



Instituto
Mexicano del
Transporte

COORDINACION DE INFRAESTRUCTURA

INFORME DE INVESTIGACIÓN

PROYECTO No. IE 14/10
EVALUACIÓN SUPERFICIAL Y ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO DE CONCRETO
HIDRÁULICO DEL LIBRAMIENTO NORESTE DE QUERÉTARO.

Responsable del proyecto:

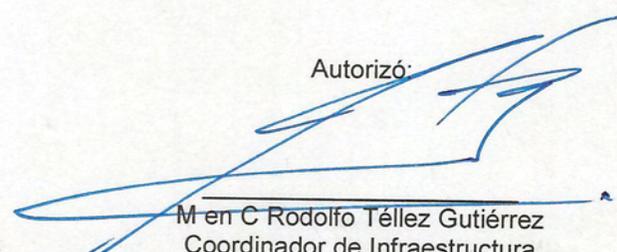

M en I José Antonio Gómez López
Investigador

Área de Mecánica de Rocas, Agregados y Concretos

Aprobó:


Dr. Paul Garnica Anguas
Jefe de la División de Laboratorios de Infraestructura

Autorizó:


M en C Rodolfo Téllez Gutiérrez
Coordinador de Infraestructura

Sanfandila. Qro., septiembre de 2011

Este trabajo fue realizado en la División de Laboratorios de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte por los investigadores M en I José Antonio Gómez López, Ing Alfonso Pérez Salazar, M en I Roberto Israel Hernández Domínguez, M en C Mayra Flores Flores y los técnicos Téc Miguel Ángel Cervantes Nieto, Téc Luis Alberto Pérez Cortés y Téc Mario Antonio Pérez González.

Índice.

1. Introducción.	4
1.1 Objetivo del estudio	4
2. Antecedentes.	5
3. Características físicas del libramiento Noreste de Querétaro.	7
3.1 Datos generales del entorno	7
3.2 Características geométricas del libramiento	8
3.3 Diseño estructural	10
4. Evaluación estructural del pavimento utilizando el Deflectómetro de impacto.	12
4.1 Arreglo de medición	12
4.2 Trabajos desarrollados para la evaluación estructural del pavimento	15
4.3 Resultados de la evaluación con Deflectómetro de Impacto	23
4.4 Resultados de la evaluación de transferencia de carga en juntas	36
4.5 Detección de vacíos en losas de pavimento hidráulico	37
4.6 Evaluación de los deterioros en el libramiento Noreste de Querétaro.	39
5. Determinación de la regularidad superficial con Perfilómetro Láser.	45
5.1 Determinación del Índice de Regularidad superficial, IRI	45
Conclusiones.	52
Referencias.	54

1 Introducción.

El Ingeniero José San Martín Romero Director General de la Dirección General de Desarrollo Carretero de la SCT, solicitó al Instituto Mexicano del Transporte el estudio que permita conocer la condición actual del Libramiento Noreste de Querétaro. La evaluación consistió en la determinación de la capacidad estructural del pavimento de concreto mediante el empleo del deflectómetro de impacto (HWD) y la determinación de la regularidad superficial con perfilómetro láser obteniendo el Índice Internacional de Regularidad (IRI). El Deflectómetro de impacto se utilizó para la determinación de las deflexiones en centros de losas, transferencia de carga en juntas y la detección de vacíos mediante la aplicación de cargas en las esquinas; los trabajos se realizaron en ambos cuerpos en los carriles de baja velocidad. En el caso del Índice Internacional de Regularidad éste se determinó en los cuatro carriles en todo el libramiento que va desde el kilómetro 0+000 hasta el kilómetro 37+000.

Objetivo del estudio.

Determinar las características de regularidad superficial y la capacidad estructural del pavimento hidráulico del Libramiento Noreste de Querétaro. Así como determinar la distribución de las condiciones de regularidad de la superficie del pavimento y estimar la vida remanente del pavimento en términos de los criterios de operación para una funcionalidad óptima en autopistas de cuota.

2. Antecedentes.

El libramiento Noreste de Querétaro nació en el año 1991-1992 por la necesidad de desviar el tránsito con pares origen destino diferente a la ciudad de Querétaro, principalmente para destinos que van hacia el norte del país pasando principalmente por el estado de Guanajuato y San Luís Potosí.

La construcción del libramiento Noreste originalmente fue como un pavimento flexible formado por una estructuración típica de carretera, en la siguiente tabla se presentan los espesores de las capas que lo conformaron.

Tabla 1. Estructura correspondiente al pavimento asfáltico
Libramiento Noreste de Querétaro.

Capa	Espesor cm
Carpeta asfáltica	12
Base hidráulica	12
Subbase hidráulica	16
Subrasante	24

En el libramiento Noreste existen zonas con cortes y terraplenes de gran importancia, donde los espesores del terraplén pueden alcanzar valores hasta de diez metros.

Es necesario enfatizar que el pavimento nació para ciertas exigencias del transporte como son, cierto nivel de tránsito, determinados materiales y las condiciones climáticas del lugar.

A los pocos años el pavimento asfáltico comenzó a presentar problemas serios, pues los índices de servicio estaban comprendidos entre 2,5 y 3,8, con deflexiones características por encima de las 1600 μm , presencia de baches, roderas de consideración, además del agrietamiento superficial en forma de piel de cocodrilo. Probablemente la sección estructural no fue suficiente para los niveles de tránsito que circulaban en el libramiento. Por lo anterior, surge la necesidad de construir sobre la carretera existente un pavimento rígido donde la superficie de rodamiento corresponde a una losa de concreto hidráulico con espesor promedio de 28 cm y construido con juntas.

En el diseño del pavimento de concreto hidráulico se consideró la metodología establecida en la Guía AASHTO 1993 para el caso de pavimentos tipo: JPCP (Jointed Plain Concrete Pavement) o pavimento de concreto simple con juntas.

Antes de la ejecución de los trabajos relacionados con la construcción de la losa de concreto hidráulico se realizó la reparación de los baches y la renivelación de tramos con excesivas deformaciones, alternando los trabajos con recuperación de materiales y dando nuevamente la renivelación requerida para que a partir de esta condición se construyera la losa de concreto.

A los primeros años de operación del nuevo pavimento (rígido) con superficie de concreto hidráulico dio inicio la aparición de deterioros superficiales como son: agrietamiento superficial tipo malla de gallinero, oquedades que llegaron a ser de consideración, deterioros en juntas longitudinales y transversales, agrietamiento longitudinal y transversal de consideración, hasta fracturamiento de losas y fallas en esquinas. Todo lo anterior trae como consecuencia una reducción notable en el Índice de Regularidad Internacional y por consiguiente el incremento en los costos de operación vehicular.

Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE) solicitó estudios tanto a la empresa Geosol S.A. de C.V. como al mismo Instituto Mexicano del Transporte con el fin de conocer la problemática asociada al Libramiento Noreste de Querétaro. Encontrándose problemas serios relacionados probablemente con la construcción y con la calidad de los materiales que constituyeron la obra. Además, es necesario señalar que el incremento en el tránsito sobre el libramiento se vió influenciado notablemente debido a que en el año 2000-2001 el gobierno del estado de Querétaro prohibió el paso de vehículos pesados sobre la ciudad de Querétaro pues se argumentó que si los vehículos eran de largo itinerario no tenían porque pasar a Querétaro generando además problemas viales de consideración. Los datos viales arrojan crecimientos del tránsito del año 2000 al 2001 cercanos al 100 % y en donde el crecimiento era principalmente de vehículos de carga los cuales originalmente no estaban contemplados en el diseño del pavimento rígido. Por lo cual se acentuaron e incrementaron los problemas tanto del tipo funcional como estructural.

3. Características físicas del libramiento.

3.1 Datos generales del entorno.

El Libramiento Noreste de Querétaro, es una carretera de cuota con origen en un entronque de la autopista México - Querétaro ubicado aproximadamente a 15 km al oriente de la ciudad de Querétaro, y destino en un distribuidor vial que lo enlaza con las carreteras federales Querétaro - San Luis Potosí y Tanque Blanco - San Miguel de Allende, a unos 30 km de la misma ciudad. El trazo predominante del libramiento coincide aproximadamente con la dirección SE-NW, como se aprecia en la Figura 1.

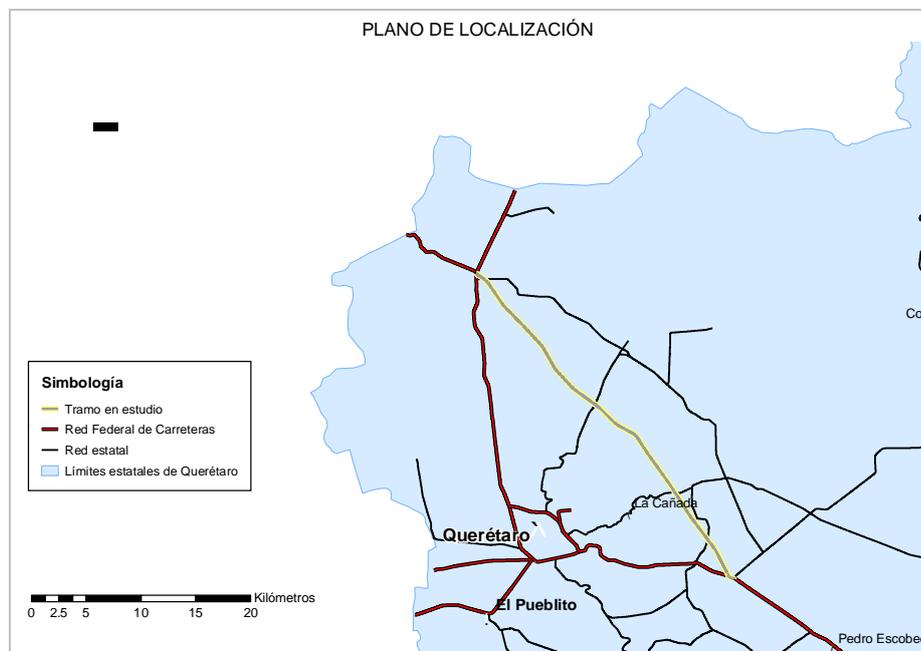


Figura 1. Ubicación geográfica del libramiento noreste de Querétaro.

Desde el punto de vista geológico, el libramiento se encuentra en la provincia fisiográfica conocida como **El Eje Neovolcánico**, la cual atraviesa la República Mexicana en forma transversal. La región se caracteriza por la abundancia de rocas ígneas como andesitas, riolitas, basaltos y brechas volcánicas. En las partes bajas pueden encontrarse principalmente materiales fluviales y lacustres, entre los cuales figuran arcillas y limos de alta compresibilidad.

Las rocas ígneas (del latín igneus que significa "fuego") constituyen la mayor parte de la porción de la tierra. Las rocas ígneas extrusivas se forman a partir del enfriamiento y solidificación del magma (masa rocosa/viscosa cuyos elementos principales son el sílice y el oxígeno, además del potasio, calcio, magnesio y hierro). Las principales rocas ígneas extrusivas son: la riolita, la dacita, la andesita y el basalto.

Con respecto a la topografía de la zona, el libramiento puede dividirse en los siguientes tramos según el tipo de terreno: plano entre los cadenamientos 0+000 . 7+500, lomerío suave a medio del km. 7+500 al 29+500, lomerío suave a terreno plano del 29+500 al 32+500, y nuevamente lomerío suave a medio del 32+500 al 37+000. En los tramos en lomerío se aprecian zonas de corte y terraplén con alturas de consideración en ambos casos. En lo referente al alineamiento horizontal, el trazo del camino en estudio puede caracterizarse como predominantemente recto.

De acuerdo con la clasificación de climas de Vladimir Köepen, en la región en la que se desarrolla el libramiento pueden encontrarse los climas semiseco semicálido (*BS1hw(w)*) y semiseco templado (*BS1kw(w)*). El primero se caracteriza por una temperatura media anual que oscila entre 18 y 19°C, y afecta al tramo comprendido entre el origen del libramiento y el km. 13+400. Para el clima *BS1kw(w)* la temperatura media anual se ubica entre 16 y 18 °C; este tipo de clima incide sobre el tramo 13+400 . 31+185. En ambos tipos de clima la precipitación total anual varía entre 450 y 630 mm, y el porcentaje de lluvias en invierno es menor a 5%.

3.2 Características geométricas del libramiento.

El camino en estudio es una autopista de cuatro carriles construida con base en dos secciones tipo. La primera comprende al tramo ubicado entre el km 0+000 y el km 9+000, y está compuesta por dos cuerpos con un ancho de corona de 10,5 m, separados por una franja central con un ancho variable del orden de 10 m. La segunda sección es de un solo cuerpo con 21 m de ancho de corona dividido por un muro de concreto como separación central, de manera que cada sentido de circulación tiene un ancho de calzada de 7,0 m. Esta sección se encuentra presente del km 9+000 hasta el km 37 + 000 que corresponde con el entronque de la carretera Querétaro . San Luis Potosí, con una interrupción de aproximadamente 120 m en la zona del

diamante de la plaza de cobro Chichimequillas ubicada en el km 20+200. En ambos sentidos de circulación del tramo 0+000 . 27+750 y en el tramo 27+750 . 37+000 con dirección a San Miguel de Allende, los dos tramos comparten el arreglo geométrico que se muestra en la Figura 2 con respecto a los anchos de carril y acotamientos, la posición de las juntas longitudinales y el largo de las losas en cada sentido de circulación. Las dimensiones señaladas en la figura corresponden a valores promedios ya que existen zonas en las que el acotamiento exterior llega a alcanzar 2,50 m, mientras que en otras es de apenas 2,00 m.

