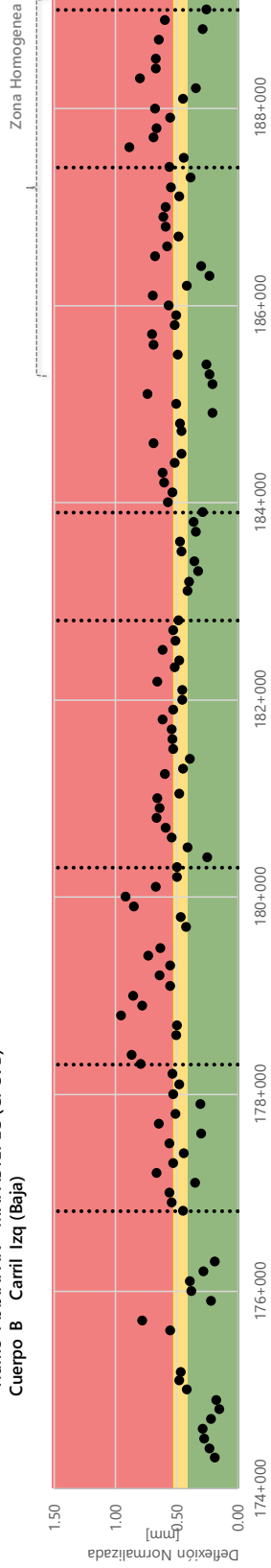
No.	Cadenamiento	Deflexión normalizada 700 kPa, 20° C, [mm]										Área normalizada (mm ²)	Factor de forma (F2)	Índice de Curvatura Superficial (SCI)	Relación de deflexión (RD)	Módulo de Rigidez Dinámico (MRD) kN/mm	Factores de forma			Índice Estructural (Orozco, 2005)	Área Cuadrada (Ie) mm ²	Calificación Según Área	Calificación Ie (Orozco)
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	BLI						MLI	LLI					
		0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800													
149	188+801	0.266	0.000	0.137	0.100	0.077	0.055	0.040	0.000	0.027	421.84	0.31	0.13	0.51	204.39	0.13	0.06	0.02	0.15	108.42	9.00	8.00	
150	188+898	0.333	0.000	0.205	0.167	0.135	0.097	0.071	0.000	0.041	500.71	0.32	0.13	0.62	163.44	0.13	0.07	0.04	0.20	171.22	9.00	7.00	
151	189+000	0.209	0.000	0.088	0.056	0.039	0.021	0.012	0.000	0.008	346.62	0.32	0.12	0.42	262.68	0.12	0.05	0.02	0.08	60.04	10.00	9.00	

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

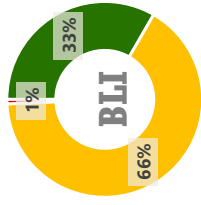
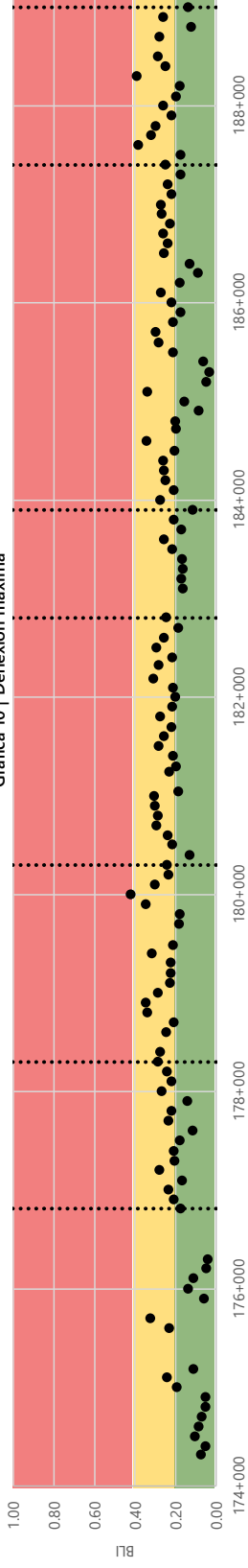
Información
 Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-511
 Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo PIJUIAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Izq (Baja)

Indicadores Derivados de las Pruebas de Deflexion

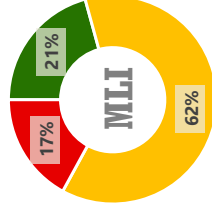
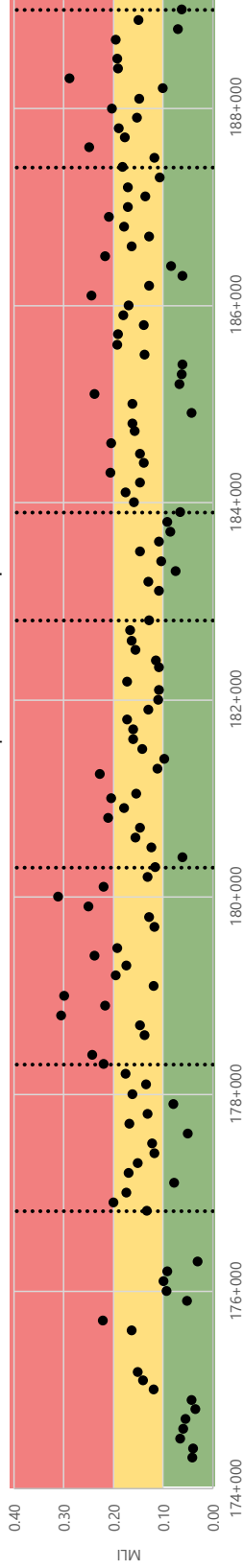
FACTORES DE FORMA CARRIL DE BAJA



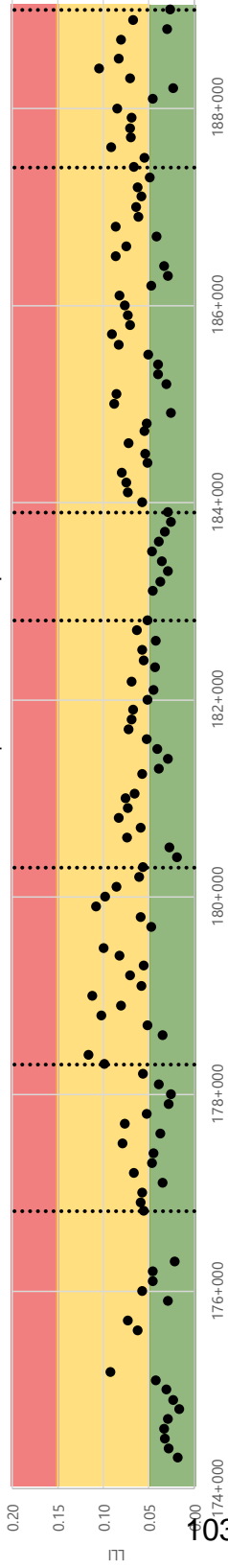
Gráfica 10 | Deflexión máxima



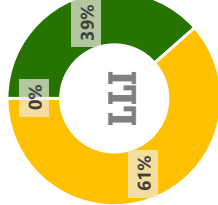
Gráfica 11 | BLI - Índice de la capa base



Gráfica 12 | MLI - Índice de la capa media



Gráfica 13 | LLI - Índice de la capa más baja



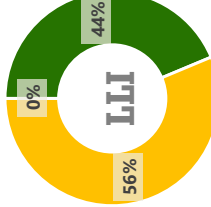
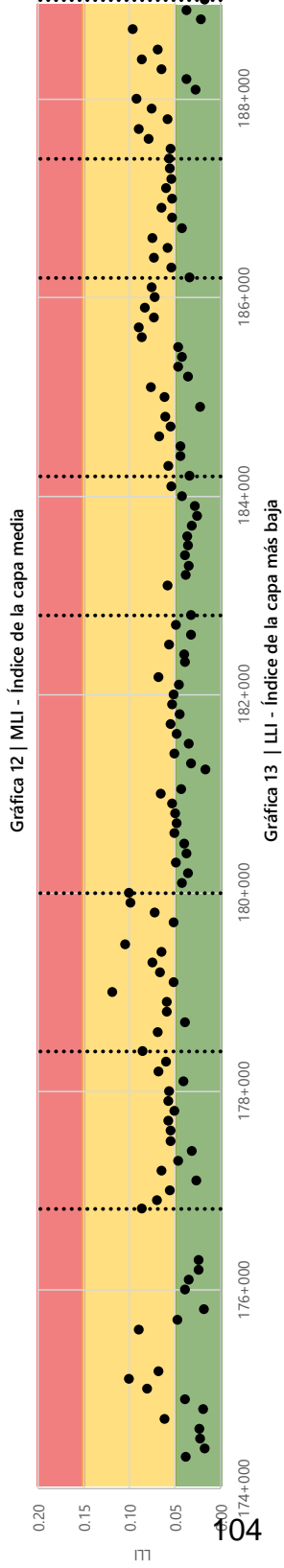
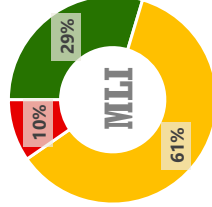
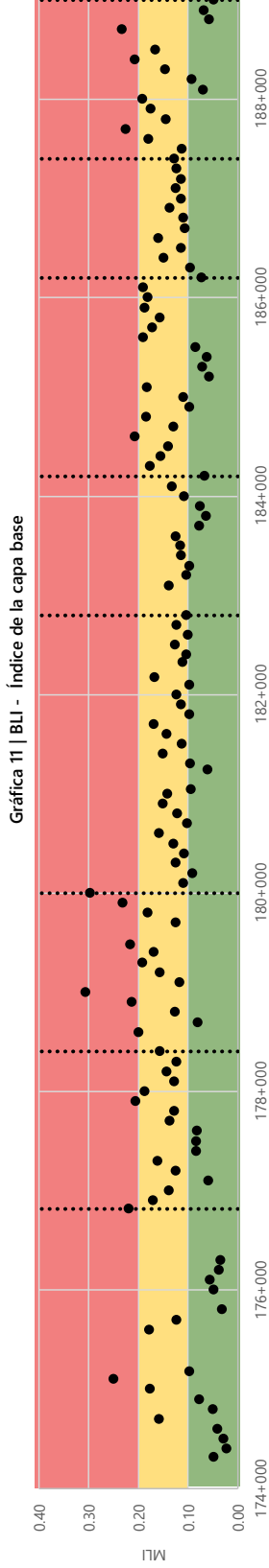
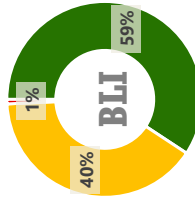
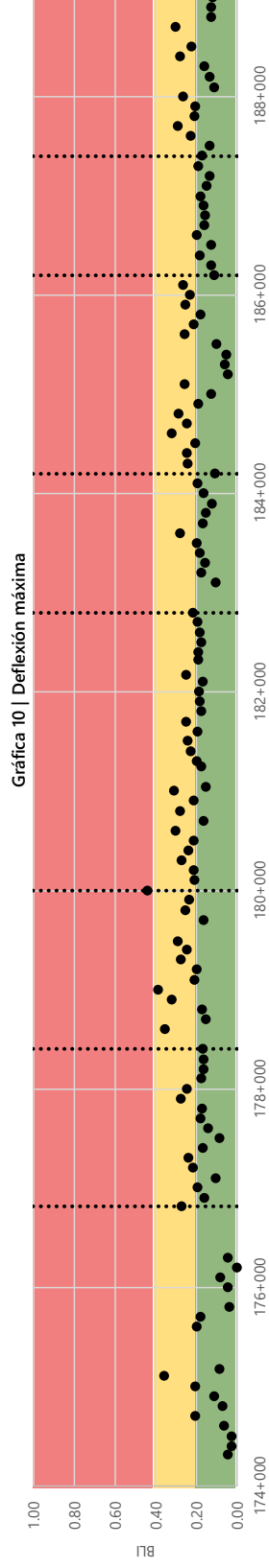
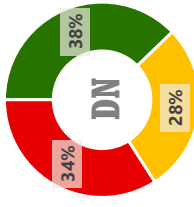
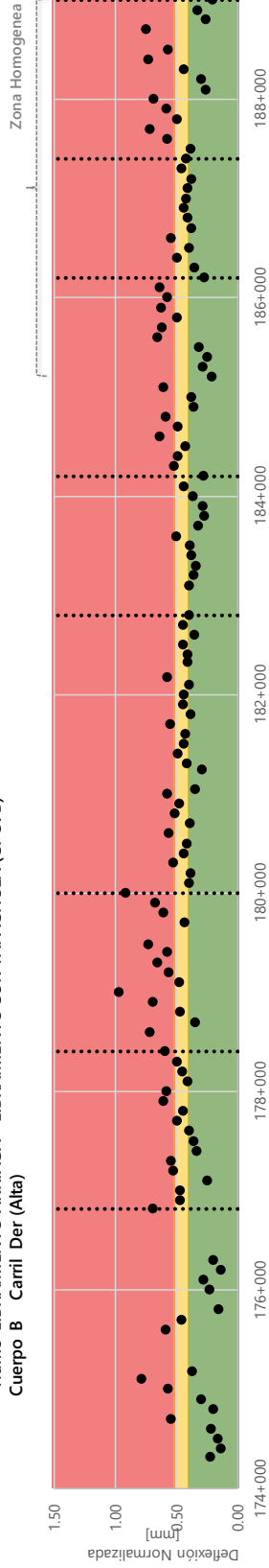
Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Indicadores Derivados de las Pruebas de Deflexión

Información

Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-511
 Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Der (Alta)

FACTORES DE FORMA CARRIL DE ALTA



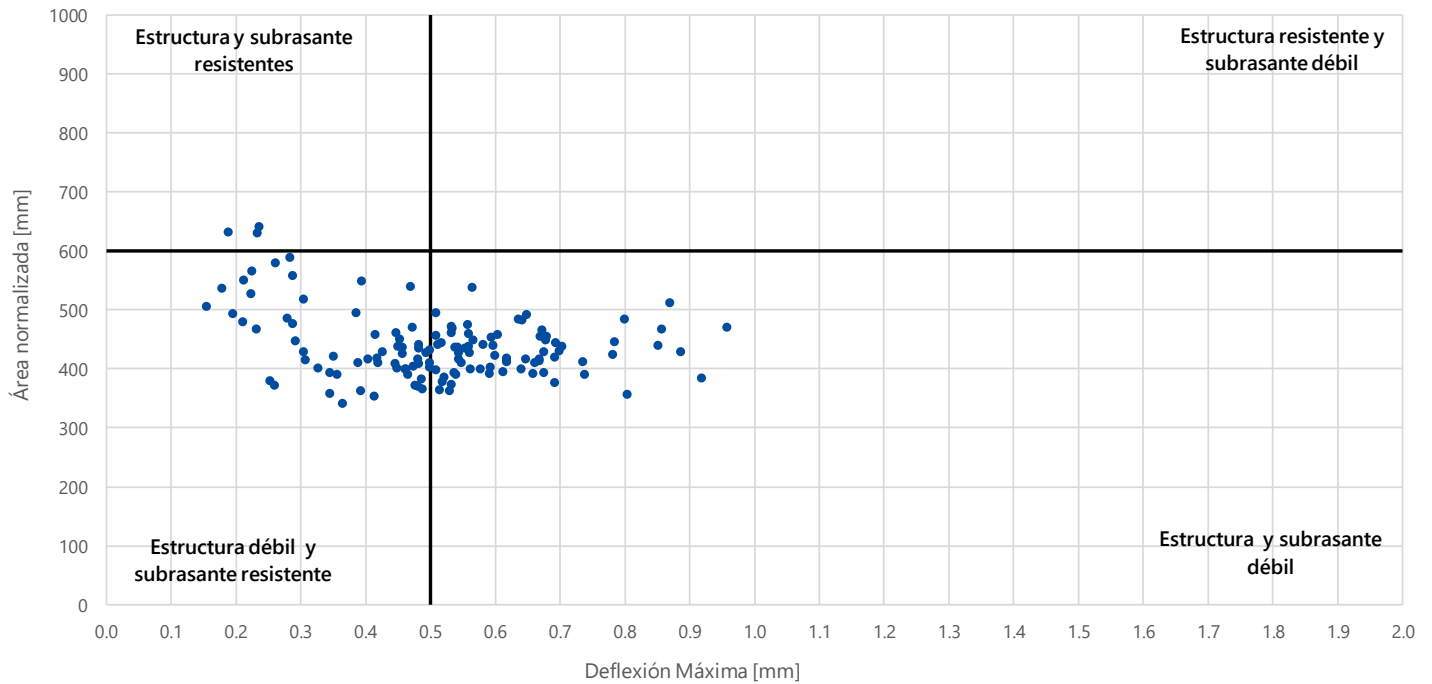
GRAFICAS INDICES ESTRUCTURALES CARRIL DE BAJA

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

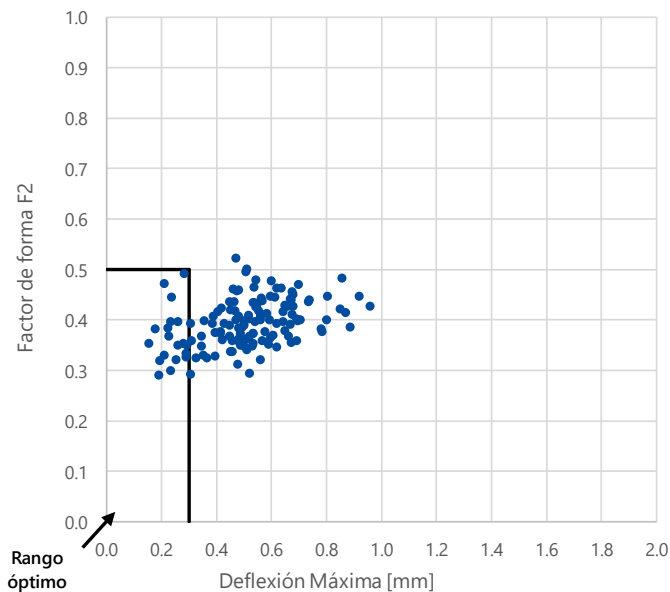
Información

Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-S11
 Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo PIJJIAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Izq (Baja)

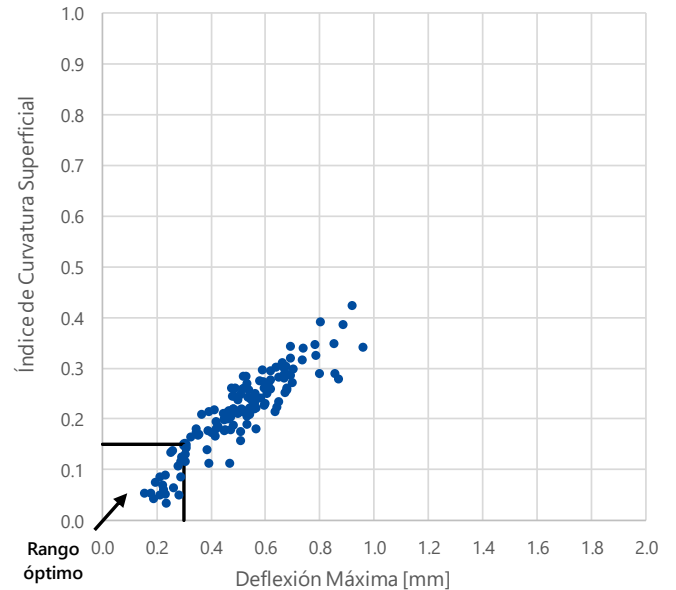
Indicadores Derivados de las Pruebas de Deflexion