En el tramo comprendido entre los km 27+750 . 37+000 con dirección a la Ciudad de México, el arreglo geométrico del pavimento corresponde al señalado en la Figura 3. Dicha disposición entre juntas es un factor agravante del proceso de deterioro en este tramo debido a que las cargas de los vehículos pesados inciden directamente en la junta longitudinal.

En lo que respecta al drenaje, en general las obras de drenaje superficial existentes (alcantarillas y, en las zonas de lomerío, cunetas y lavaderos) se encuentran en buen estado y funcionan correctamente, lo que, aunado a un bombeo del pavimento que puede considerarse adecuado, permite garantizar que el desalojo de agua no debería representar un problema de consideración para la carretera en estudio. Sin embargo, existen daños en el sello de juntas tanto longitudinales como transversales lo que significa la posible infiltración de agua hacia la estructura del pavimento.

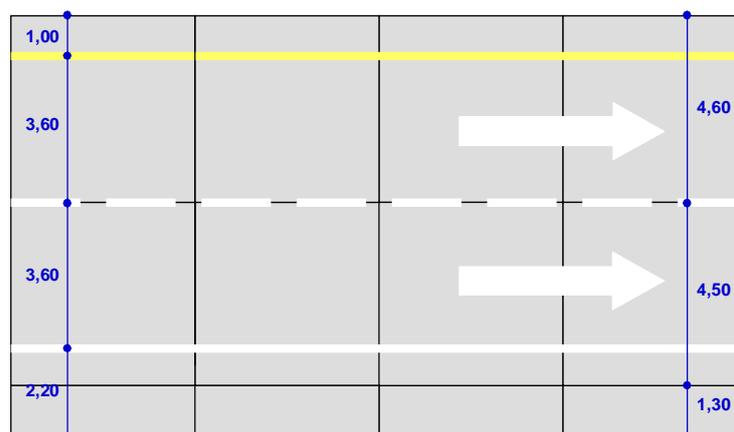


Figura 2. Sección transversal libramiento noreste de Querétaro (cotas en metros).
Tramos: cadenamiento 0+000 . 27+750 (ambos sentidos);
cadenamiento 27+750 . 37+000 (dirección a San Miguel de Allende).

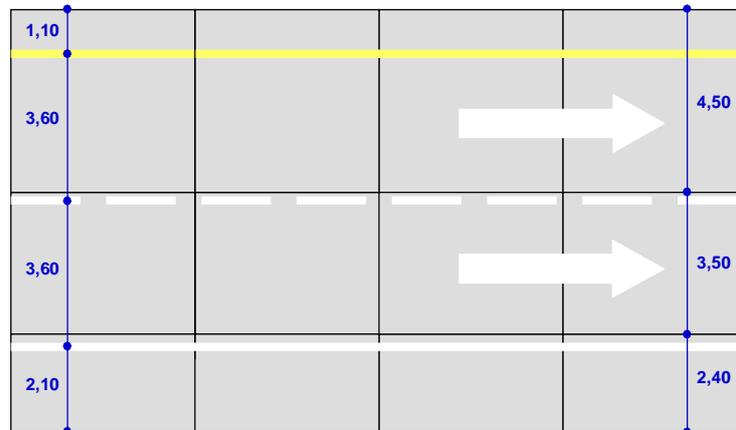


Figura 3. Sección transversal del libramiento noreste de Querétaro del km 27+750 al km 37+000 con dirección a la Ciudad de México (cotas en metros).

3.3 Diseño estructural.

El Libramiento Noreste de Querétaro cuenta en toda su longitud con un pavimento de concreto hidráulico del tipo *JPCP* (*Jointed Plain Concrete Pavement* o pavimento de concreto simple con juntas), el cual se encuentra apoyado sobre un pavimento asfáltico preexistente. En la Figura 4 se muestra la sección estructural actual de pavimento rígido.



Figura 4. Sección estructural típica del libramiento Noreste de Querétaro.

El diseño del pavimento rígido se realizó para las condiciones de tránsito que prevalecían en su momento, considerando una vida útil de 30 años, un total de 40 millones de ejes equivalentes sobre la superficie, módulo de ruptura del concreto de 680 psi (4680 kPa); dando como resultado un espesor de losa de 28 cm (11 pulgadas).

4. Evaluación estructural del pavimento utilizando el Deflectómetro de Impacto.

La evaluación estructural no destructiva utilizada en el libramiento noreste de Querétaro fue utilizando el deflectómetro de impacto Dynatest. La evaluación se realiza a partir de la medición de las deflexiones obtenidas después de aplicar impactos sobre el pavimento. Con los resultados de las mediciones se determinan las áreas de las cuencas deformadas, así como el análisis del nivel de deflexión justamente donde se aplica la carga la cual está asociada fundamentalmente con la capa de concreto hidráulico. En el caso de las deflexiones que se obtienen en los sensores más alejados dichos valores están relacionados con la calidad de los materiales que conforman la parte profunda de la estructura carretera.

Los resultados de las mediciones de deflexiones con Deflectómetro de Impacto (HWD), y evaluación superficial para la determinación de IRI en el Libramiento Noreste de Querétaro corresponden con los tramos evaluados según la Tabla 2.

Tabla 2. Relación de tramos evaluados en la Carretera Federal 57 D, carriles de baja velocidad

Tramo	Sentido	Ubicación	Cadenamiento
1	Querétaro . San Luis Potosí	Libramiento Noreste de Querétaro	0+000 - 37 + 000
2	San Luis Potosí- Querétaro	Libramiento Noreste de Querétaro	37+000 - 0 + 000

4.1 Arreglo de medición.

Las mediciones se realizaron con el arreglo que se indica en la Figura 5. Los valores D_0 , D_{20} , D_{30} , D_{45} , D_{60} , D_{90} , D_{120} , D_{150} corresponden a las deflexiones medidas en micras normalizadas para una presión de contacto en la placa igual a 700 kPa. En la Figura 6 se puede observar el deflectómetro de impacto (Dynatest) utilizado en la evaluación estructural; también se aprecia el agrietamiento superficial de tipo transversal que se encuentra en muchas de las losas evaluadas.