Gráfica 1 | Área normalizada - Deflexión Máxima



Gráfica 2 | Relación Factor de forma - Deflexión Máxima



Gráfica 3 | Índice de curvatura superficial - Deflexión Máxima

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Información

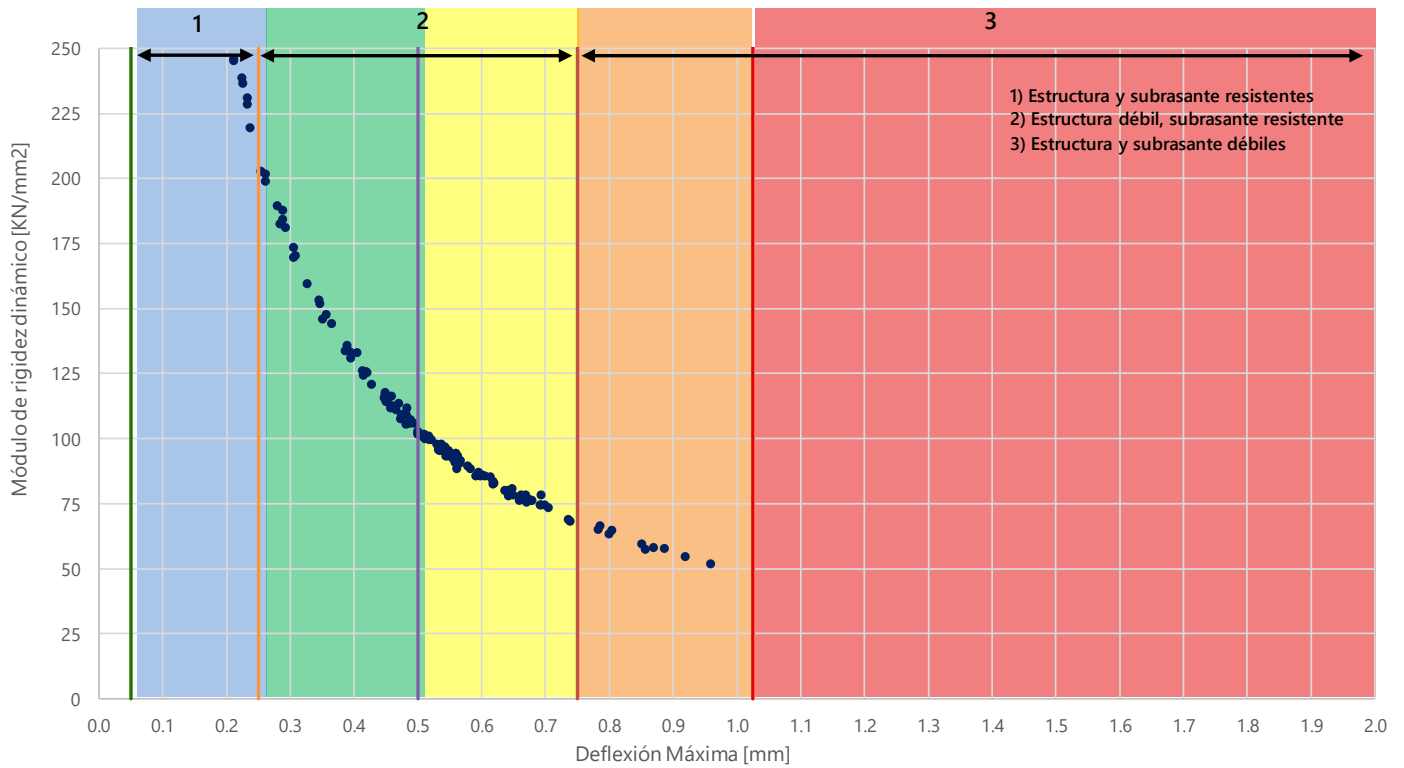
Indicadores Derivados de las Pruebas de Deflexion

Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-S11

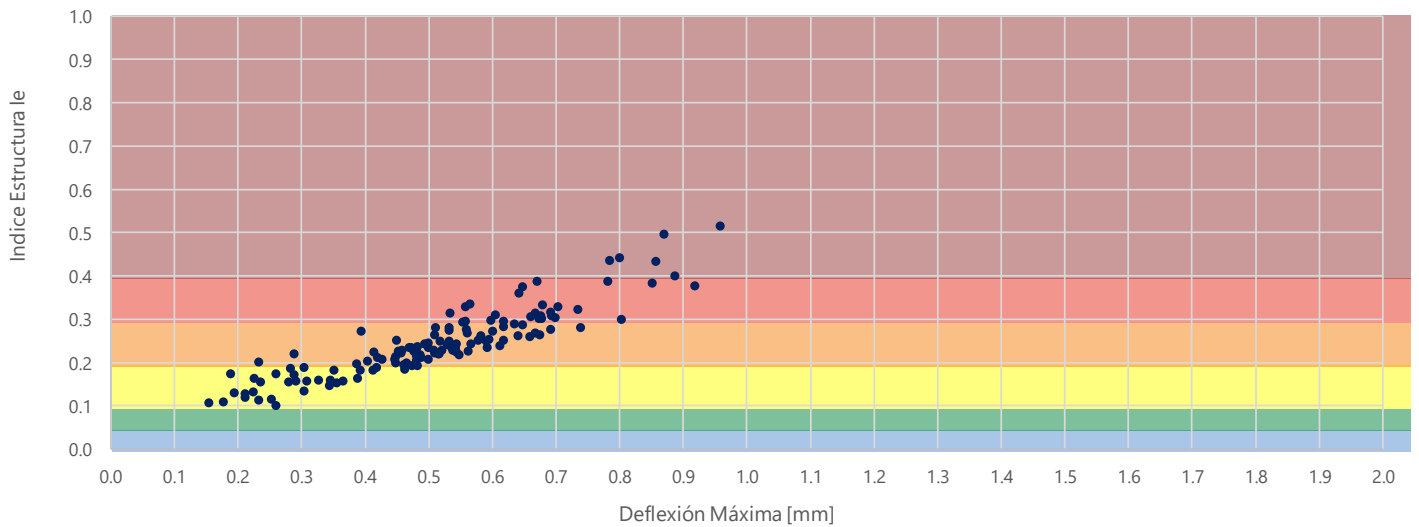
Carretera ARRIAGA - TAPACHULA

Tramo PIJJIAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)

Cuerpo B Carril Izq (Baja)



Gráfica 4 | Módulo de Rigidez Dinámico - Deflexión Máxima



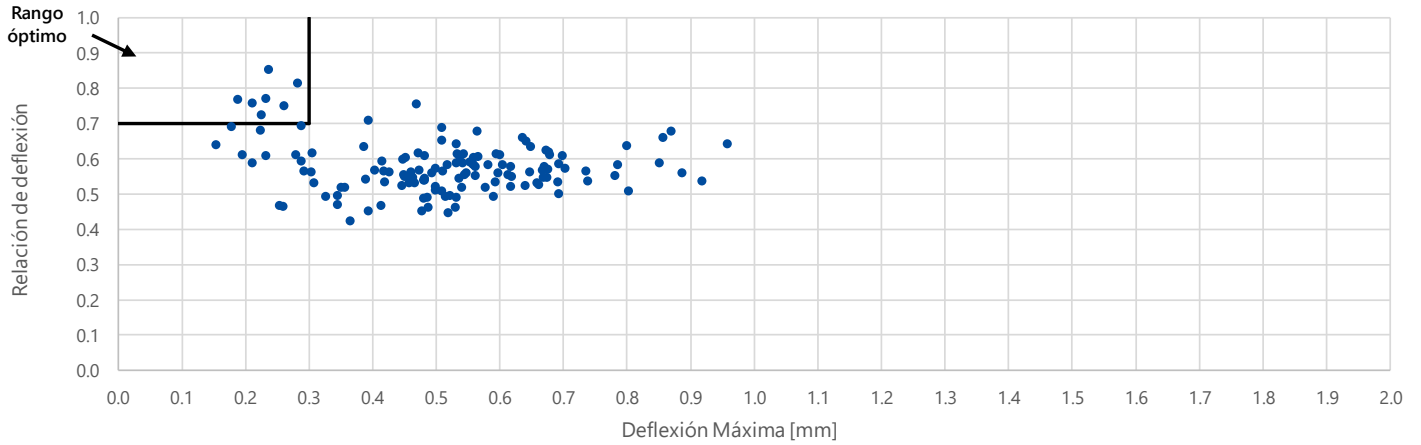
Gráfica 5 | Índice Estructural - Deflexión Máxima

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

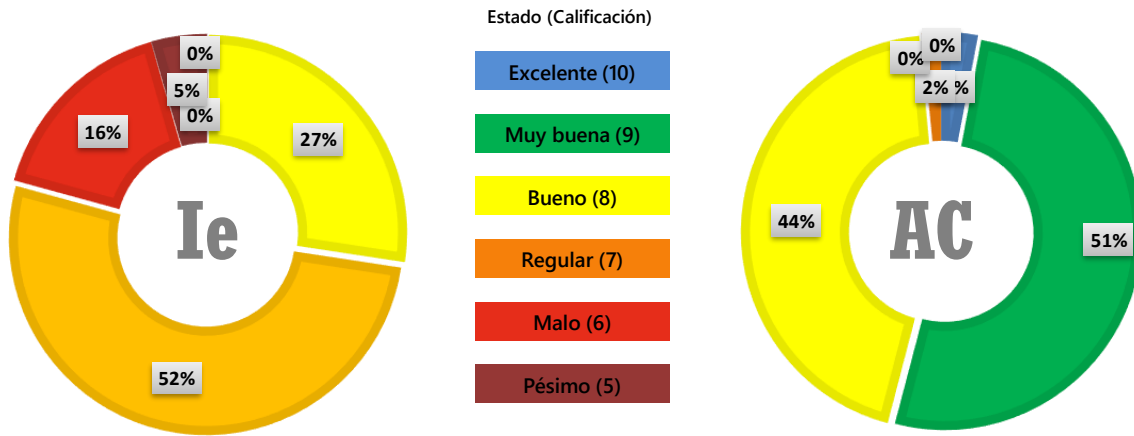
Información

Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-S11
 Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo PIJJIAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Izq (Baja)

Indicadores Derivados de las Pruebas de Deflexion

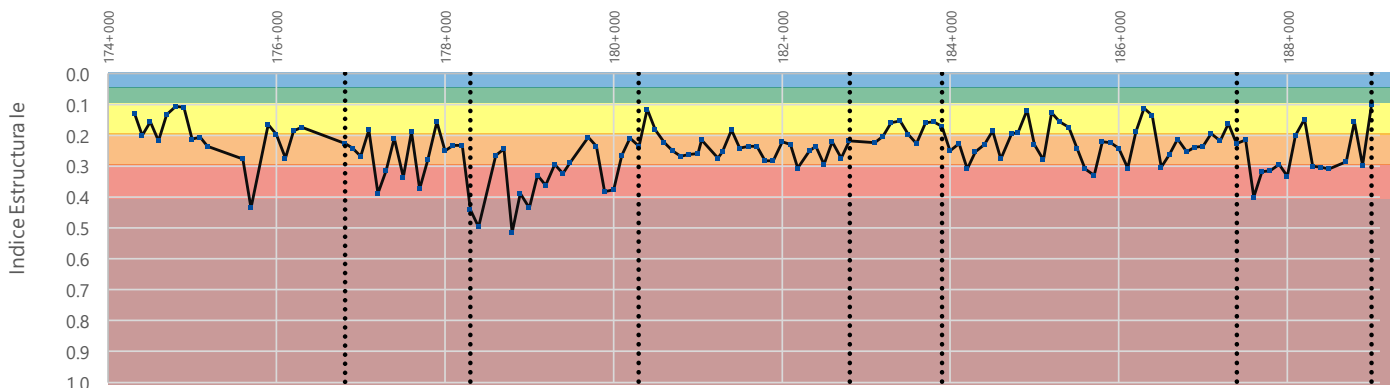


Gráfica 6 | Relación de deflexión - Deflexión Máxima



Gráfica 7 | Estado según Índice Estructural (Orozco 2005)

Gráfica 8 | Estado según Area de la cuenca (Orozco 2005)



Gráfica 9 | Índice Estructural Puntual (Orozco 2005)

GRÁFICAS INDICES ESTRUCTURALES CARRIL DE ALTA

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Información

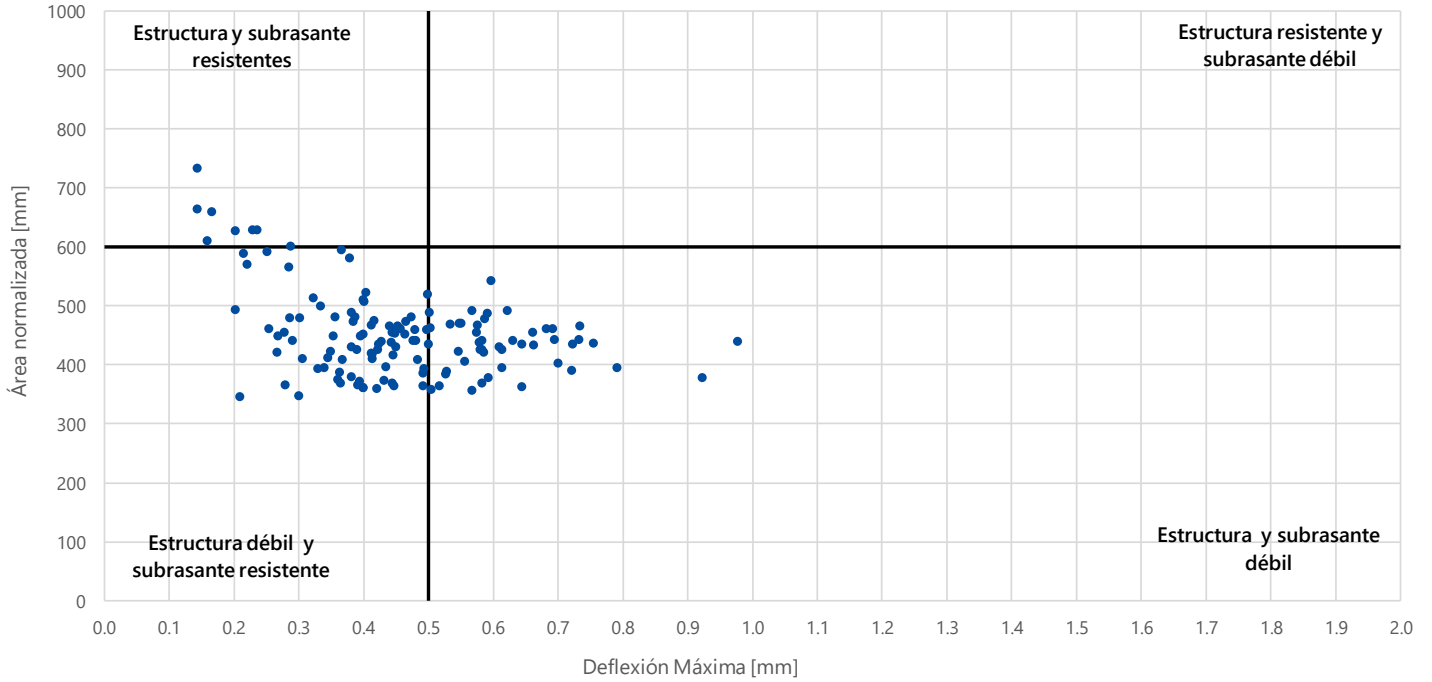
Indicadores Derivados de las Pruebas de Deflexion

Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-S11

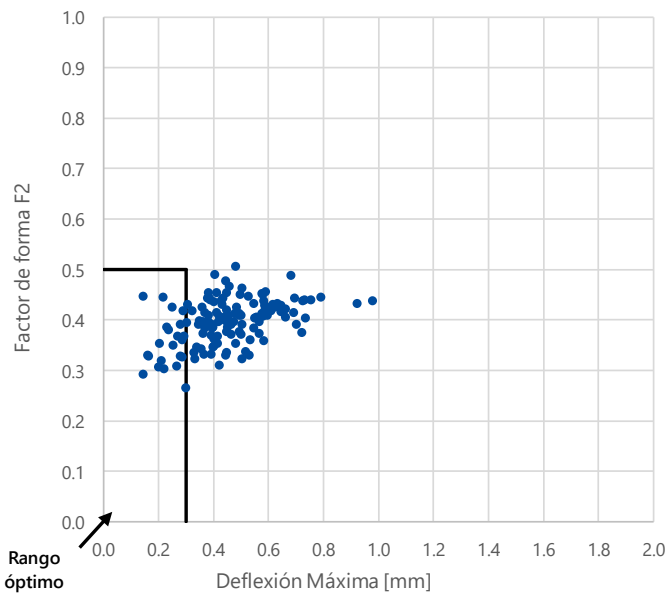
Carretera ARRIAGA - TAPACHULA

Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)

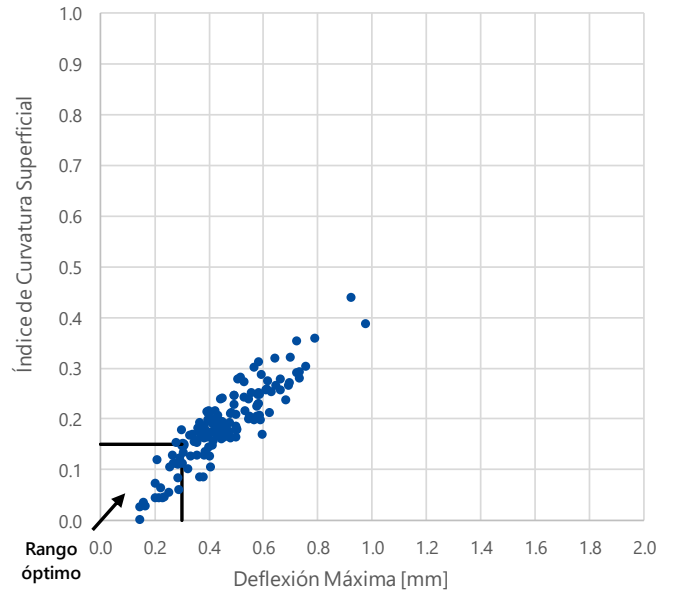
Cuerpo B Carril Der (Alta)



Gráfica 1 | Área normalizada - Deflexión Máxima



Gráfica 2 | Relación Factor de forma - Deflexión Máxima



Gráfica 3 | Índice de curvatura superficial - Deflexión Máxima

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Información

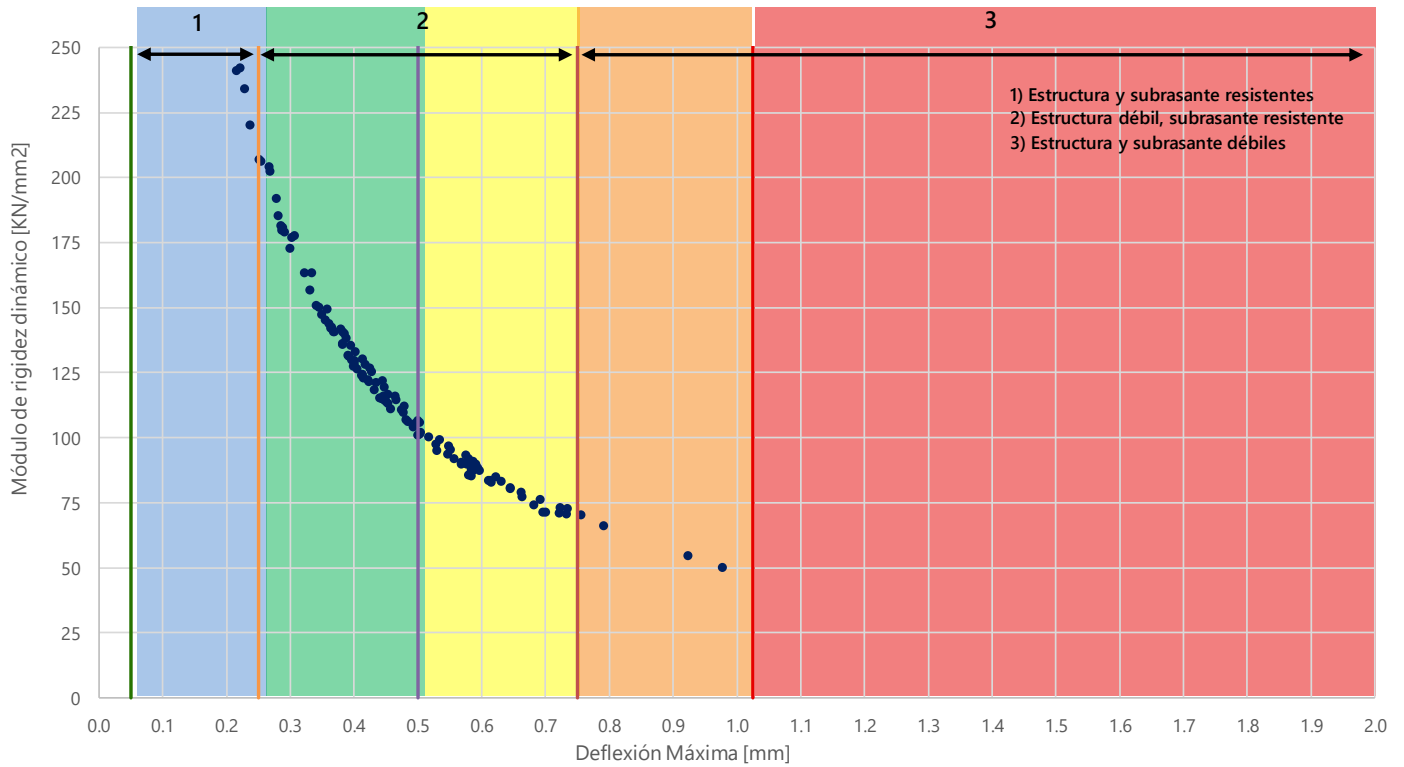
Indicadores Derivados de las Pruebas de Deflexion

Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-S11

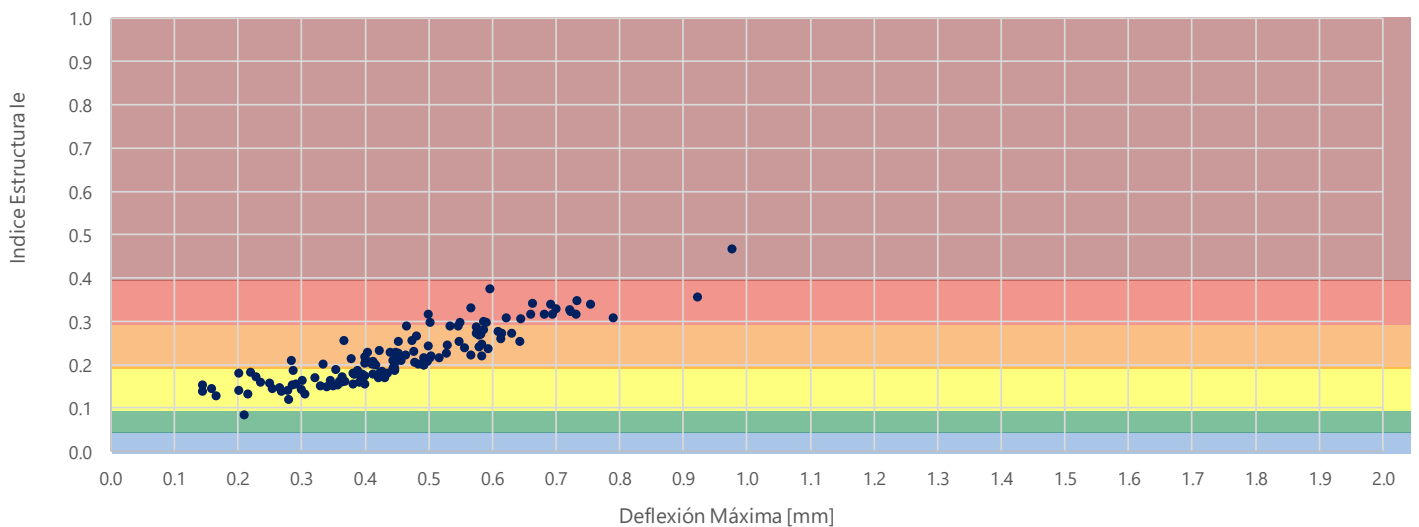
Carretera ARRIAGA - TAPACHULA

Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)

Cuerpo B Carril Der (Alta)



Gráfica 4 | Módulo de Rigidez Dinámico - Deflexión Máxima



Gráfica 5 | Índice Estructural - Deflexión Máxima

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Información

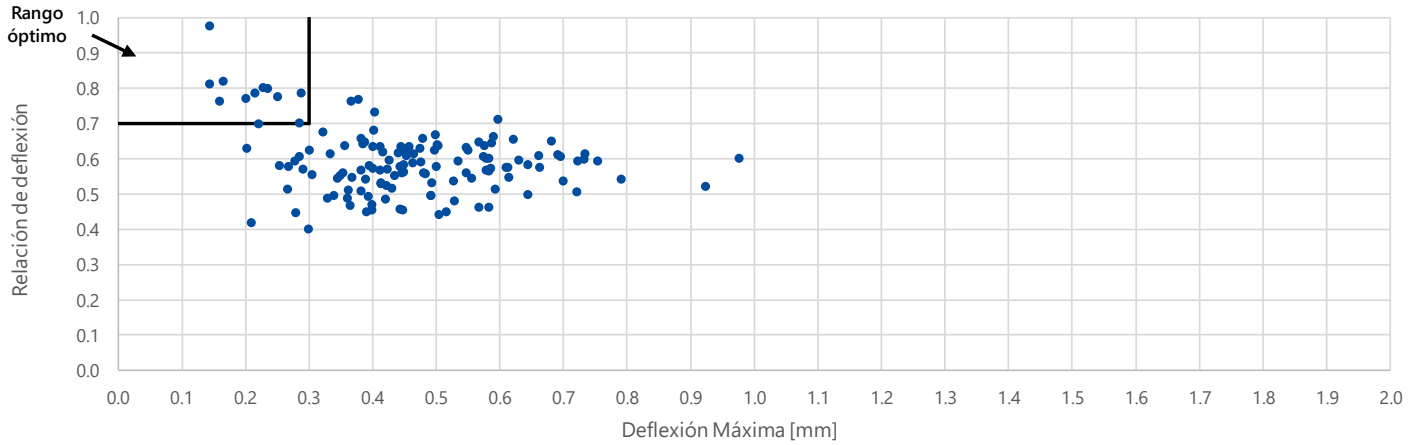
Indicadores Derivados de las Pruebas de Deflexion

Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-S11

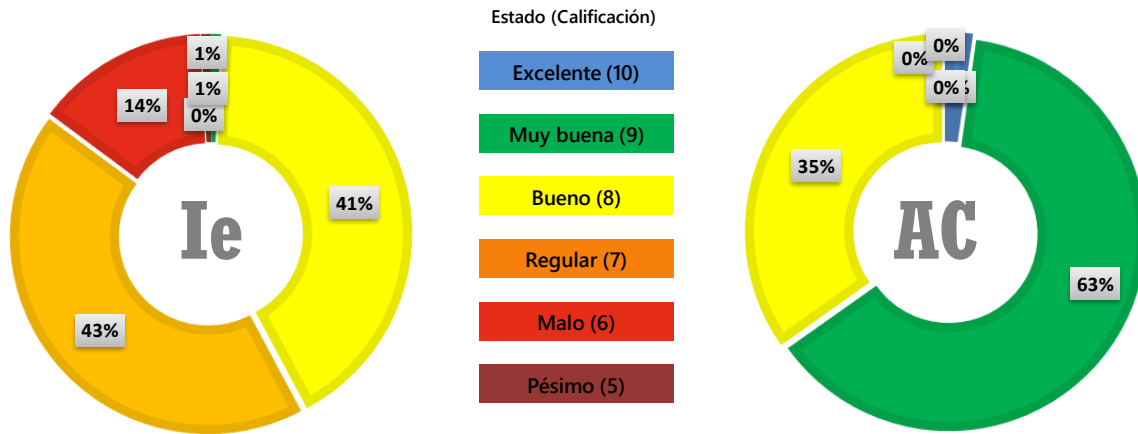
Carretera ARRIAGA - TAPACHULA

Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)

Cuerpo B Carril Der (Alta)

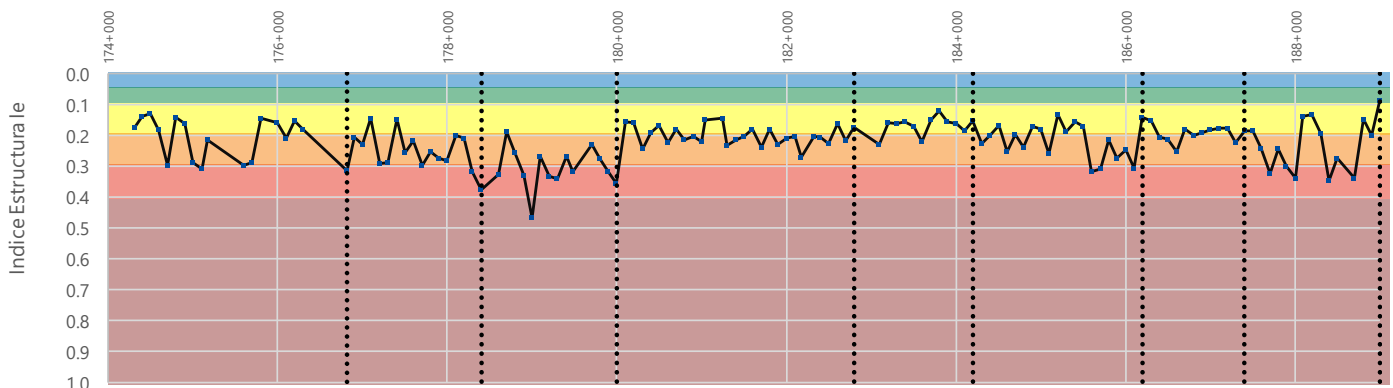


Gráfica 6 | Relación de deflexión - Deflexión Máxima



Gráfica 7 | Estado según Índice Estructural (Orozco 2005)

Gráfica 8 | Estado según Area de la cuenca (Orozco 2005)



Gráfica 9 | Índice Estructural Puntual (Orozco 2005)

Para realizar una evaluación del pavimento se considera una calificación ponderada asignándole un valor a los cinco principales indicadores.

Deflexión Normalizada	Radio curvatura	BLI	MLI	LLI
-----------------------	-----------------	-----	-----	-----

Estos indicadores permiten identificar la condición estructural del pavimento en cada punto de deflexión, con el fin de agrupar los resultados y simplificar la interpretación de los datos, el tramo se evalúa por zonas homogéneas, es decir, por cada zona se obtiene el promedio de cada indicador, posteriormente para cada zona homogénea se obtiene una condición con el siguiente criterio utilizando el promedio de los indicadores de deflexiones calculados.

TABLA 10 PORCENTAJES DE IMPORTANCIA DE CADA INDICADOR. FUENTE ELABORACIÓN PROPIA

Porcentajes de importancia de cada indicador		Valores de calificación		
		Bueno	Aceptable	No aceptable
		<=	<=	>
Deflexión Máxima Normalizada [Dn Máx]	40%	0.4	0.5	0.5
Radio de Curvatura [RoC]	5%	50	100	100
Capa base [BLI]	10%	0.2	0.4	0.4
Capa intermedia o subbase [MLI]	15%	0.1	0.2	0.2
Capa inferior o subrasante [LLI]	30%	0.5	1	1
Condición con 5 indicadores	100%			

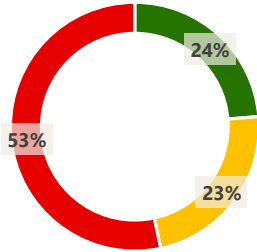
Con este resultado se obtiene la calificación de la zona homogénea con base en la respuesta del pavimento a una carga de 700 kpa. Es importante notar que este esfuerzo equivale a una carga de 49.48 kN aproximadamente distribuidas en una circunferencia con diámetro de 0.3m. la carga que aplica un eje equivalente es de 80 kN distribuidas en dos llantas en arreglo dual.

TABLA 11 CALIFICACIÓN DEL PAVIMENTO CON INDICADORES DE DEFLEXIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Calificación del pavimento	
Condición > 80%	Bueno
60% < Condición < 80%	Regular
Condición < 60%	Malo

CONDICIÓN DERIVADO DEL ANÁLISIS DEFLECTOMÉTRICO CARRIL DE BAJA

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD



Información

Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-S11
 Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo PIJJIAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Izq (Baja)

Longitud evaluada Promedio ponderado DN Zonas homogéneas

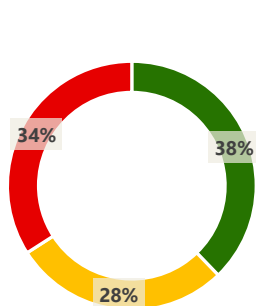
15 km 0.50 7

■ Bueno ■ Aceptable ■ No aceptable

Zona homogénea	Inicio [m]	Fin [m]	Longitud [km]	Deflexión Normalizada	Radio curvatura	BLI	MLI	LLI	Condición
1	174+000	176+814	2.90	0.344	123	0.123	0.092	0.041	Bueno
2	176+901	178+301	1.50	0.519	63	0.215	0.143	0.054	No aceptable
3	178+400	180+299	2.00	0.663	49	0.270	0.198	0.077	No aceptable
4	180+401	182+806	2.50	0.527	63	0.244	0.148	0.056	No aceptable
5	182+900	183+901	1.10	0.382	82	0.184	0.103	0.036	Bueno
6	184+000	187+401	3.50	0.507	72	0.213	0.153	0.062	No aceptable
7	187+500	189+000	1.50	0.578	64	0.253	0.167	0.065	No aceptable
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-

CONDICIÓN DERIVADO DEL ANÁLISIS DEFLECTOMÉTRICO CARRIL DE ALTA

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD



Información

Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-S11
 Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Der (Alta)

Longitud evaluada **15 km** Promedio ponderado DN **0.45** Zonas homogéneas **8**

■ Bueno ■ Aceptable ■ No aceptable

Zona homogénea	Inicio [m]	Fin [m]	Longitud [km]	Deflexión Normalizada	Radio curvatura	BLI	MLI	LLI	Condición
1	174+000	176+818	2.90	0.351	152	0.116	0.095	0.047	Bueno
2	176+903	178+405	1.60	0.469	65	0.180	0.134	0.055	Aceptable
3	178+500	180+000	1.60	0.635	48	0.267	0.188	0.074	No aceptable
4	180+100	182+799	2.80	0.445	59	0.215	0.121	0.046	Aceptable
5	182+900	184+200	1.40	0.366	74	0.169	0.103	0.039	Bueno
6	184+302	186+200	2.00	0.476	76	0.196	0.142	0.059	Aceptable
7	186+300	187+400	1.20	0.430	80	0.164	0.125	0.059	Aceptable
8	187+501	189+000	1.50	0.490	83	0.196	0.143	0.061	Aceptable
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-

XII. DISEÑO DE REFUERZO DE PAVIMENTO

Un recurso importante para realizar el retrocálculo de capas de la estructura de un pavimento esta dado por los espesores de las capas, la sensibilidad al cambio en el espesor es muy significativa, por lo cual es muy importante tener certeza de los espesores con los que cuenta la estructura para realizar un buen calculo.

Para el tramo en estudio se determinaron los espesores en cada punto de deflexión con el equipo GPR, estos espesores se obtienen en una tabla para importarlos desde el programa Elmod, básicamente se encontraron tres capas principales la capa del pavimento existente, la capa de material granular y una capa de terracería.

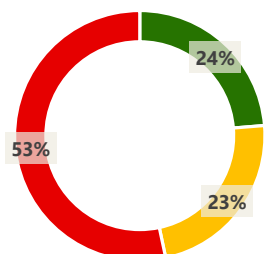
Se presenta el promedio de espesores por zonas homogéneas, dejando ver que los espesores presentan cambios significativos, lo que quiere decir que los trabajos de conservación o desde la misma construcción cuentan con deficiencias de origen, mismas que muy posiblemente no fueron atendidas y que con el paso de los vehículos han propiciado que el camino se deteriore con mayor rapidez respecto a otros tramos aledaños con el mismo tránsito.

También se observa que existen diferencias en el carril de baja y alta velocidad siendo el carril de baja el que presenta el estado más deteriorado con deflexiones máximas por arriba de las 500 micras y con la calificación más baja con base en el criterio que se adopta en este trabajo. Este comportamiento es de esperarse dado que los vehículos de mayor tonelaje circulan por el carril de baja velocidad

Este análisis conlleva a que los trabajos de conservación y o rehabilitación tendrán que ser más importantes en el carril de baja velocidad.

ESPEORES GPR CARRIL DE BAJA

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD



Información

Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-S11
 Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo PIJJIAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Izq (Baja)

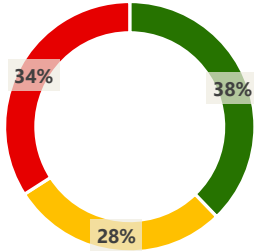
Longitud evaluada Promedio ponderado DN Zonas homogéneas
15 km 0.50 7

■ Bueno ■ Aceptable ■ No aceptable

Zona homogénea	Inicio [m]	Fin [m]	Longitud [km]	Deflexión Normalizada	Espesores de la Estructura Existente				Condición
					Capa 1 cm	Capa 2 cm	Capa 3 cm	Capa 4 cm	
1	174+000	176+814	2.90	0.344	9.75	23.01	25.93	Indef	Bueno
2	176+901	178+301	1.50	0.519	10.06	21.29	24.73	Indef	No aceptable
3	178+400	180+299	2.00	0.663	10.01	18.13	24.42	Indef	No aceptable
4	180+401	182+806	2.50	0.527	7.64	17.36	27.77	Indef	No aceptable
5	182+900	183+901	1.10	0.382	8.12	18.82	22.00	Indef	Bueno
6	184+000	187+401	3.50	0.507	9.05	18.54	26.58	Indef	No aceptable
7	187+500	189+000	1.50	0.578	7.41	19.99	28.43	Indef	No aceptable
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-

ESPEORES GPR CARRIL DE ALTA

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD



Información

Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-S11
 Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Der (Alta)

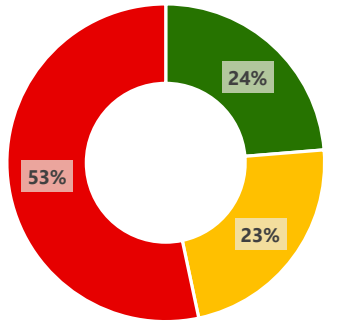
Longitud evaluada Promedio ponderado DN Zonas homogéneas
15 km 0.45 8

■ Bueno ■ Aceptable ■ No aceptable

Zona homogénea	Inicio [m]	Fin [m]	Longitud [km]	Deflexión Normalizada	Espesores de la Estructura Existente				Condición
					Capa 1 cm	Capa 2 cm	Capa 3 cm	Capa 4 cm	
1	174+000	176+818	2.90	0.351	11.24	18.27	17.44	Indef	Bueno
2	176+903	178+405	1.60	0.469	10.54	15.86	25.34	Indef	Aceptable
3	178+500	180+000	1.60	0.635	10.23	17.24	25.27	Indef	No aceptable
4	180+100	182+799	2.80	0.445	11.18	15.41	20.51	Indef	Aceptable
5	182+900	184+200	1.40	0.366	12.44	15.80	19.60	Indef	Bueno
6	184+302	186+200	2.00	0.476	11.45	16.68	22.48	Indef	Aceptable
7	186+300	187+400	1.20	0.430	11.33	16.22	19.45	Indef	Aceptable
8	187+501	189+000	1.50	0.490	11.37	14.57	21.18	Indef	Aceptable
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-
									-

CONDICIONES EQUIVALENTES CARRIL DE BAJA

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD



■ Buen Estado ■ Regular ■ Mal Estado

Información

Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-S11

Carretera ARRIAGA - TAPACHULA

Tramo PIJJIAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)

Cuerpo B Carril Izq (Baja)

Longitud evaluada

Promedio ponderado DN

Promedio ponderado Dk

15 km

0.50

Buen Estado [DN <= 0.4]

Regular [0.4 <= DN <= 0.5]

Mal Estado [DN > 0.4]

3 km

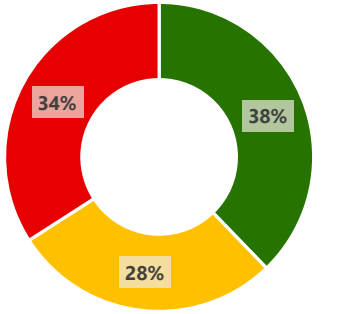
3 km

9 km

Seccion km-Carril	Inicio [m]	Fin [m]	Longitud [km]	Carril	Segmento	Promedio Deflexión Normalizada	Condición
1	174+000	175+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.221	Buen Estado
2	175+000	176+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.489	Regular
3	176+000	177+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.374	Buen Estado
4	177+000	178+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.489	Regular
5	178+000	179+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.663	Mal Estado
6	179+000	180+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.636	Mal Estado
7	180+000	181+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.570	Mal Estado
8	181+000	182+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.534	Mal Estado
9	182+000	183+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.525	Mal Estado
10	183+000	184+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.382	Buen Estado
11	184+000	185+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.515	Mal Estado
12	185+000	186+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.487	Regular
13	186+000	187+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.517	Mal Estado
14	187+000	188+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.582	Mal Estado
15	188+000	189+000	1.00	Izq (Baja)	Once	0.573	Mal Estado

CONDICIONES EQUIVALENTES CARRIL DE ALTA

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD



■ Buen Estado ■ Regular ■ Mal Estado

Información

Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-S11

Carretera ARRIAGA - TAPACHULA

Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)

Cuerpo B Carril Der (Alta)

Longitud evaluada

Promedio ponderado DN

Promedio ponderado Dk

15 km

0.45

Buen Estado [DN <= 0.4]

Regular [0.4 <= DN <= 0.5]

Mal Estado [DN > 0.4]

3 km

9 km

3 km

Seccion km-Carril	Inicio [m]	Fin [m]	Longitud [km]	Carril	Segmento	Promedio Deflexión Normalizada	Condición
1	174+000	175+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.258	Buen Estado
2	175+000	176+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.493	Regular
3	176+000	177+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.340	Buen Estado
4	177+000	178+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.448	Regular
5	178+000	179+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.533	Mal Estado
6	179+000	180+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.636	Mal Estado
7	180+000	181+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.506	Mal Estado
8	181+000	182+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.442	Regular
9	182+000	183+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.434	Regular
10	183+000	184+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.365	Buen Estado
11	184+000	185+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.464	Regular
12	185+000	186+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.448	Regular
13	186+000	187+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.455	Regular
14	187+000	188+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.488	Regular
15	188+000	189+000	1.00	Der (Alta)	Once	0.485	Regular

Para realizar el cálculo de la vida remanente se utilizan los ejes equivalentes calculados en el apartado X Tránsito de diseño, el programa Elmod entrega el resultado en cada punto donde se realizó una deflexión, basándose en el método del Instituto de Asfalto.

Para realizar el diseño del espesor de refuerzo se conceptualiza retirar la primera capa y colocar una capa de base espumada, el cual, es material recuperado del mismo sitio tratado con asfalto espumado añadido durante el proceso de fresado y homogenización, este material dispone aportar un módulo de 1000 MPa, por lo que se calcula el espesor de refuerzo que necesita para soportar el tránsito de diseño con este módulo y adicionalmente se realiza el cálculo considerando colocar una sobre carpeta de 3500 MPa de módulo.

Para presentar los resultados se emplea una tabla donde se presentan los espesores de las primeras tres capas en cada punto de medición de deflexiones.

Espesores (cm)			
Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4

Se describe el tipo de material de cada capa

Tipo de Material			
Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4

Se obtiene el módulo de cada capa con el retrocálculo

Módulos de Elasticidad, [Kg /cm ²]			
Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4

Y se calcula la vida remanente, capa crítica y el espesor de la capa de refuerzo considerando una carpeta asfáltica de 3500 MPa y una base Espumada de 1000 MPa para un horizonte de proyecto de 5 años

Vida R	Capa	Diseño Carpeta	Diseño Espumado
Años	Critica	5 años [mm]	5 años [mm]

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Información
 Clave Def-Arr-Top-174000-189000-S11
 Carretera ARRAGA - TAPACHULA
 Tramo PIJAJAPAN - MAPASTEPCC (Cpo. B)
 Cuerpo B Carril Izq (Baja)

Clave del Tramo	Nombre de la Carretera	Nombre del Tramo	Km inicial	Km Final	Cuerpo	Carril	Km Medición	Deflexión 700 kpa (mm)	Espesores (cm)				Tipo de Material				Módulos de Elasticidad (Kg/cm ²)				Vida R Años	Capa Crítica	Diseño Carpeta 5 años (mm)	Diseño Carpeta 5 años (mm)	Falla Tipo	Observaciones
									1	2	3	4	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4						
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	187.100	187.200	B	Izq (Baja)	187.101	0.481	8	24	19	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	42,514	1,619	2,803	576	3.4	Capa 1	63	110	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	187.200	187.300	B	Izq (Baja)	187.199	0.547	8	24	19	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	50,948	985	3,185	560	1.1	Capa 1	6	133	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	187.300	187.400	B	Izq (Baja)	187.300	0.398	8	23	28	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	35,060	2,662	1,481	1,070	5.0	Capa 1	75	76	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	187.400	187.500	B	Izq (Baja)	187.401	0.562	7	26	27	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	31,389	1,044	1,140	1,100	0.8	Capa 1	42	135	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	187.500	187.600	B	Izq (Baja)	187.500	0.447	8	25	24	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	49,975	2,559	2,091	684	5.0	Capa 1	0	79	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	187.600	187.700	B	Izq (Baja)	187.601	0.886	6	24	19	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	38,931	848	2,782	412	0.3	Capa 1	19	148	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	187.700	187.800	B	Izq (Baja)	187.700	0.691	7	22	28	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	39,306	929	2,740	521	0.8	Capa 1	72	137	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	187.800	187.900	B	Izq (Baja)	187.795	0.668	7	18	34	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	46,285	1,335	1,301	1,063	1.2	Capa 1	6	123	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	187.900	188.000	B	Izq (Baja)	187.901	0.598	8	26	22	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	47,921	1,329	1,131	960	1.9	Capa 1	50	123	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	188.000	188.100	B	Izq (Baja)	187.999	0.679	8	24	30	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	46,529	872	997	703	0.8	Capa 1	31	148	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	188.100	188.200	B	Izq (Baja)	188.095	0.448	8	20	30	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	31,245	940	1,223	2,300	0.8	Capa 1	53	148	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	188.200	188.300	B	Izq (Baja)	188.201	0.344	8	19	24	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	39,198	1,914	1,429	4,127	5.0	Capa 1	28	105	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	188.300	188.400	B	Izq (Baja)	188.301	0.803	7	18	27	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	31,708	405	981	1,892	0.1	Capa 1	25	223	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	188.400	188.500	B	Izq (Baja)	188.400	0.672	7	17	29	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	47,788	2,003	1,379	401	3.1	Capa 1	59	107	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	188.500	188.600	B	Izq (Baja)	188.500	0.675	6	19	31	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	33,037	1,594	1,047	772	1.0	Capa 1	0	118	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	188.600	188.700	B	Izq (Baja)	188.600																			
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	188.700	188.800	B	Izq (Baja)	188.696	0.647	6	19	32	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	40,046	1,308	705	1,288	0.8	Capa 1	72	127	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	188.800	188.900	B	Izq (Baja)	188.798	0.291	8	19	36	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	32,061	3,585	1,724	5.0	Capa 1	0	69	Por Falga			
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	188.900	189.000	B	Izq (Baja)	188.897	0.597	7	16	31	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	26,182	2,452	1,510	734	5.0	Capa 1	103	91	Por Falga		
Def-Arr-Top-174000-189000-S11	Arraga - Tapachula	Pijajapan - Magastepcc (Cpo. B)	189.000	189.100	B	Izq (Baja)	189.000	0.260	9	16	31	Indef	Carpeta Asfáltica Base Hidráulica Subrasante	Templén	Capa 1	20,234	5,513	4,792	1,261	5.0	Capa 1	72	10	Por Falga		
								0.5	9	19	26															
								0.2	5	11	14															
								1.0	16	33	39															
								PROMEDIO:																		
								MINIMO:																		
								MAXIMO:																		

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Información
 Clave Der: Ar- Tap- 14000-18000-S11
 Cuerpo: B
 Tramo: UBRAMIENTO ARRIBA - UBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)
 Cuerpo: B Carril Der (Ab)

Clave del Tramo	Nombre de la Carriera	Nombre del Tramo	Km Inicial	Km Final	Cuerpo	Carril	Km Medición	Deflexión a 700 kpa (mm)				Espesores (cm)				Tipo de Material				Módulos de Elasticidad (Kg/cm ²)				Vida R Años	Capa Crítica	Diseño Carpeta 5 años [mm]	Carpeta 5 años [mm]	Falla Tipo	Observaciones
								Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4						
DerAr- Tap-14000-18000-S11	Arriaga - Tapachula	Ubramiento Arriaga - Ubramiento Sur Tapachula (Cpo. B)	188.100	188.200	B	Der (Ab)	188.094	0.288	14	19	19	19	Indef	Carpeta Asfáltica	Base Hidráulica	Subrasante	Terraplen	24,205	1,319	22,311	1,889	5.0	Capa 1	0	133	0	Capa 1	Por Falga	
DerAr- Tap-14000-18000-S11	Arriaga - Tapachula	Ubramiento Arriaga - Ubramiento Sur Tapachula (Cpo. B)	188.200	188.300	B	Der (Ab)	188.198	0.305	10	11	23	Indef	Carpeta Asfáltica	Base Hidráulica	Subrasante	Terraplen	54,332	3,569	1,333	2,491	5.0	Capa 1	0	74	0	Capa 1	Por Falga		
DerAr- Tap-14000-18000-S11	Arriaga - Tapachula	Ubramiento Arriaga - Ubramiento Sur Tapachula (Cpo. B)	188.300	188.400	B	Der (Ab)	188.302	0.444	10	18	15	Indef	Carpeta Asfáltica	Base Hidráulica	Subrasante	Terraplen	74,481	1,402	1,028	919	2.5	Capa 1	25	133	25	Capa 1	Por Falga		
DerAr- Tap-14000-18000-S11	Arriaga - Tapachula	Ubramiento Arriaga - Ubramiento Sur Tapachula (Cpo. B)	188.400	188.500	B	Der (Ab)	188.402	0.733	8	11	38	Indef	Carpeta Asfáltica	Base Hidráulica	Subrasante	Terraplen	41,572	1,831	1,531	408	1.9	Capa 1	41	121	41	Capa 1	Por Falga		
DerAr- Tap-14000-18000-S11	Arriaga - Tapachula	Ubramiento Arriaga - Ubramiento Sur Tapachula (Cpo. B)	188.500	188.600	B	Der (Ab)	188.500	0.574	10	16	12	Indef	Carpeta Asfáltica	Base Hidráulica	Subrasante	Terraplen	23,272	761	17,226	657	0.5	Capa 1	64	187	64	Capa 1	Por Falga		
DerAr- Tap-14000-18000-S11	Arriaga - Tapachula	Ubramiento Arriaga - Ubramiento Sur Tapachula (Cpo. B)	188.600	188.700	B	Der (Ab)	188.600	0.754	13	17	24	Indef	Carpeta Asfáltica	Base Hidráulica	Subrasante	Terraplen	13,538	797	859	849	1.4	Capa 1	36	180	36	Capa 1	Por Falga		
DerAr- Tap-14000-18000-S11	Arriaga - Tapachula	Ubramiento Arriaga - Ubramiento Sur Tapachula (Cpo. B)	188.700	188.800	B	Der (Ab)	188.801	0.286	14	13	27	Indef	Carpeta Asfáltica	Base Hidráulica	Subrasante	Terraplen	16,740	3,183	4,520	2,885	5.0	Capa 1	0	85	0	Capa 1	Por Falga		
DerAr- Tap-14000-18000-S11	Arriaga - Tapachula	Ubramiento Arriaga - Ubramiento Sur Tapachula (Cpo. B)	188.800	189.000	B	Der (Ab)	188.898	0.333	9	12	15	Indef	Carpeta Asfáltica	Base Hidráulica	Subrasante	Terraplen	28,855	4,978	12,500	1,332	5.0	Capa 1	0	44	0	Capa 1	Por Falga		
DerAr- Tap-14000-18000-S11	Arriaga - Tapachula	Ubramiento Arriaga - Ubramiento Sur Tapachula (Cpo. B)	188.900	189.000	B	Der (Ab)	189.000	0.209	9	12	15	Indef	Carpeta Asfáltica	Base Hidráulica	Subrasante	Terraplen	12,781	13,776	9,543	2,825	5.0	Capa 2	0	10	0	Capa 2	Por Deformación		
								0.5	11	16	21							14,480	756	1,153	362								
								0.1	5	6	6							3,576	378	482	344								
								1.0	26	29	38							492.322	24.150	86.106	5.066								

PROMEDIO:
 MINIMO:
 MAXIMO:

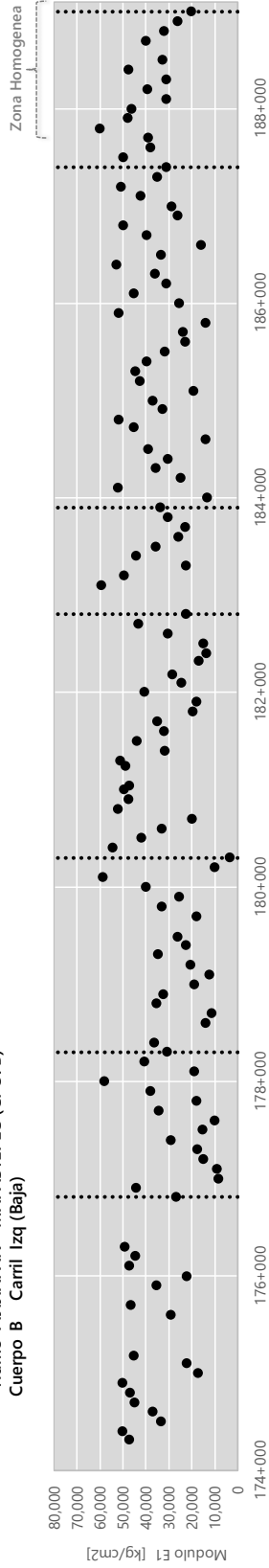
Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Información

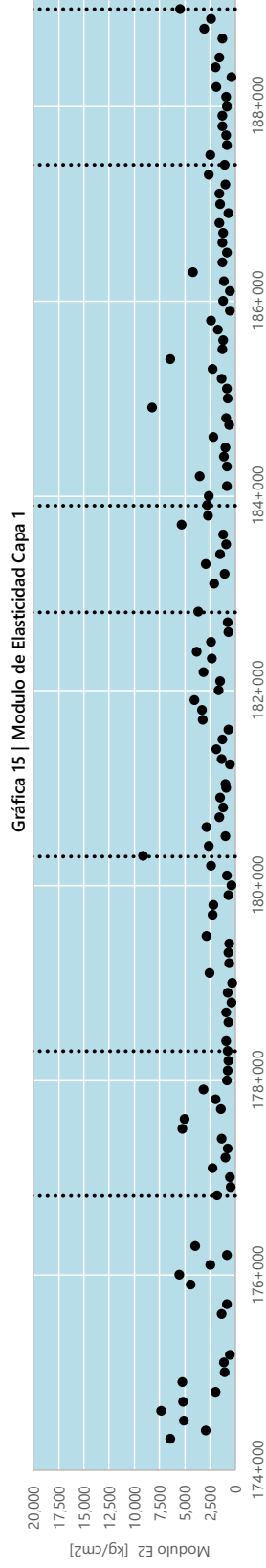
Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-511
 Carretera ARIIAGA - TAPACHULA
 Tramo PIJUIJAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Izq (Baja)

Modulos Derivados del Retroanálisis de las Pruebas de Deflexion

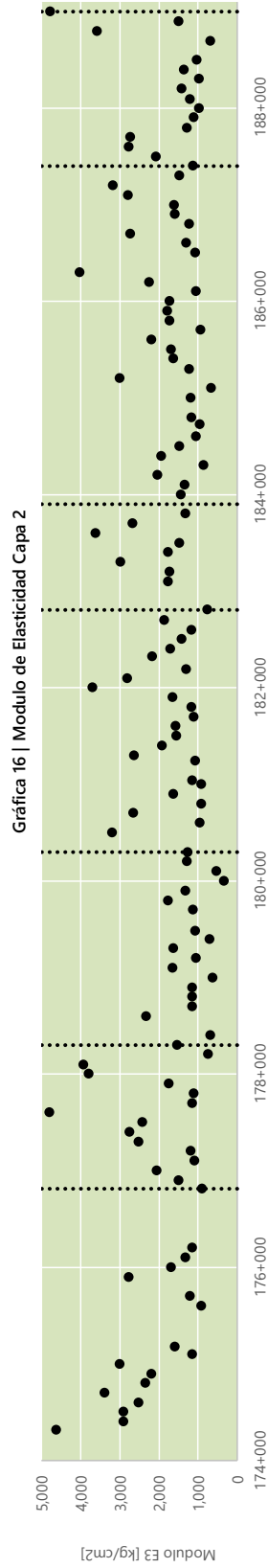
MÓDULOS CARRIL DE BAJA



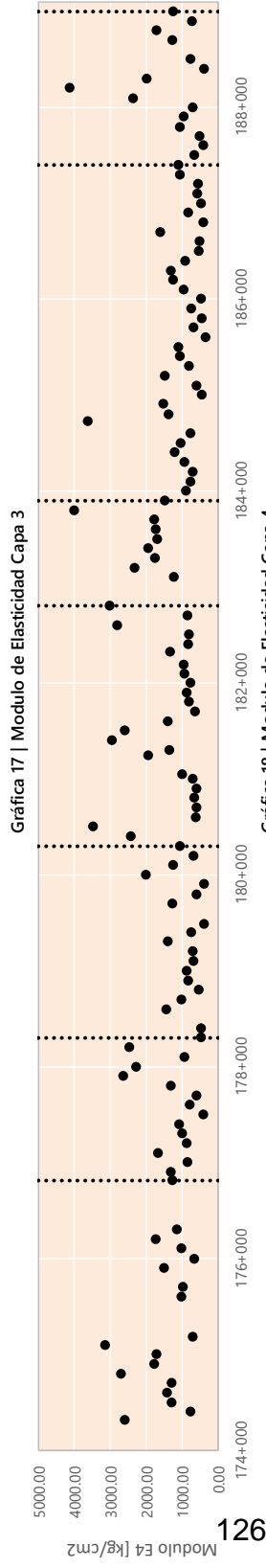
Carpeta Asfáltica
E1



Base Hidráulica
E2



Subrasante
E3



Terraplén
E4

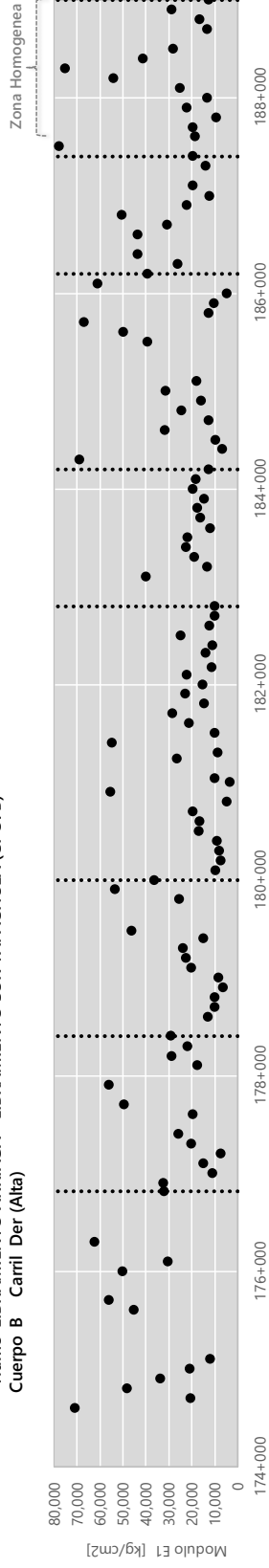
Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Información

Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-511
Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)
Cuerpo B Carril Der (Alta)

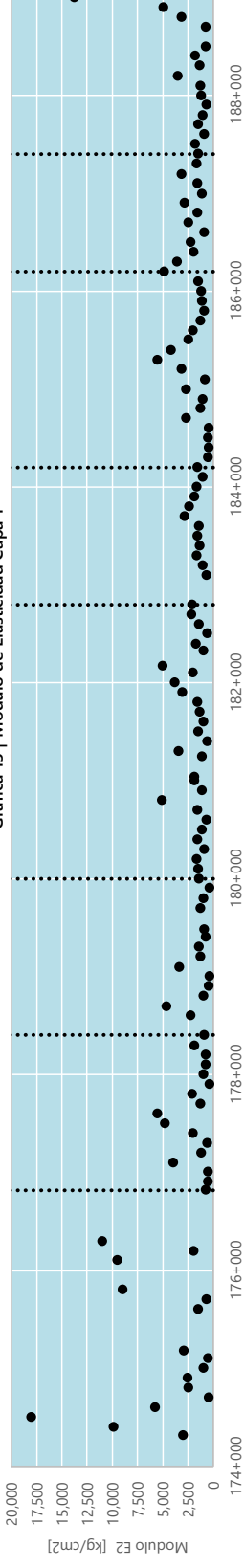
Modulos Derivados del Retroanálisis de las Pruebas de Deflexion