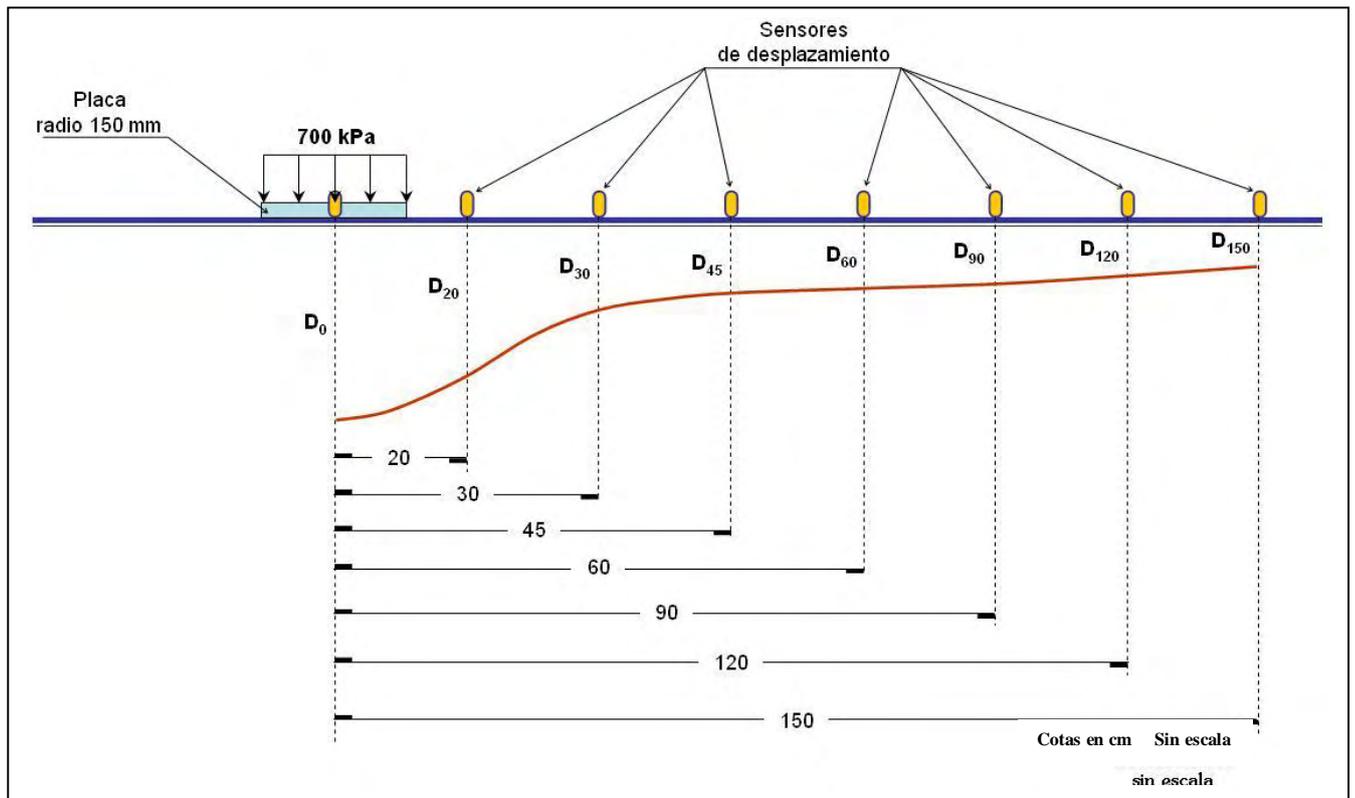


Figura 5 Arreglo utilizado en el Deflectómetro de Impacto para la evaluación del libramiento noreste de Querétaro.

Con la medición de deflexiones y utilizando un proceso conocido como retrocálculo se pueden obtener los módulos elásticos del concreto hidráulico así como el de la capacidad portante del terreno, es decir, el módulo de reacción de la subrasante (k). Dichos parámetros son necesarios para realizar el análisis de vida remanente en el pavimento.



Figura 6 Deflectómetro de impacto utilizado en la evaluación estructural del libramiento Noreste de Querétaro.



Figura 7. Vista del tramo carretero en estudio.

4.2 Trabajos desarrollados para la evaluación estructural del pavimento.

- a) Evaluación de la capacidad estructural del pavimento hidráulico, mediante el retrocálculo de los módulos elásticos de la losa de concreto y del terreno de cimentación.

En ingeniería de pavimentos, la deflexión se define como el desplazamiento vertical de la superficie de un pavimento producida por la aplicación de una carga. De acuerdo con la teoría elástica multicapa, la deflexión que ocurre en el punto de aplicación de la carga se relaciona con la capacidad estructural de la superficie de rodamiento, mientras que las deflexiones registradas en los geófonos más alejados del punto de aplicación están relacionadas con la capacidad de estratos cuya profundidad es mayor cuanto mayor es esa distancia, en este caso son las terracerías (por ejemplo capa subrasante).

Por lo tanto, para determinar la evaluación estructural de una carretera es necesario que se apliquen cargas en los puntos con cadenamientos seleccionados previamente, con el fin de determinar la cuenca de deflexiones o área de la cuenca generada con la aplicación de las cargas. De este modo se conocen de manera inmediata las deflexiones en el primer sensor las cuales están relacionadas con la capacidad estructural de la capa superficial. Deflexiones altas obedecen en principio a superficies deformables, las bajas indican una buena capa de rodamiento. Lo mismo ocurre para las deflexiones en los geófonos alejados que indican la presencia de una buena subrasante o el caso contrario.

Para el presente estudio se realizaron mediciones a cada 500 m a lo largo de los 37 km que constituyen el libramiento noreste, dichas mediciones fueron realizadas en los carriles de baja velocidad y las deflexiones son las obtenidas después de aplicar las cargas en el centro de losas. El arreglo de cargas fue tal que se aplicaron cuatro impulsos de carga de los cuales dos corresponden a esfuerzos por debajo de 700 kPa y los otros dos por arriba de los 700 kPa.

Los datos de deflexiones combinados con información sobre el espesor de las capas del pavimento, permiten estimar los módulos de elasticidad *in situ* de las diferentes capas, así como el módulo de reacción de la subrasante, mediante un proceso conocido como retrocálculo. Estos resultados constituyen insumos básicos para el diagnóstico de la capacidad estructural del pavimento y para el diseño de acciones de rehabilitación.

Para el retrocálculo con las deflexiones obtenidas y normalizadas a 700 kPa se utilizó el método AREA-7 de la FHWA el cual permite determinar los módulos de elasticidad del concreto (E_c) y de reacción de la subrasante, k . Es necesario señalar que los parámetros obtenidos corresponden con la respuesta del pavimento ante las aplicaciones de carga y no son las correspondientes a los materiales.

b) Análisis de transferencia de carga entre losas.

Para el análisis de transferencia de carga entre juntas de losas de pavimento se realizaron mediciones de deflexiones en el libramiento noreste a cada 500 m en juntas en los carriles de baja y en ambos sentidos.

Cuando la deflexión obtenida en donde se aplica la carga es la misma que la de la losa adyacente se dice que la transferencia de carga es del 100 % (AASHTO 1993), y corresponde al caso en que el pavimento trabaja satisfactoriamente; valores por arriba de 80 % se consideran adecuados, en caso contrario la transferencia es regular o incluso mala lo cual puede generar principalmente problemas de despostillamiento y hasta rotura en esquinas haciendo que el pavimento se deteriore con el tiempo.