MÓDULOS CARRIL DE ALTA



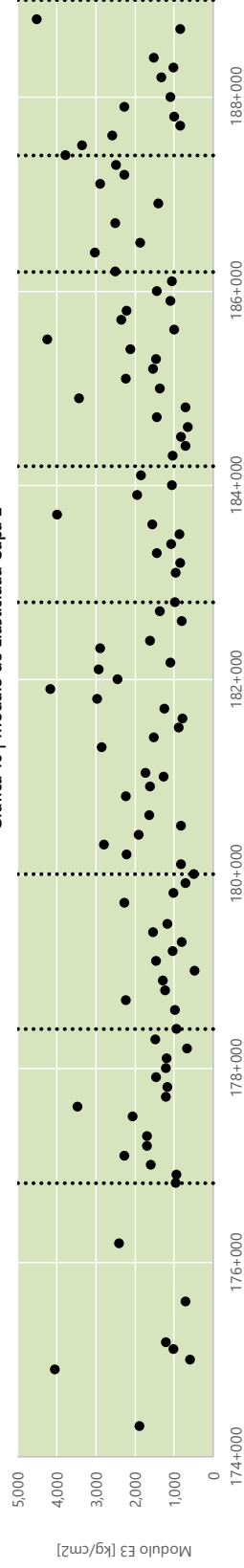
Carpeta Asfáltica
E1

Gráfica 15 | Módulo de Elasticidad Capa 1



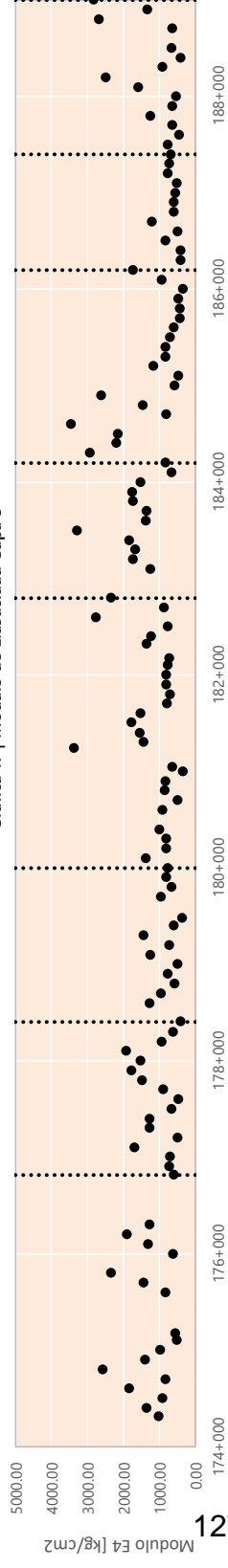
Base Hidráulica
E2

Gráfica 16 | Módulo de Elasticidad Capa 2



Subrasante
E3

Gráfica 17 | Módulo de Elasticidad Capa 3



Terraplén
E4

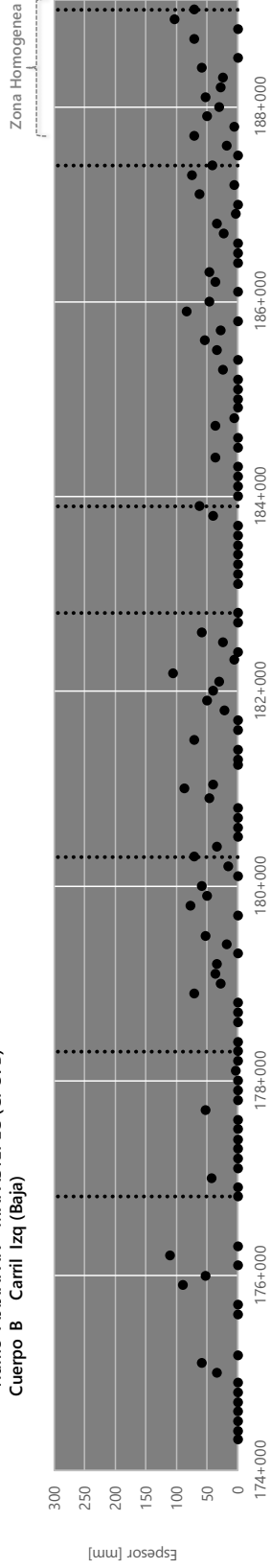
Gráfica 18 | Módulo de Elasticidad Capa 4

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Diseño Derivado del Retroanálisis de las Pruebas de Deflexión

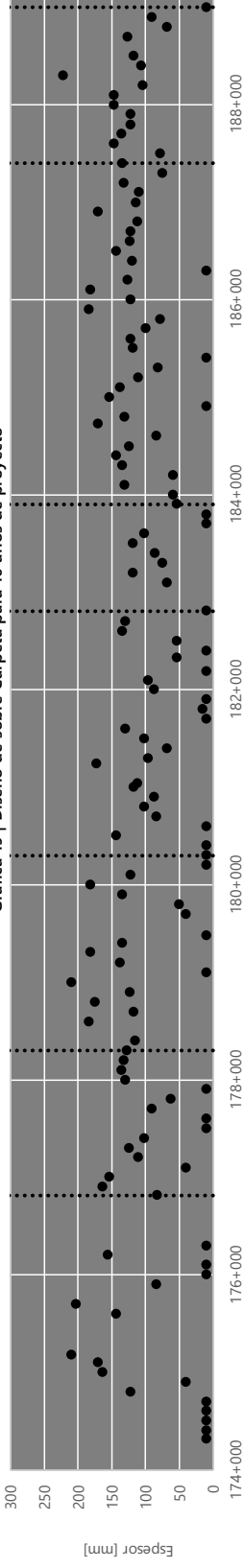
DISEÑO CARRIL DE BAJA

Información
 Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-511
 Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo PIJIJAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Izq (Baja)



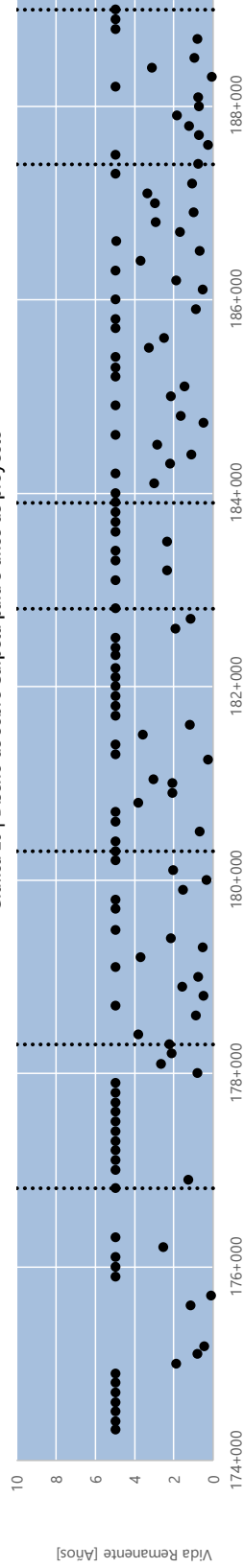
**Diseño Carpeta
5 años [mm]**

Gráfico 19 | Diseño de sobre Carpeta para 10 años de proyecto



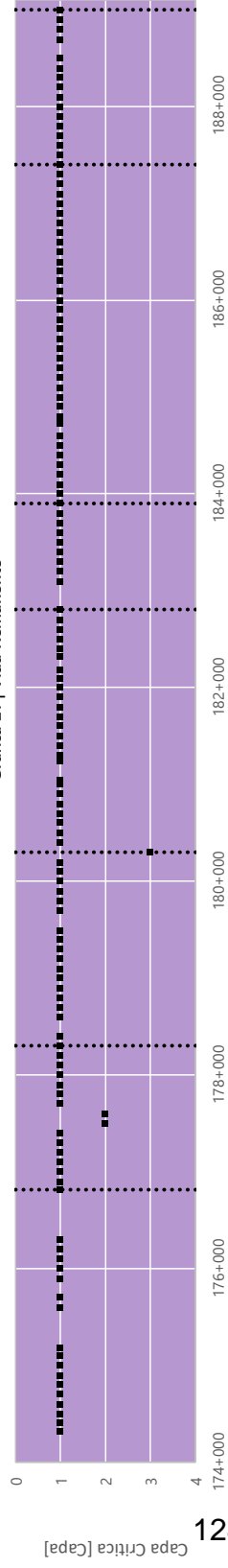
**Diseño Espumado
5 años [mm]**

Gráfico 20 | Diseño de sobre Carpeta para 5 años de proyecto



**Vida R
Años**

Gráfico 21 | Vida Remanente



**Capa
Crítica**

Gráfico 22 | Capa Crítica

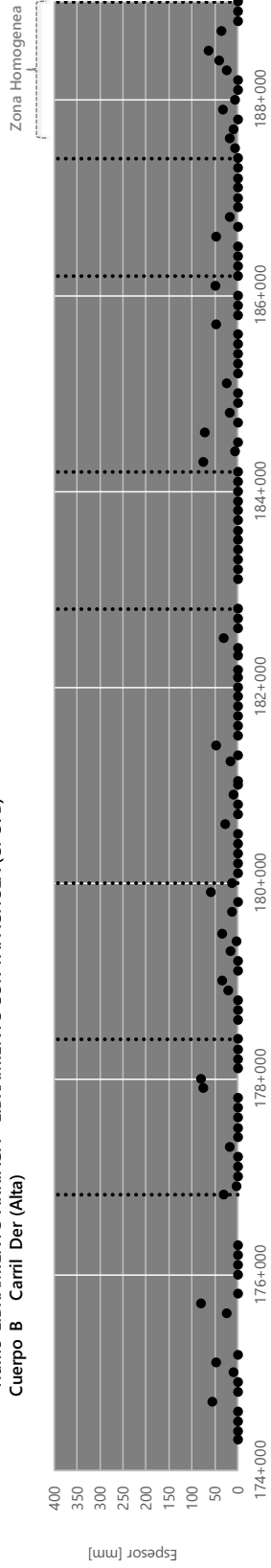
Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

Diseño Derivado del Retroanálisis de las Pruebas de Deflexión

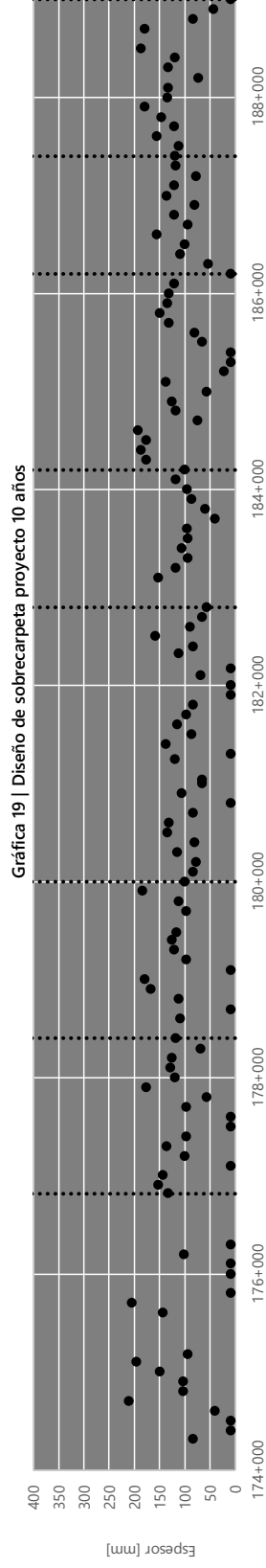
Información

Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-511
 Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Der (Alta)

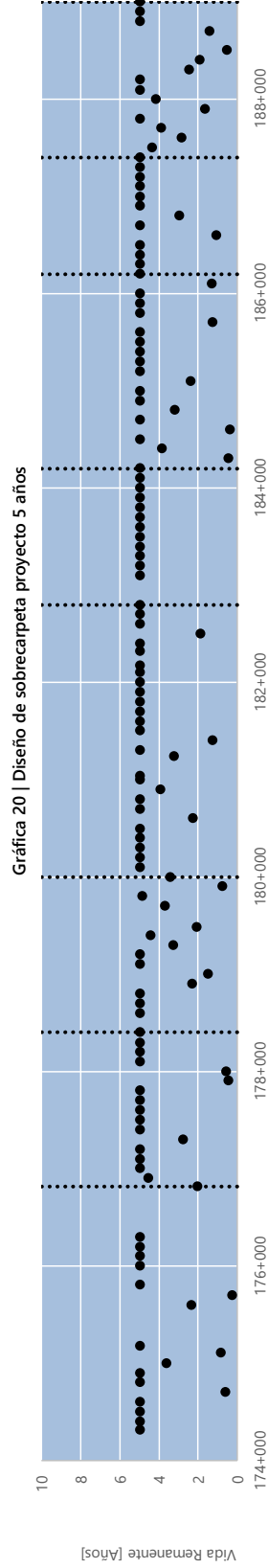
DISEÑO CARRIL DE ALTA



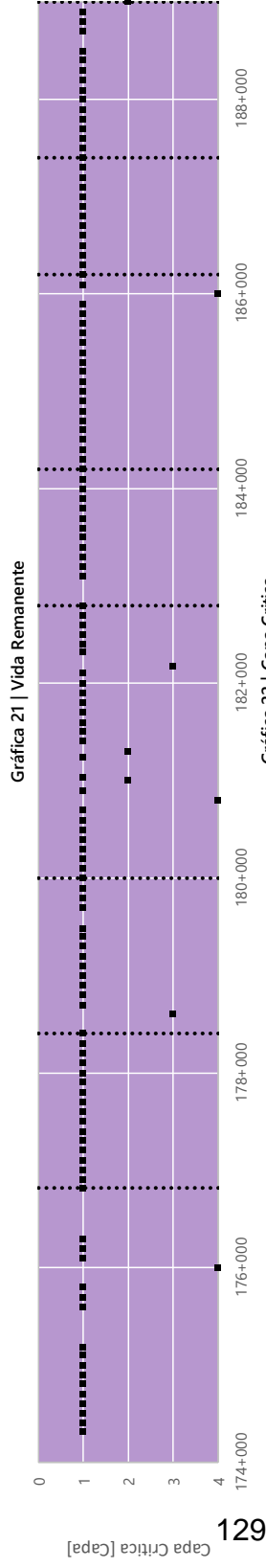
**Diseño Carpeta
5 años [mm]**



**Diseño Espumado
5 años [mm]**

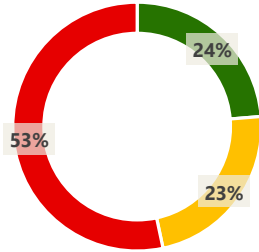


**Vida R
Años**



**Capa
Crítica**

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD



■ Bueno ■ Aceptable ■ No aceptable

Información

Clave Def-Arr-Tap-174000-189000-S11
 Carretera **ARRIAGA - TAPACHULA**
 Tramo **PIJJIAPAN - MAPASTEPEC (CPO. B)**
 Cuerpo **B Carril Izq (Baja)**

CONCLUSIÓN DISEÑO CARRIL DE BAJA

Prom. ponderado
 Espumado 5 años
 [mm]

Zonas
 homogéneas

Longitud evaluada [Años]

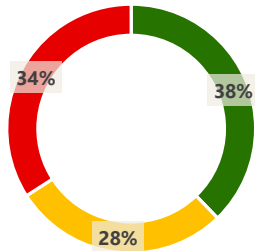
15 km 3.4 158 7

Diseño Base Esp + 20 mm Micro C.
 (5 años) [mm]

Zona homogénea	Inicio [m]	Fin [m]	Longitud [km]	Deflexión Normalizada	E1 [Kg /cm ²]	E2 [Kg /cm ²]	E3 [Kg /cm ²]	E4 [Kg /cm ²]	V. R. [Años]	90 Percentil B Esp. (Mod 10 000 kg/cm ²)
1	174+000	176+814	2.90	0.344	38 816	3 250	2 482	1 491	3.7	181
2	176+901	178+301	1.50	0.519	25 991	1 760	2 166	1 251	3.9	147
3	178+400	180+299	2.00	0.663	25 351	1 635	1 168	911	2.9	183
4	180+401	182+806	2.50	0.527	34 671	1 971	1 975	1 403	3.8	133
5	182+900	183+901	1.10	0.382	36 174	2 298	2 598	2 001	4.4	119
6	184+000	187+401	3.50	0.507	34 725	1 800	2 026	951	3.1	164
7	187+500	189+000	1.50	0.578	38 909	1 802	1 846	1 265	2.4	148

Propuesta de Rehabilitación a partir de los resultados de la medición de Deflexiones con FWD

CONCLUSIÓN DISEÑO CARRIL DE ALTA



Información

Clave Def-Arr-Tap-144000-189000-S11
 Carretera ARRIAGA - TAPACHULA
 Tramo LIBRAMIENTO ARRIAGA - LIBRAMIENTO SUR TAPACHULA (CPO. B)
 Cuerpo B Carril Der (Alta)

Prom. ponderado
 Espumado 5 años Zonas homogéneas

Longitud evaluada [Años] [mm]

15 km 4.2 165 8

■ Bueno ■ Aceptable ■ No aceptable

Diseño Base Esp + 20 mm Micro C.
 (5 años) [mm]

Zona homogénea	Inicio [m]	Fin [m]	Longitud [km]	Deflexión Normalizada	E1 [Kg /cm ²]	E2 [Kg /cm ²]	E3 [Kg /cm ²]	E4 [Kg /cm ²]	V. R. [Años]	90 Percentil B Esp. (Mod 10 000 kg/cm2)
1	174+000	176+818	2.90	0.351	117 019	5 868	11 190	1 245	3.9	204
2	176+903	178+405	1.60	0.469	45 102	1 785	1 865	1 060	4.3	153
3	178+500	180+000	1.60	0.635	29 631	1 487	1 205	837	3.7	180
4	180+100	182+799	2.80	0.445	17 287	1 900	2 385	1 317	4.6	135
5	182+900	184+200	1.40	0.366	19 188	1 625	2 206	1 594	5.0	125
6	184+302	186+200	2.00	0.476	72 616	1 952	1 680	1 261	3.9	183
7	186+300	187+400	1.20	0.430	38 665	2 062	3 917	654	4.5	140
8	187+501	189+000	1.50	0.490	30 579	2 594	5 471	1 191	3.6	180

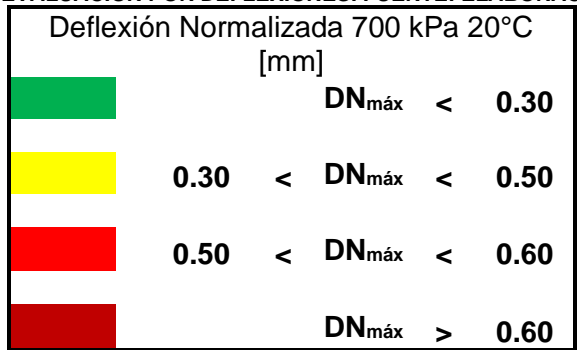
XIII. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN.

De acuerdo al análisis de deflexiones y las propuestas de rehabilitación para diferentes horizontes de proyecto, se realizó la siguiente metodología la cual consta de cinco niveles de análisis:

CONDICIÓN CON ESTÁNDARES DE DESEMPEÑO

Nivel I: Se realizó una revisión del estado actual de los estándares de desempeño del camino (deflexiones) para identificar los puntos donde no se cumple con este estándar de desempeño (ver tabla 12 e ilustración 75).

TABLA 12.- PROPUESTA DE EVALUACIÓN POR DEFLEXIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA



S11 (Cpo B)	DN _{máx}																																																										
	Alta	Baja																																																									
	km		174+000	174+100	174+200	174+300	174+400	174+500	174+600	174+700	174+800	174+900	175+000	175+100	175+200	175+300	175+400	175+500	175+600	175+700	175+800	175+900	176+000	176+100	176+200	176+300	176+400	176+500	176+600	176+700	176+800	176+900	177+000	177+100	177+200	177+300	177+400	177+500	177+600																				
			0.238	0.194	0.232	0.165	0.279	0.220	0.287	0.549	0.223	0.154	0.301	0.177	0.575	0.419	0.790	0.480	0.378	0.469					0.590	0.558	0.465	0.784	0.159	0.225	0.235	0.386	0.284	0.393	0.144	0.282	0.201	0.188				0.695	0.452	0.478	0.543	0.476	0.561	0.253	0.350	0.533	0.670	0.546	0.533	0.339	0.446	0.366	0.564	0.400	0.304

ILUSTRACIÓN 75.- ESTÁNDARES DE DESEMPEÑO DEL KM. 174+000 AL KM. 177+600. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Nivel II: Posteriormente se realiza una propuesta primaria, para determinar el tipo de tratamiento considerando lo siguiente (ver tabla 13 e ilustración 76).