Para el análisis de transferencia de carga se utiliza la siguiente expresión:

$$T_c = 100 \frac{d_u}{d_1}$$

donde:

T_c : Porcentaje de transferencia de carga.

d_1 : Deflexión de la losa sometida al impacto.

d_u : Deflexión de la losa sin cargar.

Además, como parámetro de comparación se evaluará la transferencia de carga con la siguiente expresión [NCHRP, 1995]:

$$T_c = \frac{2d_u}{d_1 + d_u} 100$$

c) Análisis de detección de vacíos bajo las losas, aplicación de cargas en esquinas.

Para la determinación del análisis de vacíos debajo de las losas se realizaron los ensayos con deflectómetro de impacto aplicando diferentes niveles de carga en las esquinas de las losas, en este caso justamente después de la junta transversal y junto a la longitudinal. Los trabajos de deflexiones para este rubro fueron realizados a cada kilómetro y solamente en carriles de baja velocidad (ambos sentidos).

Se grafican los diferentes niveles de carga contra la deflexión, se espera que la proyección de la línea pase por el origen cuando no existen vacíos importantes bajo las losas, es decir, deflexión %ero+ para esfuerzo cero. En el caso de que la proyección de la recta pase alejada del origen se considera que en el lugar pueden existir vacíos considerables, debido a la inconsistencia de la relación de carga contra la deflexión.

El nivel de vacíos que pueda estar presente en las losas analizadas no se cuantifica simplemente es un indicio del mal soporte que hay entre base y losa de concreto lo cual puede propiciar problemas serios de fallas en esquinas por la concentración de cargas a la que se expone el pavimento hidráulico cuando circulan por éste principalmente vehículos pesados.

d) Resultados obtenidos en el estudio realizado al Libramiento Noreste de Querétaro en 2005.

A solicitud de Caminos y Puentes Federales el Instituto Mexicano del Transporte realizó (2005) un estudio en el Libramiento Noreste de Querétaro en el que se realizaron estudios relacionados a la evaluación estructural y superficial del pavimento de concreto.

De la Figura 8 a la 18 se presentan condiciones estructurales y superficiales del pavimento las cuales pueden ser comparadas con las obtenidas recientemente y que son presentadas más adelante.

En las Figuras 8 y 9 se presentan los valores de Índice de Regularidad Internacional para ambos cuerpos del libramiento Noreste, se observa que los valores se encontraban entre 3,0 y

3,5 m/km en todos los carriles de circulación, encontrándose valores mayores entre los cadenamientos 20+000 y 36+500 para ambos cuerpos.

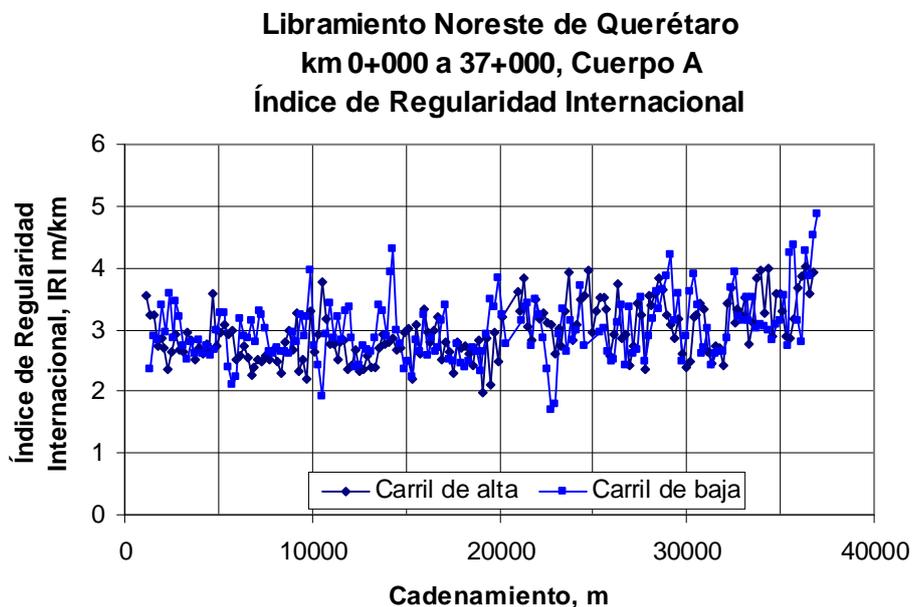


Figura 8. Evolución del Índice de Regularidad Internacional en el cuerpo A, libramiento noreste de Querétaro (2005).

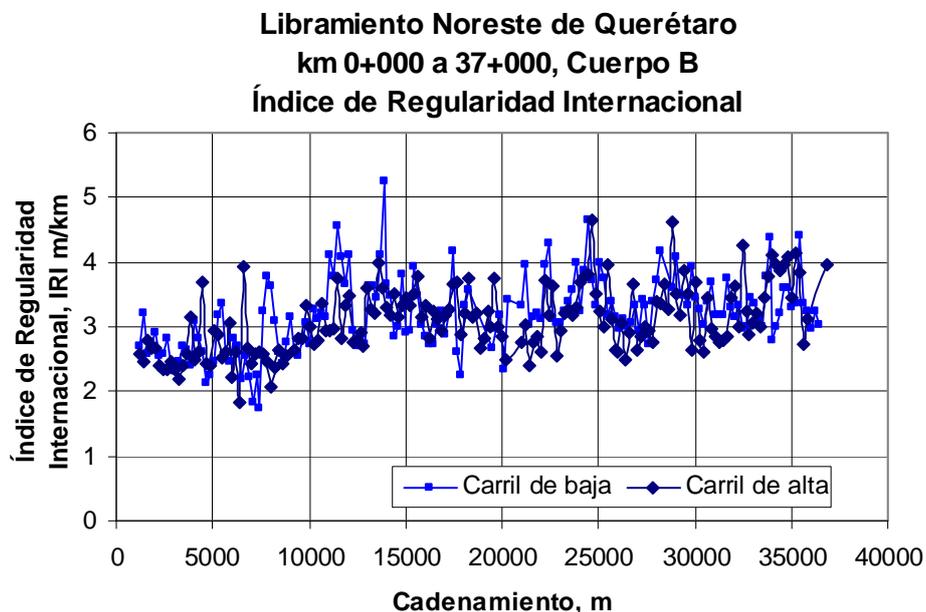


Figura 9. Evolución del Índice de Regularidad Internacional en el cuerpo B, libramiento noreste de Querétaro (2005).

En las Figuras 10 y 11 se presentan los resultados de deflexiones obtenidas para el sensor central del pavimento de concreto (2005), los valores se encuentran en términos generales entre 100 y 150 micras, es necesario señalar que el nivel de agrietamiento y de rotura de losas era mayor en el cuerpo B, principalmente entre el km 20+000 y el km 36+500.