TABLA 13.- PROPUESTA DE TRATAMIENTO SEGÚN ESTÁNDARES DE DESEMPEÑO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

		TRATAMIENTO	
BE	Base Espum + C. Asf UD	Si DN_{máx} > 0.6 mm	
UD	Carpeta Asf Ulta Delgada	Si DN_{máx} < 0.60 mm	

S11 (Cpo B)	DN _{máx}	Tratamiento Según Desempeño																																																									
		Alta	Baja																																																								
		km		174+000	174+100	174+200	174+300	174+400	174+500	174+600	174+700	174+800	174+900	175+000	175+100	175+200	175+300	175+400	175+500	175+600	175+700	175+800	175+900	176+000	176+100	176+200	176+300	176+400	176+500	176+600	176+700	176+800	176+900	177+000	177+100	177+200	177+300	177+400	177+500	177+600																			
				UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD

ILUSTRACIÓN 76.- EJEMPLO DE EVALUACIÓN DE LOS ESTÁNDARES DE DESEMPEÑO DEL KM. 174+000 AL KM. 177+600. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Estas alternativas de tratamiento se propusieron con la visión de aprovechar las condiciones actuales de los estándares de desempeño del camino actual como más adelante se observa en el **LARGUILLO DE REHABILITACIÓN**.

Nivel III: Con base en el estado actual del pavimento, se calculó¹ el espesor de sobrecarpeta de refuerzo necesario para cumplir con un horizonte de proyecto de 5 años, así mismo se corroboraron los resultados del **nivel I y II**.

Con esta información se realiza la primera evaluación del tramo considerando lo siguiente (ver tabla 14 e ilustración 77):

TABLA 14.- CONDICIONALES PARA DETERMINAR TRATAMIENTO EN FUNCIÓN DEL VALOR DE SOBRECARPETA REQUERIDO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TRATAMIENTO [según los mm de refuerzo estructural necesario para 5 años]		
BE	Base Espumada + C. Asf UD	Ref. Estimado. > 20
S	Carpeta Asf Ultadelgada	Ref. Estimado. < 20

Espesor de sobrecarpeta (Carpeta Asfáltica)	Ref CA		km
	Alta	Baja	
			174+000
			174+100
			174+200
		0	174+300
		0	174+400
		0	174+500
		0	174+600
		56	174+700
		0	174+800
		0	174+900
		9	175+000
		47	175+100
		0	175+200
			175+300
			175+400
			175+500
		25	175+600
		81	175+700
		0	175+800
		61	175+900
		0	176+000
		0	176+100
		0	176+200
		111	176+300
		0	176+400
			176+500
			176+600
			176+700
		31	176+800
		3	176+900
		0	177+000
		44	177+100
		0	177+200
		0	177+300
		19	177+400
		0	177+500
		0	177+600

ILUSTRACIÓN 77.- EJEMPLO DE CÁLCULO DE REFUERZO SUPERFICIAL CON CARPETA DEL KM. 174+000 AL KM. 177+600. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Con ello se identificaron como **“BE”**, los puntos en los cuales requieren atención necesaria **con un tratamiento profundo** (ver ilustración 78), se considera que, para una solicitud de refuerzo estructural sobre la superficie actual mayor a 20 mm, implicaría un tratamiento de este tipo ya que se busca mantener los niveles de rasante.

¹ Los cálculos fueron efectuados con el software Elmod 6.0

Carpeta asfáltica ultradelgada

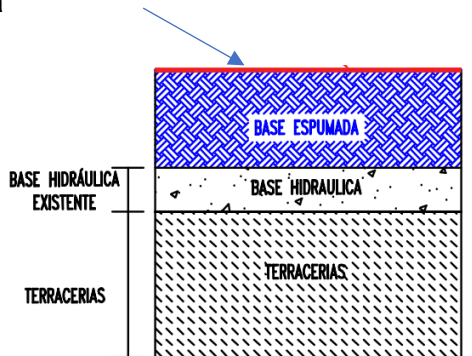


ILUSTRACIÓN 78.- PROPUESTA DE TRATAMIENTO PROFUNDO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Los sectores marcados como “RS” son los puntos donde se requiere un refuerzo superficial menor a 20 mm, con esta información se corrobora el análisis realizado con la evaluación de los estándares de desempeño por lo que se propone un **tratamiento superficial con carpeta asfáltica ultra delgada** (ver ilustración 79), incluyendo aquellos puntos donde los estándares de desempeño solicitan dicho tratamiento.

Carpeta Asfáltica Ultra Delgada

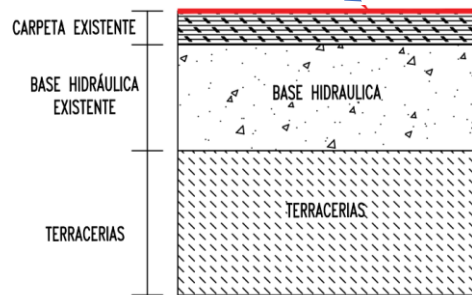


ILUSTRACIÓN 79.- TRATAMIENTO SUPERFICIAL CON CARPETA ASFÁLTICA ULTRA DELGADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

De esta manera se formula el larguillo con la sectorización en función de los resultados del análisis deflectométrico y el cálculo de los espesores de una sobrecarpeta en la superficie actual.

Nivel IV: Para los sectores donde se requiere un tratamiento profundo se analizan los resultados trabajando con la hipótesis de que el nivel de rasante se conservará en todo el camino, para la capa de refuerzo se contempla emplear base espumada formada partir del material producto de la recuperación en frío del pavimento

asfáltico y parte de la base hidráulica existente adicionando Asfalto Espumado²; A partir del análisis de las deflexiones, medición de los espesores con el equipo GPR y el análisis de tránsito³ vehicular sobre el camino, se puede evaluar las condiciones del mismo y a través de una serie de cálculos⁴ pronosticar un espesor requerido el cual en lo sucesivo se considera como **Base espumada con módulo de 10 000 km/cm²** para garantizar un horizonte de proyecto de 5 años considerando la **recuperación en frío de pavimentos asfálticos de la estructura actual con ese mismo espesor** (N.CSV.CAR.4.02.001/03).

El análisis se llevó a cabo para ambos carriles de cada segmento, los resultados se expresan en el **larguillo de rehabilitación**, se debe tener claro que este resultado implica mantener los niveles actuales del pavimento, es decir conservar la rasante actual del camino.

Nivel V: Se realizó una evaluación para determinar el espesor de la **Base espumada con módulo de 10 000 km/cm²** adecuado con una capa ultradelgada de mezcla asfáltica como capa de rodadura y protección de la base espumada, el análisis se realizó y se determinaron tres rangos en función del espesor de la base espumada requerida (ver tabla 15 e ilustración 80).

TABLA 15.- PROPUESTA DE SECTORIZACIÓN DEL TRATAMIENTO PROFUNDO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Tratamiento profundo [mm ref. con base espumada y carpeta asfáltica ultradelgada]			
A	Base Esp + C. Asf UD (Rec: 200 mm)	Ref. >	150
B	Base Esp + C. Asf UD (Rec: 150 mm)	150 > Ref. >	100
C	Base Esp + C. Asf UD (Rec: 100 mm)	100 > Ref. >	20

Espesor con rehabilitación de base Espumada (10 0000 kg/cm ²)	Ref BE																																																			
	Alta	Baja	km	174+000	174+100	174+200	174+300	174+400	174+500	174+600	174+700	174+800	174+900	175+000	175+100	175+200	175+300	175+400	175+500	175+600	175+700	175+800	175+900	176+000	176+100	176+200	176+300	176+400	176+500	176+600	176+700	176+800	176+900	177+000	177+100	177+200	177+300	177+400	177+500	177+600												
							85	10	10	10	41	10	212	10	105	123	105	41	154	164	144	144	10	85	10	10	10	102	157	10	10				133	83	154	164	144	154	10	41	101	112	137	136	98	102	10	10	10	10

ILUSTRACIÓN 80.- EJEMPLO DE CÁLCULO DE REFUERZO ESTRUCTURAL CON BASE ESPUMADA Y CARPETA ULTRADELGADA DEL KM. 174+000 AL KM. 177+600. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

² Material propuesto por la reciente llegada a México de tecnología de recuperación en frío de mezclas asfálticas

³ Datos fueron tomados del acervo de datos viales de la SCT a través de la DGST

⁴ Los cálculos fueron efectuados con el software Elmod 6.0

Con esta clasificación del tratamiento profundo se determinan sectores de tratamiento los cuales dependerán del valor refuerzo estructural calculado con carpeta asfáltica y del refuerzo calculado con base espumada (ver ilustración 81).

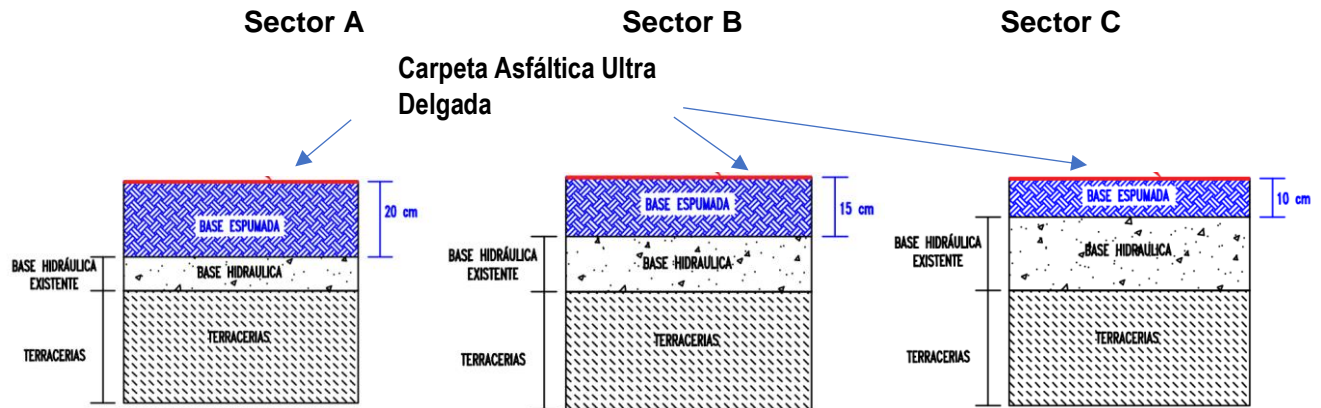


ILUSTRACIÓN 81.- SECTORES PARA EL TRATAMIENTO PROFUNDO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Por otra parte, ya que las mediciones y cálculos se realizaron en puntos a cada 100 metros se sugiere como parte complementaria de esta alternativa, realizar un análisis para determinar los deterioros superficiales existentes como se indica en la norma “N.CSV.CAR.1.03.008/18”, para clasificar los procedimientos y criterios para la determinación del origen de los deterioros y elaborar el un plan de saneamiento en los puntos críticos de una manera adecuada.

SECTORIZACIÓN

En este caso se determinó como 15.8 cm y 16.5 cm en carril de baja y carril de alta respectivamente, como el espesor promedio de recuperación para emplearse como base espumada con módulo de 10 000 km/cm², este espesor le proporcionaría al pavimento el aporte estructural necesario para rehabilitar el tramo para alcanzar un horizonte de proyecto de 5 años (sin incluir los tramos donde se cumplen con los estándares de desempeño que serán tratados con una capa ultradelgada de mezcla asfáltica). No obstante, es conveniente realizar un estudio para determinar las curvas de degradación del pavimento rehabilitado para realizar un programa de intervención y conservar los trabajos propuestos con la posibilidad de extender los horizontes de proyecto y determinar el:

- Programa de Postconstrucción
- Programa de Conservación rutinaria
- Programa de Conservación preventiva y correctiva
- Programa de Administración
- Programa de Ampliaciones en el caso de que se requieran

Así mismo, en el larguillo de rehabilitación se marcan las secciones en las que el tratamiento propuesto cumple con los horizontes de proyecto y prevé en cuales puntos (en los que el requerimiento de base espumada es mayor a 200 mm) se deberá considerar un saneamiento especial, el cual se determinará con el informe de causas en un estudio de deterioros (ver ilustración 82).

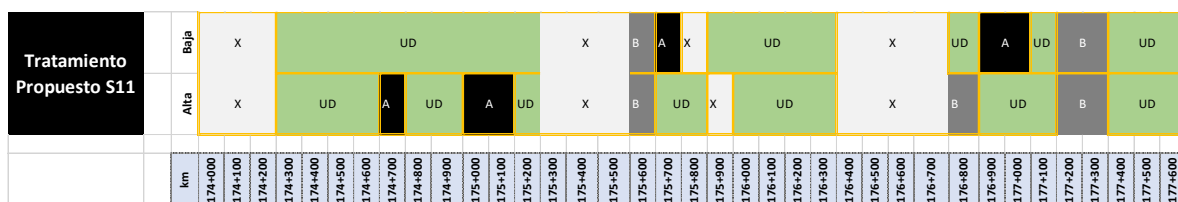


ILUSTRACIÓN 82.- EJEMPLO DE SECTORIZACIÓN DEL REFUERZO ESTRUCTURAL CON BASE ESPUMADA DEL KM. 174+000 AL KM. 177+600. FUENTE: ELABORACION PROPIA

Para efectos de homogeneidad en ambos carriles se propone realizar el tratamiento crítico que requiera cualquiera de los dos carriles, por lo que se determinaron los siguientes sectores de rehabilitación por segmento (ver tabla 16 y tabla 17).

TABLA 16 CARRIL DE BAJA (PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE REHABILITACIÓN). FUENTE: ELABORACION PROPIA

ID	CARRIL DE BAJA			Sector	Tratamiento
	De km	a km	Longitud (km)		
1	174+000	174+300	0.30	X	Tramo en Obra
2	174+300	175+300	1.00	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
3	175+300	175+600	0.30	X	Tramo en Obra
4	175+600	175+700	0.10	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
5	175+700	175+800	0.10	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
6	175+800	175+900	0.10	X	Tramo en Obra
7	175+900	176+400	0.50	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
8	176+400	176+800	0.40	X	Tramo en Obra
9	176+800	176+900	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
10	176+900	177+100	0.20	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
11	177+100	177+200	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
12	177+200	177+400	0.20	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
13	177+400	177+700	0.30	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
14	177+700	177+900	0.20	C	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 100 mm)
15	177+900	178+000	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
16	178+000	178+100	0.10	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
17	178+100	178+200	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
18	178+200	178+500	0.30	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
19	178+500	178+600	0.10	X	Tramo en Obra
20	178+600	178+700	0.10	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
21	178+700	178+800	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
22	178+800	179+100	0.30	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
23	179+100	179+600	0.50	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
24	179+600	179+700	0.10	X	Tramo en Obra
25	179+700	179+900	0.20	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
26	179+900	180+200	0.30	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
27	180+200	180+600	0.40	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada

28	180+600	181+100	0.50	C	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 100 mm)
29	181+100	181+200	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
30	181+200	181+300	0.10	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
31	181+300	181+500	0.20	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
32	181+500	181+700	0.20	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
33	181+700	182+000	0.30	C	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 100 mm)
34	182+000	182+200	0.20	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
35	182+200	182+400	0.20	C	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 100 mm)
36	182+400	182+500	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
37	182+500	182+600	0.10	C	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 100 mm)
38	182+600	182+800	0.20	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
39	182+800	182+900	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
40	182+900	183+100	0.20	X	Tramo en Obra
41	183+100	184+000	0.90	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
42	184+000	184+500	0.50	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
43	184+500	184+600	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
44	184+600	184+700	0.10	C	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 100 mm)
45	184+700	185+000	0.30	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
46	185+000	185+200	0.20	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
47	185+200	185+600	0.40	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
48	185+600	185+900	0.30	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
49	185+900	186+200	0.30	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
50	186+200	186+500	0.30	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
51	186+500	187+500	1.00	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
52	187+500	187+600	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
53	187+600	188+100	0.50	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
54	188+100	188+300	0.20	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
55	188+300	188+400	0.10	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
56	188+400	188+600	0.20	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
57	188+600	188+700	0.10	X	Tramo en Obra
58	188+700	188+800	0.10	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
59	188+800	188+900	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
60	188+900	189+000	0.10	C	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 100 mm)
61	189+000	189+000	0.00	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada

TABLA 17 CARRIL DE ALTA (PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE REHABILITACIÓN). FUENTE: ELABORACION PROPIA

CARRIL DE ALTA					
ID	De km	a km	Longitud (km)	Sector	Tratamiento
1	174+000	174+300	0.30	X	Tramo en Obra
2	174+300	174+700	0.40	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
3	174+700	174+800	0.10	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
4	174+800	175+000	0.20	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
5	175+000	175+200	0.20	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
6	175+200	175+300	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
7	175+300	175+600	0.30	X	Tramo en Obra
8	175+600	175+700	0.10	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
9	175+700	175+900	0.20	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
10	175+900	176+000	0.10	X	Tramo en Obra
11	176+000	176+400	0.40	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
12	176+400	176+800	0.40	X	Tramo en Obra
13	176+800	176+900	0.10	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
14	176+900	177+200	0.30	UD	Carpeta Asfáltica Ultradalgada
15	177+200	177+400	0.20	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)

16	177+400	177+700	0.30	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
17	177+700	177+800	0.10	C	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 100 mm)
18	177+800	177+900	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
19	177+900	178+000	0.10	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
20	178+000	178+100	0.10	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
21	178+100	178+400	0.30	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
22	178+400	178+500	0.10	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
23	178+500	178+600	0.10	X	Tramo en Obra
24	178+600	178+700	0.10	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
25	178+700	178+900	0.20	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
26	178+900	179+100	0.20	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
27	179+100	179+200	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
28	179+200	179+300	0.10	C	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 100 mm)
29	179+300	179+600	0.30	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
30	179+600	179+700	0.10	X	Tramo en Obra
31	179+700	179+800	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
32	179+800	180+100	0.30	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
33	180+100	180+300	0.20	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
34	180+300	180+400	0.10	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
35	180+400	180+600	0.20	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
36	180+600	180+700	0.10	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
37	180+700	182+900	2.20	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
38	182+900	183+100	0.20	X	Tramo en Obra
39	183+100	184+600	1.50	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
40	184+600	184+700	0.10	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
41	184+700	184+800	0.10	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
42	184+800	184+900	0.10	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
43	184+900	185+100	0.20	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
44	185+100	185+200	0.10	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
45	185+200	185+600	0.40	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
46	185+600	185+700	0.10	C	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 100 mm)
47	185+700	186+200	0.50	B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)
48	186+200	187+600	1.40	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
49	187+600	188+100	0.50	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
50	188+100	188+400	0.30	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada
51	188+400	188+600	0.20	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
52	188+600	188+700	0.10	X	Tramo en Obra
53	188+700	188+800	0.10	A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)
54	188+800	189+000	0.20	UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada

De esta manera el tramo será sometido a una serie de trabajos de rehabilitación integral aprovechando las condiciones actuales del tramo y reutilizando el material existente (ver ilustración 83 y tabla 18).