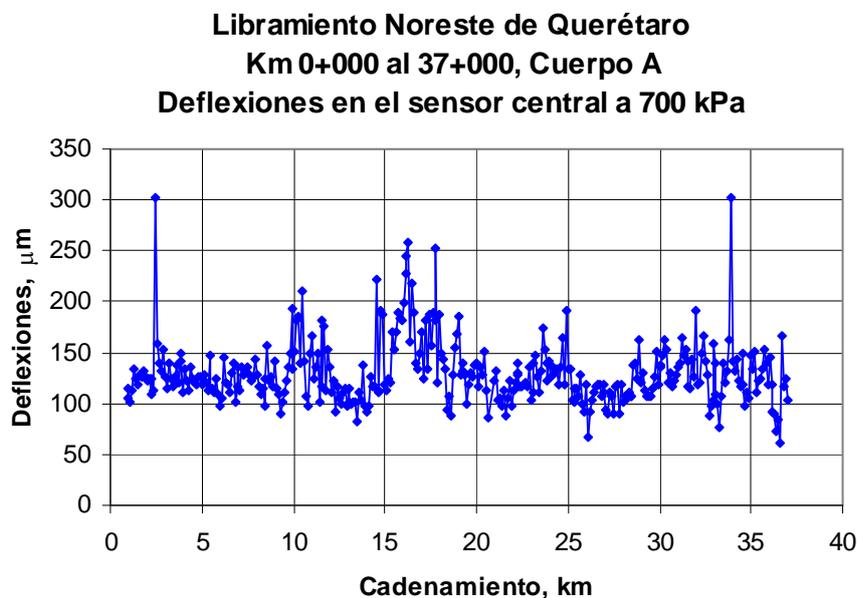


Figura 10. Evolución de las deflexiones en el sensor central en el cuerpo A, libramiento noreste de Querétaro (2005).

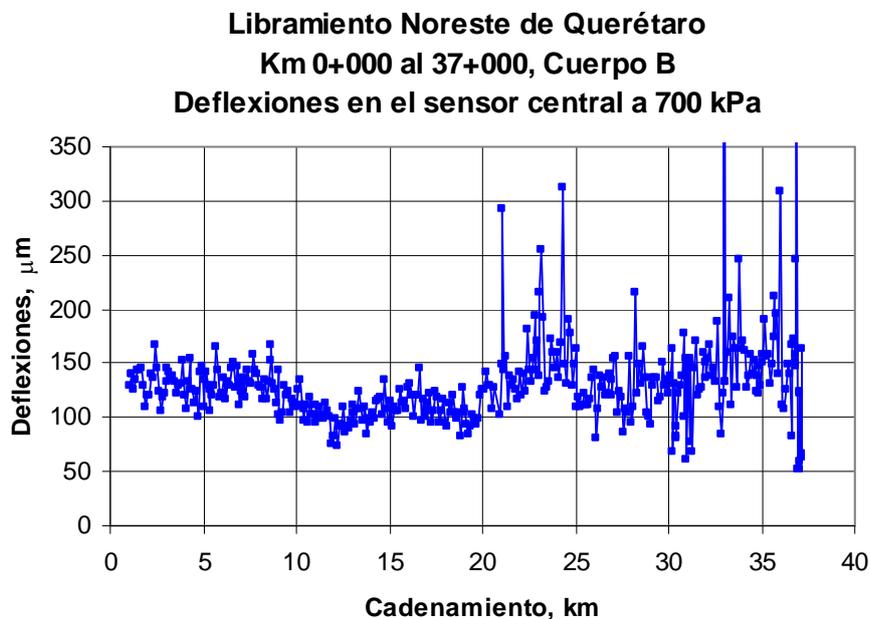


Figura 11. Evolución de las deflexiones en el sensor central cuerpo B, libramiento noreste de Querétaro (2005).

En las Figuras 12 y 13 se presenta la evolución del módulo de elasticidad del concreto, E_c , para el libramiento noreste de Querétaro, los módulos fueron retrocalculados utilizando ÁREA-7 del FHWA. Se observa la variación de los módulos encontrándose los valores más bajos en el cuerpo B entre el km 20+000 y el km 36+500.

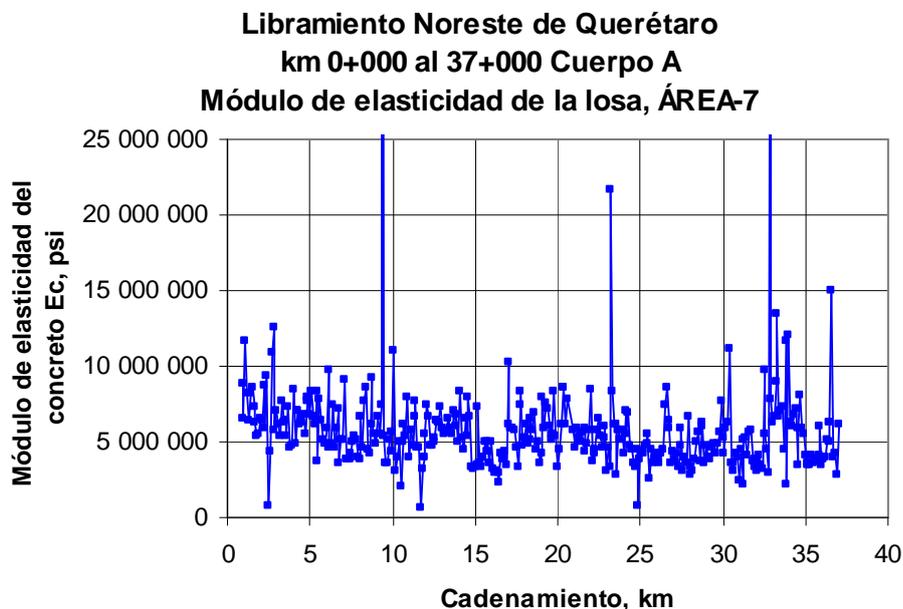


Figura 12. Retrocálculo de los módulos de elasticidad del concreto (ÁREA-7 FHWA) cuerpo A, libramiento noreste de Querétaro (2005).

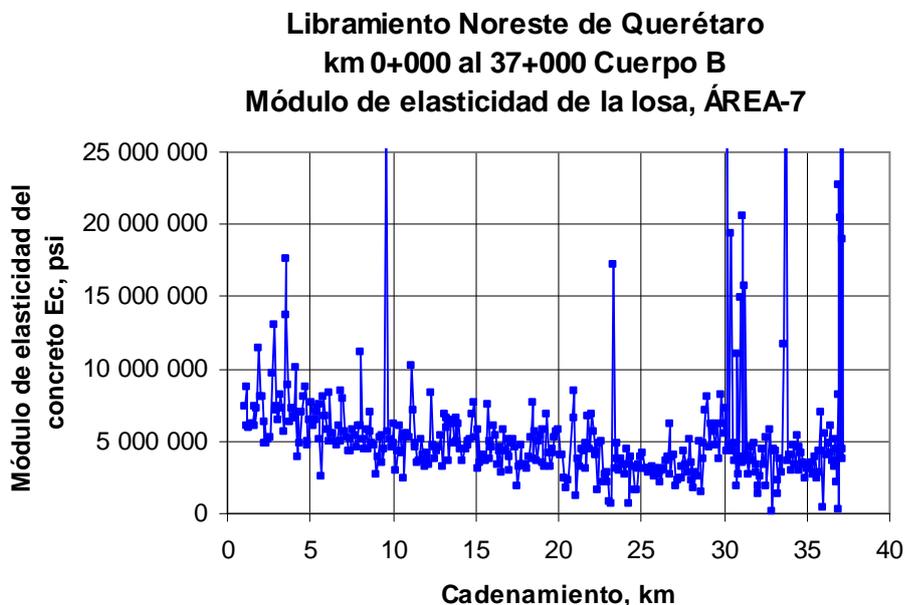


Figura 13. Retrocálculo de los módulos de elasticidad del concreto (ÁREA-7 FHWA) cuerpo B, libramiento noreste de Querétaro (2005).

Las Figuras 14 y 15 muestran la variación de transferencia de carga observándose variaciones importantes en ambos cuerpos del libramiento noreste. Es necesario señalar los valores tan bajos de transferencia de carga que se obtuvieron en muchas de las losas, en muchas de las cuales había agrietamientos, rotura de esquina o incluso fracturamiento de la losa.

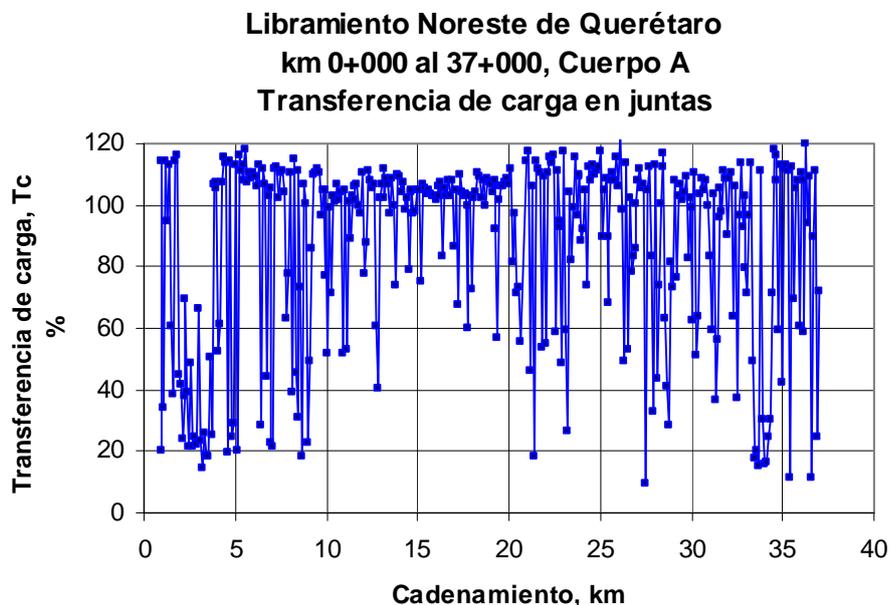


Figura 14. Variación de la transferencia de carga en losas, cuerpo A, libramiento noreste de Querétaro (2005).

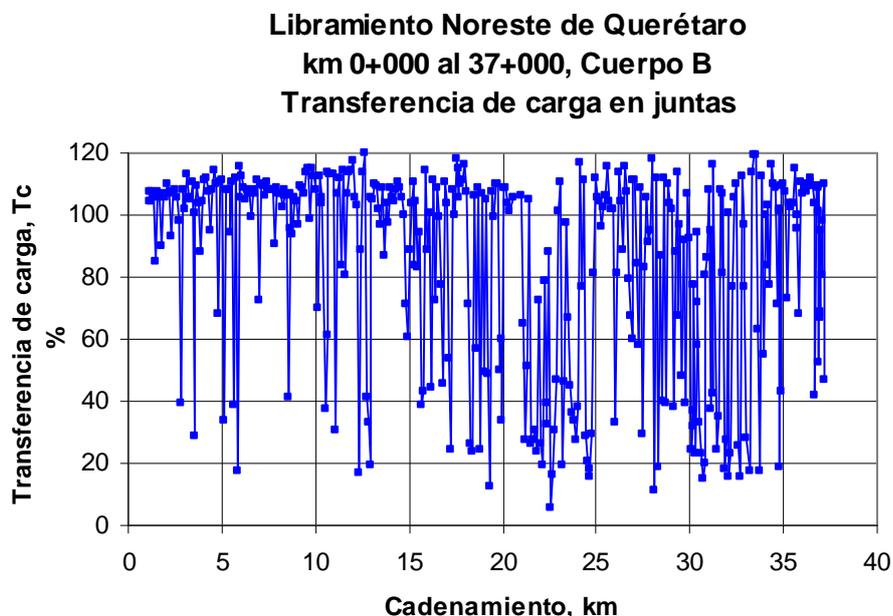


Figura 15. Variación de la transferencia de carga en losas, cuerpo B, libramiento noreste de Querétaro (2005).

En las Figuras 16 y 17 se presentan los módulos de reacción de la subrasante retrocalculados con ÁREA-7 (FHWA) se presentan valores que varían entre 100 y 200 pci (libras por pulgada cúbica).

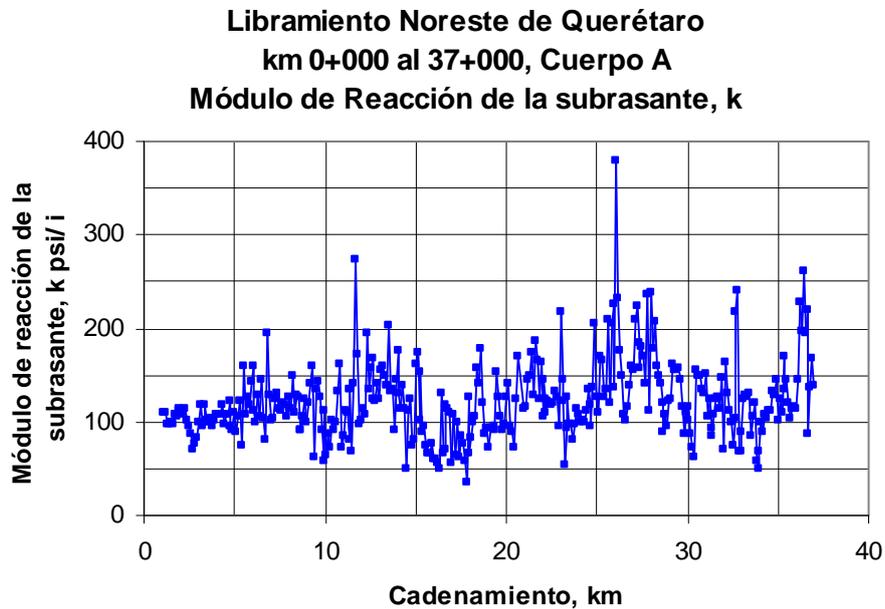


Figura 16. Variación del módulo de reacción de la subrasante, k, cuerpo A, libramiento noreste de Querétaro (ÁREA-7, FHWA).