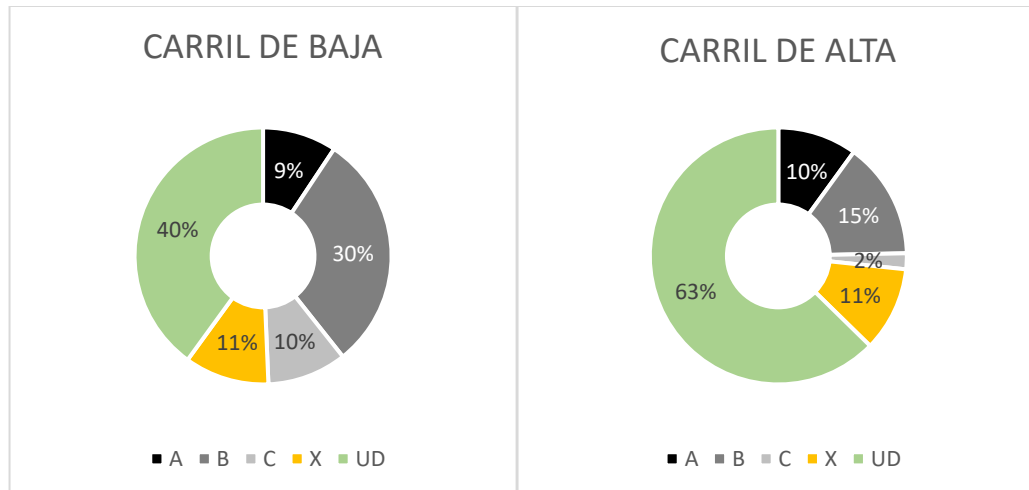


ILUSTRACIÓN 83.- DISTRIBUCIÓN DEL TRATAMIENTO POR SEGMENTO. FUENTE: ELABORACION PROPIA

TABLA 18.- LONGITUD POR TRATAMIENTO PROPUESTO. FUENTE: ELABORACION PROPIA

Sector	Tratamiento CARRIL DE BAJA	longitud [km]	Porcentaje
A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)	1.4	9%
B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)	4.5	30%
C	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 100 mm)	1.5	10%
X	Tramo en Obra	1.6	11%
UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada	6	40%

Sector	Tratamiento CARRIL DE ALTA	longitud [km]	Porcentaje
A	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 200 mm)	1.5	10%
B	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 150 mm)	2.2	15%
C	Base Espumada + CA UD (Recuperando: 100 mm)	0.3	2%
X	Tramo en Obra	1.6	11%
UD	Carpeta Asfáltica Ultradelgada	9.4	63%

LAGUILLO DE REHABILITACIÓN

Deflexion Normalizada 700 kpa 20°C [mm]		TRATAMIENTO Profundo [mm Ref]				Tratamiento Según Desempeño	
0.30 < DN _{max} < 0.50	DN _{max} < 0.30	A	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 200 mm	Ref	> 150	
	0.30 < DN _{max} < 0.50	B	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 150 mm	> Ref	> 100	BE Base Espum + C. Asf UD
0.50 < DN _{max} < 0.60	0.50 < DN _{max} < 0.60	C	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 100 mm	> Ref	> 20	
	DN _{max} > 0.60	UD	Carpeta Asf UltaDelgada		Ref	< 20	UD Carpeta Asf UltaDelgada

CONSERVANDO RANSANTE	km	Tratamiento Propuesto S11		Espesor con rehabilitación de base Espumada (10 0000 kg/cm2)		Espesor de sobrecarpeta (Carpeta Asfaltica)		Tratamiento Según Desempeño		S11 (Cpo B)	
		Baja	Alta	Ref BE	Baja	Alta	Ref CA	Baja	Alta	Alta	Baja
	174+000										
	174+100										
	174+200										
	174+300	X	UD		10	0	0	UD	UD		
	174+400		UD		10	0	0	UD	UD		
	174+500		UD		10	0	0	UD	UD		
	174+600		A		41	0	0	UD	UD		
	174+700		UD		212	56	0	BE	UD		
	174+800		A		105	0	0	BE	UD		
	174+900		UD		105	0	0	BE	UD		
	175+000		A		151	9	34	BE	UD		
	175+100		UD		171	47	59	BE	UD		
	175+200		UD		210	0	0	UD	UD		
	175+300										
	175+400	X									
	175+500										
	175+600	B			144	25	0	BE	UD	2	1
	175+700	A			206	81	0	BE	UD	0	0
	175+800	X			10	0	0	UD	UD	5	5
	175+900		UD		85	0	91	UD	UD	5	5
	176+000				10	0	53	UD	UD	5	5
	176+100		UD		10	0	0	UD	UD	5	5
	176+200				157	0	111	UD	UD	5	3
	176+300				10	0	0	UD	UD	5	5
	176+400	X									
	176+500										
	176+600										
	176+700										
	176+800	UD			83	31	0	BE	UD	2	5
	176+900	A			164	3	0	BE	UD	5	1
	177+000	UD			154	0	44	BE	UD	5	5
	177+100	UD			41	0	0	UD	UD	5	5

		$DN_{max} < 0.30$
	0.30	$DN_{max} < 0.50$
	0.50	$DN_{max} < 0.60$
		$DN_{max} > 0.60$

A	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 200 mm	Ref	>	150
B	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 150 mm	> Ref	>	100
C	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 100 mm	> Ref	>	20
UD	Carpeta Asf UltaDelgada		Ref	<	20

Tratamiento Según Desempeño	
BE	Base Espum + C. Asf UD
UD	Carpeta Asf UltaDelgada

CONSERVANDO RANSANTE	km	Ref BE		Ref CA		Tratamiento Según Desempeño		V _{rem}	V _{rem}	IRI ₀₋₁₀₀	DN _{max}
		Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja				
	177+200	B	UD	0	0	BE	BE	5	5		0.670
	177+300	UD	UD	19	0	BE	BE	3	5		0.533
	177+400	UD	UD	0	0	UD	UD	5	5		0.546
	177+500	C	UD	0	0	BE	UD	5	5		0.339
	177+600	UD	UD	0	0	BE	UD	5	5		0.366
	177+700	UD	UD	0	53	BE	UD	5	5		0.400
	177+800	UD	UD	0	0	BE	UD	5	5		0.502
	177+900	UD	UD	75	0	BE	UD	0	5		0.452
	178+000	UD	UD	81	0	BE	UD	1	1		0.614
	178+100	UD	UD	0	3	UD	UD	5	3		0.586
	178+200	B	UD	0	0	UD	UD	5	2		0.411
	178+300	X	UD	0	0	UD	UD	5	2		0.457
	178+400	X	UD	0	0	BE	BE	5	4		0.499
	178+500	A	UD	0	0	BE	BE				0.596
	178+600	UD	UD	0	0	BE	UD	5	1		0.721
	178+700	UD	UD	0	0	UD	UD	5	5		0.353
	178+800	A	UD	0	0	BE	BE	5	1		0.474
	178+900	A	UD	22	72	BE	BE	2	2		0.700
	179+000	B	UD	34	28	BE	BE	2	1		0.577
	179+100	UD	UD	0	38	BE	BE	5	5		0.480
	179+200	UD	UD	0	34	BE	BE	5	4		0.567
	179+300	UD	UD	16	0	BE	BE	3	1		0.662
	179+400	UD	UD	3	19	BE	BE	4	2		0.579
	179+500	UD	UD	34	53	BE	BE	2	5		0.732
	179+600	UD	UD	0	0	UD	UD				0.635
	179+700	UD	UD	13	0	BE	BE	4	5		0.439
	179+800	UD	UD	0	78	BE	BE	5	5		0.609
	179+900	UD	UD	59	50	BE	BE	1	2		0.681
	180+000	UD	UD	13	59	BE	BE	3	0		0.851
	180+100	UD	UD	0	0	UD	UD	5	2		0.923
	180+200	UD	UD	0	16	UD	UD	5	5		0.398
	180+300	UD	UD	0	72	BE	BE	5	5		0.391
	180+400	UD	UD	0	34	UD	UD	5	5		0.528
	180+500	UD	UD	0	0	UD	UD	5	1		0.443
											0.421

		$DN_{max} < 0.30$
	$0.30 < DN_{max} < 0.50$	
	$0.50 < DN_{max} < 0.60$	
	$DN_{max} > 0.60$	

A	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 200 mm	Ref	>	150
B	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 150 mm	> Ref	>	100
C	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 100 mm	> Ref	>	20
UD	Carpeta Asf UltaDelgada		Ref	<	20

Tratamiento Según Desempeño	
BE	Base Espum + C. Asf UD
UD	Carpeta Asf UltaDelgada

CONSERVANDO RANSANTE	km	Tratamiento Propuesto S11		Ref BE		Ref CA		Tratamiento Según Desempeño		S11 (Cpo B)	
		Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta
	180+600	C	UD	10	12	0	28	BE	BE	2	5
	180+700	C	UD	85	85	0	0	BE	BE	5	5
	180+800	C	UD	10	10	0	0	BE	BE	5	4
	180+900	C	UD	107	88	9	47	BE	BE	4	2
	181+000	C	UD	66	111	0	8	BE	BE	5	2
	181+100	C	UD	66	113	0	41	UD	UD	5	3
	181+200	A	UD	111	173	15	15	UD	UD	3	5
	181+300	UD	UD	10	98	0	0	UD	UD	5	5
	181+400	B	UD	138	69	47	0	UD	UD	1	5
	181+500	C	UD	88	102	0	72	BE	BE	5	4
	181+600	C	UD	116	130	0	0	BE	BE	5	1
	181+700	C	UD	98	10	0	0	BE	BE	5	5
	181+800	C	UD	85	16	0	22	BE	BE	5	5
	181+900	C	UD	10	10	0	50	BE	BE	5	5
	182+000	UD	UD	10	88	0	41	UD	UD	5	5
	182+100	C	UD	69	98	0	31	UD	UD	5	5
	182+200	C	UD	10	10	0	106	UD	UD	5	5
	182+300	C	UD	113	54	0	6	UD	UD	5	5
	182+400	C	UD	85	10	0	0	UD	UD	5	5
	182+500	C	UD	159	54	31	25	UD	UD	2	5
	182+600	B	UD	90	135	0	59	BE	BE	5	2
	182+700	UD	UD	66	130	0	0	BE	BE	5	1
	182+800	UD	UD	57	10	0	0	UD	UD	5	5
	182+900	X	X								
	183+000										
	183+100			154	69	0	0	UD	UD	5	5
	183+200			119	119	0	0	UD	UD	5	2
	183+300			94	76	0	0	UD	UD	5	5
	183+400			107	87	0	0	UD	UD	5	5
	183+500			94	119	0	0	UD	UD	5	2
	183+600			96	127	0	0	UD	UD	5	5
	183+700			41	10	0	0	UD	UD	5	5
	183+800			60	10	0	41	UD	UD	5	5
	183+900			88	54	0	63	UD	UD	5	5
	184+000			96	60	0	0	UD	UD	5	5
	184+100			119	132	0	0	UD	UD	5	3
	184+200			101	60	0	0	UD	UD	5	5
	184+300			178	135	75	0	UD	UD	0	2
	184+400			187	144	6	38	UD	UD	4	1
	184+500			178	126	0	0	UD	UD	5	3

		DN _{max}	<	0.30	
	0.30	<	DN _{max}	<	0.50
	0.50	<	DN _{max}	<	0.60
		DN _{max}	>	0.60	

A	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 200 mm	Ref	>	150	
B	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 150 mm	>	Ref	>	100
C	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 100 mm	>	Ref	>	20
UD	Carpeta Asf UltaDelgada		Ref	<	20	

Tratamiento Según Desempeño	
BE	Base Espum + C. Asf UD
UD	Carpeta Asf UltaDelgada

CONSERVANDO RANSANTE	km	DN _{max}		V _{rem}		IRI@100		Tratamiento Según Desempeño		Espesor de sobrecarpeta (Carpeta Asfáltica)		Espesor con rehabilitación de base Espumada (10 0000 kg/cm2)		Tratamiento Propuesto S11	
		Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja
	184+600	0.643	0.692	0	5			BE	BE	72	0	194	85	A	C
	184+700	0.492	0.461	5	1			UD	UD	0	38	76	171	UD	UD
	184+800	0.593	0.473	3	2			BE	BE	19	6	119	132	B	UD
	184+900	0.364	0.211	5	5			UD	UD	0	0	126	10	UD	UD
	185+000	0.382	0.508	5	2			UD	BE	0	0	57	154	UD	A
	185+100	0.613	0.738	2	1			BE	BE	25	0	138	138	B	UD
	185+200	0.215	0.211	5	5			UD	UD	0	0	23	112	UD	UD
	185+300	0.287	0.236	5	5			UD	UD	0	25	10	82	UD	UD
	185+400	0.250	0.260	5	5			UD	UD	0	0	10	10	UD	UD
	185+500	0.321	0.493	5	3			UD	UD	0	34	66	119	UD	UD
	185+600	0.660	0.692	5	3			BE	BE	0	55	82	123	C	B
	185+700	0.621	0.703	1	5			BE	BE	47	28	132	101	BE	A
	185+800	0.502	0.517	5	5			BE	BE	0	0	151	79	BE	A
	185+900	0.630	0.509	5	1			BE	BE	0	84	135	185	BE	UD
	186+000	0.583	0.566	5	5			BE	BE	0	47	132	123	BE	UD
	186+100	0.644	0.698	1	1			BE	BE	50	0	123	183	BE	UD
	186+200	0.278	0.417	5	2			UD	UD	0	38	10	127	UD	UD
	186+300	0.356	0.232	5	5			UD	UD	0	47	54	10	UD	UD
	186+400	0.498	0.304	5	4			UD	UD	0	0	109	121	UD	UD
	186+500	0.401	0.677	5	1			UD	BE	0	0	101	144	UD	UD
	186+600	0.547	0.581	1	5			BE	BE	47	0	157	124	BE	B
	186+700	0.381	0.488	5	2			UD	UD	0	23	94	123	UD	UD
	186+800	0.416	0.594	3	3			UD	BE	19	34	123	113	UD	UD
	186+900	0.447	0.612	5	1			UD	BE	0	3	82	171	UD	UD
	187+000	0.423	0.592	5	3			UD	BE	0	0	137	115	UD	UD
	187+100	0.412	0.481	5	3			UD	UD	0	63	123	110	UD	UD
	187+200	0.384	0.547	5	1			UD	BE	0	6	79	133	UD	UD
	187+300	0.464	0.388	5	5			UD	UD	0	75	119	76	UD	UD
	187+400	0.426	0.562	5	1			UD	UD	0	42	121	135	UD	UD
	187+500	0.387	0.447	4	5			UD	UD	6	0	113	79	UD	UD

Deflexion Normalizada 700 kpa 20°C [mm]		TRATAMIENTO Profundo [mm Ref]				Tratamiento Según Desempeño	
	$DN_{max} < 0.30$	A	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 200 mm	Ref	> 150	
	$0.30 < DN_{max} < 0.50$	B	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 150 mm	> Ref	> 100	BE Base Espum + C. Asf UD
	$0.50 < DN_{max} < 0.60$	C	Base Espum + C. Asf UD	Rec: 100 mm	> Ref	> 20	
	$DN_{max} > 0.60$	UD	Carpeta Asf UltraDelgada		Ref	< 20	UD Carpeta Asf UltraDelgada

CONSERVANDO RANSANTE	km	Tratamiento Propuesto S11		Ref BE	Ref CA	Tratamiento Según Desempeño		V _{fiem}	V _{fiem}	IRI@100	DN _{max}	
		Baja	Alta			Baja	Alta				Baja	Alta
	187+600	B	A	148	19	BE	BE	3	0		0.578	0.886
	187+700	B	A	137	72	BE	BE	4	1		0.722	0.691
	187+800	B	A	123	6	BE	UD	5	1		0.499	0.668
	187+900	B	A	123	50	BE	BE	2	2		0.586	0.558
	188+000	B	A	148	31	BE	BE	4	1		0.691	0.679
	188+100	UD	UD	148	53	UD	UD	5	1		0.268	0.448
	188+200	A	UD	105	28	UD	UD	5	5		0.305	0.344
	188+300	A	A	223	25	BE	BE	2	0		0.444	0.803
	188+400	B	X	107	59	BE	BE	2	3		0.735	0.672
	188+500	X	A	118	64	BE	BE	1	1		0.574	0.675
	188+600	X	X									
	188+700	B	A	127	72	BE	BE	1	1		0.754	0.647
	188+800	UD	UD	69	0	UD	UD	5	5		0.266	0.291
	188+900	C	UD	91	103	UD	UD	5	5		0.333	0.597
	189+000	UD	UD	10	72	UD	UD	5	5		0.209	0.260

XIV. CONCLUSIONES

El estudio está relacionado con la evaluación estructural del pavimento en la carretera **Arriaga Tapachula en el tramo de Pijijiapan - Mapastepec (Cpo. B) del km 174+000 al km 189+000**. El tramo presenta una combinación de capas y espesores con una estructura de pavimento de carpeta asfáltica y capas granulares, las cuales integran la estructura del pavimento actual con calidades y espesores distintos, motivo por el cual se presenta una variada respuesta estructural del pavimento a los esfuerzos y deformaciones a la que es sometido tanto por el tránsito actual como la respuesta a la deformación por el deflectómetro de impacto.

Las mediciones realizadas con el deflectómetro de impacto se pueden utilizar en la evaluación del estado de las capas del pavimento, basándose exclusivamente en las deflexiones medidas y/o en la forma que presenta la cuenca de deformaciones. Lo anterior toma particular importancia si se considera que los esfuerzos y deformaciones de las capas del pavimento, constituyen los elementos fundamentales en la proyección de programas de rehabilitación, conservación y diseño estructural del pavimento.

Uno de los factores que afectan de manera importante la magnitud de las deflexiones medidas, es la temperatura, por lo que es necesario realizar investigación suficiente para entender mejor este fenómeno. Actualmente, la normativa SCT propone un estándar para considerar una normalización por temperatura para homologar resultados, por otro lado, es indispensable considerar los cambios estacionales en el comportamiento de los pavimentos, particularmente en su cambio de rigidez; lo anterior enfatizado a las variaciones de humedad en las capas del pavimento, sobre todo en las subrasantes y terracerías con materiales finos, donde la humedad y saturación modifican considerablemente el CBR y por lo tanto el módulo.

En cuanto al análisis para determinar el tránsito a ejes equivalente de 8.2 ton, éste se realizó utilizando **la proyección de interés simple**, se emplearon las proyecciones de la configuración del tránsito por año y el TDPA estimado para cada año en el periodo de diseño, se calcularon los ejes equivalentes considerando un factor de carril **FC de 80% y 60% - 40% cargados – vacíos en el cuerpo B respectivamente**, además se realizó una comparación del resultado con la proyección que determina el programa DISPAV obteniendo resultados muy similares, el cálculo de los ejes equivalentes se presenta en el apartado X. Tránsito de Diseño.

La atención para efectuar la rehabilitación del tramo, se dividirá en sectores, en los cuales se señalan los puntos en los que es necesario colocar una rehabilitación con la visión de aprovechar las zonas en donde se cumplen con los estándares de desempeño, adicionalmente se realizó el cálculo del espesor de recuperación para formar una capa como refuerzo estructural cubierta por una carpeta asfáltica ultradelgada, para conservar la rasante actual para un horizonte de proyecto de 5 años.

El procedimiento para sectorizar consistió en calcular el espesor de sobrecarpeta necesario sobre la superficie actual para alcanzar un horizonte de proyecto de 5 años, de este modo se sectorizó el tramo considerando que los tramos que requieren un espesor de refuerzo menor a 2 cm se proponen ser atendidos con un tratamiento superficial de capa ultradelgada de carpeta asfáltica.

Los sectores donde se requiere un refuerzo superficial mayor a 2 cm se proponen ser atendidos con un tratamiento profundo para buscar conservar la rasante actual. En este caso se analizaron la profundidad de recuperación para formar una capa de base espumada de 10 000 kg/cm² de módulo, además se considera como capa de rodadura una Carpeta Asfáltica Ultra Delgada colocado sobre una Base Espumada.

Se determinó que la mejor alternativa para el tratamiento profundo es dividir los sectores donde se requiere recuperar 20 cm como sector A, donde se requiere recuperar 15 cm como sector B y donde se requiere recuperar 10 cm como sector C de la estructura actual y formar con ello una capa del mismo espesor recuperado de base espumada y carpeta asfáltica ultradelgada como capa de rodadura.

Se sugiere realizar estudios post-rehabilitación para determinar las curvas de degradación en los primeros años de todo el tramo para realizar un programa de conservación adecuado tanto económicamente como estructuralmente.

Se opta por emplear un módulo de elasticidad de 10 000 kg/cm² en la base espumada, porque los resultados de las mediciones realizadas con el FWD en tramos de base espumada recién construidos, oscilan entre los 8 000 y 9 000 kg/cm² y se espera que con un correcto control en la construcción de la capa este módulo mejore y llegue a los 10 000 kg/cm².

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfonso Pérez Salazar, P. G. (2004). *Uso y calibración de deflectómetros de impacto en la evaluación estructural de pavimentos*. Queretaro México: Instituto Mexicano Del Transporte.
- Bazi, G. (2012). *Notas del curso evaluation of layer moduli an overlay desing 2012*. San Jose Costa Rica: UCR.
- Corrales, E. S. (2015). *LM-AT-070B-14 Auditoría Proyecto Sifón - La Abundancia*. San Pedro: LanammeUCR.
- DGST, Dirección General de Servicios Tecnicos. (2014). *Guía de Procedimientos y Técnicas para la Conservación de Carreteras en México*. Ciudad de Mexico: SCT.
- Dynatest. (2012). *Quick Start Manual*. Florida: Dynatest International A/S.
- Goktepe, A. B. (2005). *Comparison of multilayer perceptron and adaptive neuro-fuzzy system on backcalculating the mechanical properties of flexible pavements*. Turkia: ARI The Bulletin of the Istanbul Technical University VOLUME 54, NUMBER 3.
- Gopalakrishnan, K. (2010). *La estrategia de evolución de la adaptación de la matriz de covarianza para el retrocálculo del pavimento*. Iowa: Editorial Board.
- Gutiérrez, C. A. (2018). *Teorías para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles: un enfoque mecanicista*. Sanfandila, Qro: Instituto Mexicano Del Transporte.
- Higuera C. H., S. (2008). *Mecánica de pavimentos - Principios basicos*. Colombia: Tunja. ISBN 978-958-660-122-1.
- Hoffman, M. (1982). Backcalculating Nonlinear Resilient Moduli from Deflection data. *Transportation Research Record*, 42-51.
- Horak E. (1988). *Aspects of Deflection Basin Parameters used in a mechanistic rehabilitation design procedure for flexible pavements in South Africa*. South Africa: PhD thesis, Department of Civil Engineering at the University of Pretoria.
- Matamoros, P. L. (2017). *Herramienta de cálculo para retrocálculo de módulos y diseño de sobrecapas asfálticas de pavimentos flexibles en Costa Rica*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica - Facultad de Ingeniería -Tesis.
- Molenaar, A. (2009). *Structural Evaluation and Strengthening of Flexible Pavements Using Deflection Measurements and Visual Condition Surveys*. Delft Belgica: Faculty of Civil Engineering; Delft University of Technology.

- Orozco, R. (2005). *Evaluación de pavimentos flexibles con métodos no destructivos*. México, D.F: Tesis de Doctorado en Ingeniería, UNAM.
- PT5-IMT, Instituto Mexicano Del Transporte. (1992). *Análisis de los Coeficientes de Daño Unitarios correspondientes a los vehículos autorizados en la Red Nacional de Carreteras de México*. Querétaro: Instituto Mexicano Del Transporte.
- Rico A., T. R. (1998). *Pavimentos Flexibles. Problemática, metodologías de diseño y tendencias*. IMT, Querétaro: Publicación Técnica No 104. SCT.
- Sandoval, C. H. (2009). Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de Impacto. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, 73-92.
- SCT. (2016). *Manual Para Obtener los Volúmenes de Tránsito en carreteras*. Mexico: Publicaciones SCT.
- Shahin, M. Y. (2005). *Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots*. New: Springer Science.
- Suárez, E. A. (2013). Factores para el Ajuste de los Módulos de Retrocálculo de Pavimentos. *Revista Ciencia, Innovación y Tecnología (RCIYT) | Vol. III | 2017*, 73-89.
- Trejos, C. (2015). *Herramienta de cálculo complementaria a la Nueva Metodología de Diseño Mecánico Empírico de Pavimentos Flexibles*. San Pedro Costa Rica: Tesis de Licenciatura.
- Zapata, J. B. (2017). *Evaluación Estructural usando Viga Benkelman aplicada a un Pavimento*. Pihura: Repositorio institucional Pihura – Universidad de Piura.
- Zárate, M. (2011). *Evolución de los Pavimentos e importancia de los indicadores de su estado superficial y estructural*. Mexico DF: Sexta conferencia magistral Alfonso Rico Rodríguez.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Del Águila, P. M. "Determinación del módulo resiliente del suelo de fundación mediante método mecanístico–empírico (Método Hogg Simplificado)", Ponencia presentada al XIV Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, La Habana, Cuba, 2007.
- Lukanen, E. O. Pavement Rehabilitation Selection, Final Report. Minnesota, Department of Transportation, Report No. MN/RC 2008-06, January 2008.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2008). Mechanistic- Empirical Pavement Design Guide, Interim Edition: A Manual of Practice. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Asphalt Institute. (2000). Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation (MS-17). Lexington: Asphalt Institute.
- Sánchez, S. (2006). Ampliación y reconstrucción de la carretera federal México-Puebla de la ciudad de Cholula a Santa María Zacatepec, km. 98+300 al km. 103+300. Tesis de Licenciatura. Puebla, México: Universidad de las Américas Puebla.
- Hoffman, M. S.; Del Águila, P. M. Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexión (ensayos no destructivos). Octubre 1985.
- Hoffman, M. y Thompson, M. (1982). Backcalculating Nonlinear Resilient Moduli from Deflection Data. Transportation Research Record 852, pp. 42-51.
- Hoffman, M. (2003). A direct method for evaluating the structural needs of flexible pavements based on FWD deflections". Proc. TRB 82nd annual meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Orozco, R. (2005). Evaluación de pavimentos flexibles con métodos no destructivos. Tesis de Doctorado en Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- Pérez A., Garnica P., Gómez J. y Martínez G. (2004). Uso y calibración de deflectómetros de impacto en la evaluación estructural de pavimentos. SCT – IMT, Publicación Técnica No 252. Sanfandila, Qro,

- Rico A., Orozco J., Téllez R. y Pérez A. (1990). Primera fase sistema Mexicano para la administración de los pavimentos (SIMAP). Documento Técnico No. 3. IMT – SCT, Sanfandila, Querétaro.
- Rico A., Orozco J., Téllez R., Damián S., Pérez A., López D., Solorio R. y Sánchez M. (2002). Sistema de Evaluación de Pavimentos. Publicación Técnica No. 208. IMT – SCT, Sanfandila, Querétaro.
- SCT (2008). Norma oficial mexicana, Nom-012-sct-2-2008, sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal.
- Zárate M. y Lucero M. (2009). Análisis de la respuesta de pavimentos flexibles, utilizando el deflectómetro HWD. Artículo publicado en la revista técnica Asfáltica, No 19 y en las memorias del Sexto Congreso Mexicano del Asfalto. Geosol, S.A. de C.V. México.
- Zárate M. (2011). Evolución de los Pavimentos e importancia de los indicadores de su estado superficial y estructural, sexta conferencia magistral Alfonso Rico Rodríguez. México, D.F.
- Gómez, J., Pérez, A. y Garnica P. (2007). Evaluación estructural de pavimentos utilizando el deflectómetro de impacto HWD (Heavy Weight Deflectometer). NOTAS núm. 108, artículo 1. Instituto Mexicano del Transporte.
- Burmister, D.M. (1945). The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. Journal of Applied Physics, Vol. 15, pp. 126-127, 296-302.
- ASTM Designation D6433 (2003). Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys. West Conshohocken, PA.
- ASTM Designation D5858 (2003). Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory. West Conshohocken, PA
- ASTM Designation D4694 (2003). Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device. West Conshohocken, PA.
- AASHTO (1993). Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C.

- Beltrán Calvo, Gloria Inés (2012). Evaluación estructural de pavimentos flexibles con métodos de inteligencia artificial y auscultación no destructiva. Tesis de Doctorado en Ingeniería, UNAM, México, D.F.
- N.CSV.CAR.1.03.010/17 (2017) Determinación de las deflexiones de un Pavimento (DEF) Normativa para la Infraestructura del Transporte de la DGST (Dirección General de Servicios Técnicos)
- M.MMP.4.07.020/17 (2017) Determinación de las deflexiones Con equipo de Impacto en Pavimentos Flexibles. Normativa para la Infraestructura del Transporte de la DGST (Dirección General de Servicios Técnicos)
- DGST (2008). Obtención de elementos para el pronóstico del comportamiento estructural de los pavimentos (Deflexiones DEF) en diversos tramos de la Red Carretera Federal (Autopistas de Cuota) 2014
- NLT 338/98. (1998).Medida de Deflexiones en Firmes con Deflectómetro de Impacto. Normas del Laboratorio de transporte, España

ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 EQUIPO DISCONTINUO PARA LA DETERMINACIÓN DE DEFLEXIONES VIGA BENKELMAN. FUENTE: UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO	3
ILUSTRACIÓN 2 EQUIPO SEMICONTINUO PARA LA DETERMINACIÓN DE DEFLEXIONES DEFLECTÓMETRO LACROIX. FUENTE: GEOCISA	4
ILUSTRACIÓN 3 EQUIPO DINÁMICO DE APLICACIÓN DE CARGA. FUENTE: INTERNET	4
ILUSTRACIÓN 4 EQUIPO DE IMPACTO FWD. FUENTE: YUTAVE INGENIERIA, SA DE CV	4
ILUSTRACIÓN 5 EFECTO DE LLANTAS EN ARREGLO TRÍDEM; FUENTE: (HIGUERA C. H., 2008)	5
ILUSTRACIÓN 6 PRUEBA DE DEFLEXIÓN POR IMPACTO; FUENTE: PRESENTACIÓN SIMPROMA ARGENTINA S. A.	6
ILUSTRACIÓN 7 CUENCA DE DEFLEXIÓN; FUENTE: INTERNET\FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER	6
ILUSTRACIÓN 8 PRUEBA DE DEFLEXIÓN POR IMPACTO Y CUENCA DE DEFLEXIÓN; FUENTE: TESIS DOCTORAL EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS GLORIA INÉS BELTRÁN CALVO	7
ILUSTRACIÓN 9 ARREGLO DE SENSORES EN EL EQUIPO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES; FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	8
ILUSTRACIÓN 10 ARREGLO DE SENSORES EN EL EQUIPO; FUENTE: MANUAL DE INICIO RÁPIDO FWD - DYNATEST	8
ILUSTRACIÓN 11 EQUIPO FWD EN OPERACIÓN; FUENTE: YUTAVE INGENIERIA SA DE CV	9
ILUSTRACIÓN 12.- DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE DEFLEXIONES; FUENTE: ELABORACION PROPIA	10
ILUSTRACIÓN 13 EJEMPLO DE UNA DEFLEXIÓN NORMALIZADA POR EXTRAPOLACIÓN E INTERPOLACIÓN A 700 KPA; FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	12
ILUSTRACIÓN 14 NOMOGRAMA DE NORMALIZACIÓN POR TEMPERATURA A 20° C; FUENTE: NORMATIVA SCT	15
ILUSTRACIÓN 15 GPR EN FUNCIONAMIENTO; FUENTE: YUTAVE INGENIERIA SA DE CV	16
ILUSTRACIÓN 16 SOFTWARE K2 FW; FUENTE: YUTAVE INGENIERIA SA DE CV	16
ILUSTRACIÓN 17 SECCIÓN DE RADAR DURANTE LA ADQUISICIÓN DE DATOS; FUENTE: K2 FASTWAVE 2.2 MANUAL DE USUARIO	17
ILUSTRACIÓN 18 PROCESAMIENTO DE DATOS B-SCAN; FUENTE: K2 FASTWAVE 2.2 MANUAL DE USUARIO	18
ILUSTRACIÓN 19 LISTA DE ESCÁNERES: FUENTE ELABORACIÓN PROPIA / YUTAVE INGENIERIA SA DE CV	18
ILUSTRACIÓN 20 EJEMPLO DE DATOS DE GPR EXPORTADOS A EXCEL; FUENTE: ELABORACION PROPIA / YUTAVE INGENIERIA SA DE CV	19
ILUSTRACIÓN 21 CONFIGURACIÓN DE UN EJE SENCILLO DUAL DE 8.2 TON; FUENTE: ESPECTROS DE CARGA Y DAÑO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS	20
ILUSTRACIÓN 22 ESPECTROS DE CARGA EN LA CARRETERA LIBRE GÓMEZ PALACIO – JIMÉNEZ (2005); FUENTE: ESPECTROS DE CARGA Y DAÑO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS	20
ILUSTRACIÓN 23 ESTRUCTURA COMÚN DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE; FUENTE INTERNET	25
ILUSTRACIÓN 24 PUNTO DE INFLEXIÓN DE LA CUENCA NORMALIZADA; FUENTE: ANÁLISIS DE ÍNDICES DERIVADOS DE PRUEBAS DE DEFLEXIÓN POR IMPACTO	26

ILUSTRACIÓN 25 ZONAS DE LA CUENCA DE DEFLEXIÓN; FUENTE: ANÁLISIS DE ÍNDICES DERIVADOS DE PRUEBAS DE DEFLEXIÓN POR IMPACTO	27
ILUSTRACIÓN 26 OBTENCIÓN DE MÓDULOS CON EL PROGRAMA ELMOD FUENTE: BELTRÁN (2012)	31
ILUSTRACIÓN 27 'ESPESOR EQUIVALENTE' DE LA CAPA 1 RESPECTO A LA CAPA 2; FUENTE: INTERNET	32
ILUSTRACIÓN 28 EJEMPLO DE DEFLEXIONES MEDIDAS Y CALCULADAS; FUENTE: TESIS "HERRAMIENTA DE CÁLCULO PARA RETROCÁLCULO DE MÓDULOS Y DISEÑO DE SOBRECAPAS ASFÁLTICAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES"	34
ILUSTRACIÓN 29 EJEMPLO DE MÓDULO SUPERFICIAL DE DEFLEXIONES MEDIDAS Y CALCULADAS; FUENTE: TESIS "HERRAMIENTA DE CÁLCULO PARA RETROCÁLCULO DE MÓDULOS Y DISEÑO DE SOBRECAPAS ASFÁLTICAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES"	35
ILUSTRACIÓN 30 EJEMPLOS DE GRÁFICOS DE MÓDULO SUPERFICIAL; FUENTE: (BAZI, 2012).	36
ILUSTRACIÓN 31 EJEMPLO EX.1 MÓDULO SUPERFICIAL; FUENTE: (BAZI, 2012)	36
ILUSTRACIÓN 32 EJEMPLO EX.2 MÓDULO SUPERFICIAL FUENTE: (BAZI, 2012)	37
ILUSTRACIÓN 33 EJEMPLO EX.3 MÓDULO SUPERFICIAL FUENTE: (BAZI, 2012).	37
ILUSTRACIÓN 34 EJEMPLO EX.4 MÓDULO SUPERFICIAL FUENTE: (BAZI, 2012)	38
ILUSTRACIÓN 35 EJEMPLO EX.5 MÓDULO SUPERFICIAL FUENTE: (BAZI, 2012).	38
ILUSTRACIÓN 36 ANÁLISIS DE DATOS CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE	39
ILUSTRACIÓN 37 ANÁLISIS DE ESPESORES GPR CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE	39
ILUSTRACIÓN 38 AJUSTE DEL CUENCO DE DEFLEXIONES CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE	40
ILUSTRACIÓN 39 DISTRIBUCIÓN DE DEFLEXIONES CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE	41
ILUSTRACIÓN 40 ANÁLISIS DE MÓDULOS CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE	42
ILUSTRACIÓN 41 ANÁLISIS DE DEFLEXIONES TEÓRICAS CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE	43
ILUSTRACIÓN 42 FATIGA DE UN PAVIMENTO; FUENTE: INTERNET	44
ILUSTRACIÓN 43 INICIO Y DESARROLLO DE LAS GRIETAS OCASIONADAS POR FATIGA; FUENTE: INTERNET	45
ILUSTRACIÓN 44 AGRIETAMIENTO EN FORMA DE "PANAL" O DE "PIEL DE COCODRILO"; FUENTE: INTERNET	45
ILUSTRACIÓN 45 CURVA TEÓRICA DE DEFORMACIÓN PERMANENTE A LO LARGO DE LA VIDA ÚTIL FUENTE: (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2004)	47
ILUSTRACIÓN 46 REVISIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE	48
ILUSTRACIÓN 47 ANÁLISIS DE VIDA REMANENTE CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE	49
ILUSTRACIÓN 48 ANÁLISIS DE VIDA REMANENTE CON EL PROGRAMA ELMOD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA/YUTAVE	50
ILUSTRACIÓN 49 UBICACIÓN DE LA CARRETERA ARRIAGA – TAPACHULA; FUENTE: INEGI	51
ILUSTRACIÓN 50 OROGRAFÍA DE LA CARRETERA ARRIAGA – TAPACHULA; FUENTE: INEGI	52

ILUSTRACIÓN 51 VISTA EN PLANTA DE LA CARRETERA ARRIAGA – TAPACHULA; FUENTE: GOOGLE EARTH	52
ILUSTRACIÓN 52 ELEVACIONES DE LA CARRETERA ARRIAGA – TAPACHULA; FUENTE: GOOGLE EARTH	53
ILUSTRACIÓN 53 CLIMA DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI	53
ILUSTRACIÓN 54 TEMPERATURA DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI	54
ILUSTRACIÓN 55 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI	54
ILUSTRACIÓN 56 HUMEDAD DEL SUELO DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI	55
ILUSTRACIÓN 57 REGIÓN HIDROLÓGICA DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI	55
ILUSTRACIÓN 58 ESCORRENTÍA DEL SUELO DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI	56
ILUSTRACIÓN 59 GEOLOGÍA DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI	56
ILUSTRACIÓN 60 USO DE SUELO DE LA CARRETERA ARRIAGA - TAPACHULA; FUENTE: INEGI	57
ILUSTRACIÓN 61 EDAFOLOGÍA DE LA CARRETERA ARRIAGA – TAPACHULA; FUENTE: INEGI	57
ILUSTRACIÓN 62 DEFLEXIONES POR KM EN EL CARRIL DE BAJA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	61
ILUSTRACIÓN 63 DEFLEXIONES POR KM EN EL CARRIL DE ALTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	64
ILUSTRACIÓN 64 PROCESO DE NORMALIZACIÓN Y COMPARATIVA CARRIL DE BAJA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	64
ILUSTRACIÓN 65 PROCESO DE NORMALIZACIÓN Y COMPARATIVA CARRIL DE ALTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	65
ILUSTRACIÓN 66 DEFLECTOGRÁMAS CON ZONAS HOMOGÉNEAS EN EL CARRIL DE BAJA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	66
ILUSTRACIÓN 67 GRÁFICA ZX PARA DETERMINAR LAS ZONAS HOMOGÉNEAS EN EL CARRIL DE BAJA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	66
ILUSTRACIÓN 68 DEFLECTOGRÁMAS CON ZONAS HOMOGÉNEAS EN EL CARRIL DE ALTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	66
ILUSTRACIÓN 69 GRÁFICA ZX PARA DETERMINAR LAS ZONAS HOMOGÉNEAS EN EL CARRIL DE ALTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	67
ILUSTRACIÓN 70 ESPESORES CALCULADOS CON GPR EN EL CARRIL DE BAJA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	67
ILUSTRACIÓN 71 ESPESORES CALCULADOS CON GPR EN EL CARRIL DE ALTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	67
ILUSTRACIÓN 72 AJUSTE Y PROYECCIÓN DEL TDPA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	68
ILUSTRACIÓN 73 CLASIFICACIÓN DEL TRANSITO; FUENTE NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-012-SCT-2-2017	69
ILUSTRACIÓN 74 ANÁLISIS DE SIGNO PENDIENTE DE LA GRAFICA ZX. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	87
ILUSTRACIÓN 75.- ESTÁNDARES DE DESEMPEÑO DEL KM. 174+000 AL KM. 177+600. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	132
ILUSTRACIÓN 76.- EJEMPLO DE EVALUACIÓN DE LOS ESTÁNDARES DE DESEMPEÑO DEL KM. 174+000 AL KM. 177+600. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	133
ILUSTRACIÓN 77.- EJEMPLO DE CÁLCULO DE REFUERZO SUPERFICIAL CON CARPETA DEL KM. 174+000 AL KM. 177+600. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	133

ILUSTRACIÓN 78.- PROPUESTA DE TRATAMIENTO PROFUNDO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	134
ILUSTRACIÓN 79.- TRATAMIENTO SUPERFICIAL CON CARPETA ASFÁLTICA ULTRA DELGADA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	134
ILUSTRACIÓN 80.- EJEMPLO DE CÁLCULO DE REFUERZO ESTRUCTURAL CON BASE ESPUMADA Y CARPETA ULTRADELGADA DEL KM. 174+000 AL KM. 177+600. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	135
ILUSTRACIÓN 81.- SECTORES PARA EL TRATAMIENTO PROFUNDO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	136
ILUSTRACIÓN 82.- EJEMPLO DE SECTORIZACIÓN DEL REFUERZO ESTRUCTURAL CON BASE ESPUMADA DEL KM. 174+000 AL KM. 177+600. FUENTE: ELABORACION PROPIA	137
ILUSTRACIÓN 83.- DISTRIBUCIÓN DEL TRATAMIENTO POR SEGMENTO. FUENTE: ELABORACION PROPIA	140