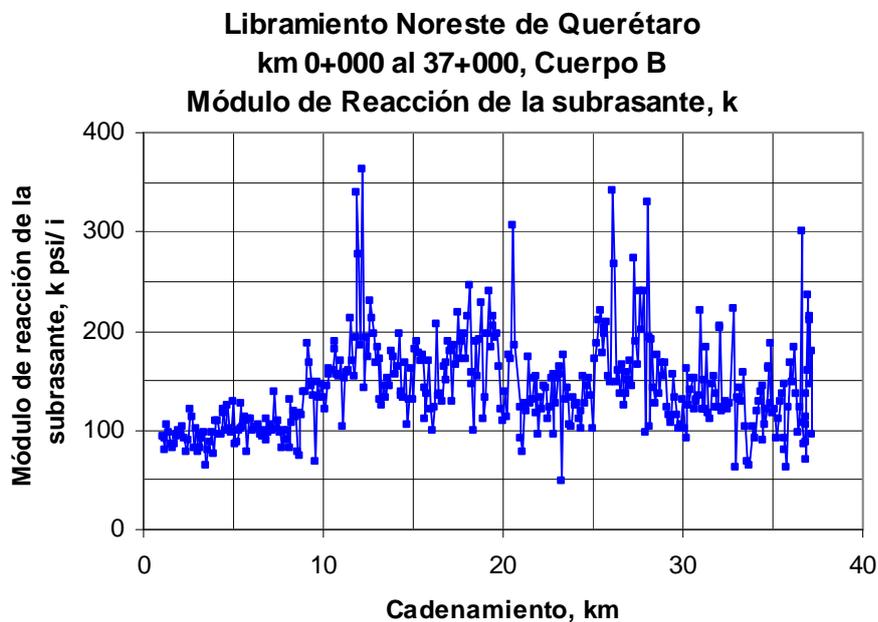


Figura 17. Variación del módulo de reacción de la subrasante, k, cuerpo B, libramiento noreste de Querétaro (ÁREA-7, FHWA).

En la Figura 18 se presentan los resultados obtenidos para la detección de vacíos en la losa de pavimento, se observa que a cierto nivel de aplicación de carga le corresponde su correspondiente deflexión; se proyecta una línea punteada para el caso de %ero carga+ esperando cero deflexión y al no pasar por el origen significa que existen vacíos bajo la losa y por lo tanto falta de apoyo lo cual puede propiciar los agrietamientos y rompimientos de losas. Se presenta la problemática asociada al tramo del cuerpo B entre el km 20+000 y el 36+500.

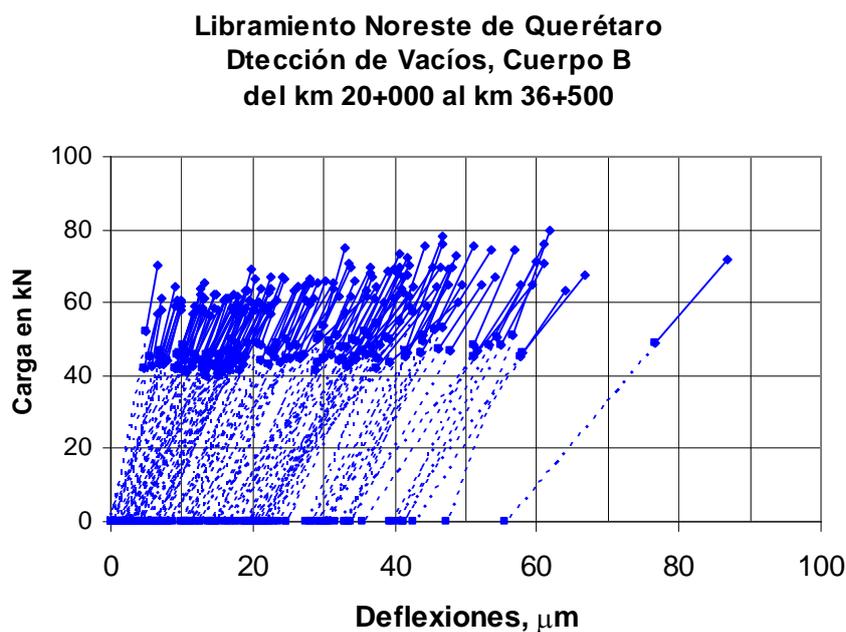


Figura 18 Evolución de la detección de vacíos, losas cargadas en la esquina, Cuerpo B Libramiento noreste de Querétaro (2005).

4.3 Resultados de la evaluación con Deflectómetro de Impacto.

En la Tabla 3 se presentan los valores de deflexiones normalizadas a 700 kPa correspondientes al cuerpo A del cadenamiento 0+000 al 36+500 para el carril de baja velocidad.

Tabla 3. Deflexiones normalizadas para el cuerpo A, del km 0+000 al 36 + 500 (carril de baja velocidad)

Deflexiones normalizadas a 700 kPa								
Cad	D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀
m	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
964	139,76	131,03	127,81	121,07	113,24	98,16	83,81	71,64
1003	141,06	135,92	132,18	125,64	117,82	102,40	87,27	75,76
1500	155,44	145,95	143,33	136,45	126,60	110,99	92,41	82,43
2000	134,01	127,60	123,56	117,49	110,48	96,62	81,27	67,58
2500	146,73	137,97	134,01	126,99	118,63	103,45	89,84	79,61
3000	216,07	197,27	187,92	173,36	158,46	130,33	101,80	78,14
3500	154,54	148,22	143,64	136,70	128,89	113,60	96,77	84,84
4005	141,29	131,95	127,46	121,66	111,65	94,87	77,28	62,00
4500	142,48	139,19	136,70	133,47	126,21	112,94	97,29	84,48
5001	132,63	125,02	121,78	115,84	107,89	93,37	77,79	64,16
5502	108,50	100,47	97,65	93,22	87,42	72,05	59,96	51,89
6006	130,07	121,42	118,60	111,90	105,36	91,82	78,84	68,96
6502	137,32	130,00	125,41	119,14	110,08	94,73	78,66	63,40
7006	134,45	126,77	123,13	116,56	108,95	94,50	80,29	67,48
7506	138,16	131,09	126,96	119,41	111,22	95,08	79,03	63,46
8006	152,41	144,51	140,06	130,49	120,86	100,80	81,15	63,71
8503	149,39	141,70	137,72	131,41	122,75	106,26	87,89	71,91
9006	120,45	112,25	109,88	103,84	97,01	83,88	69,28	58,14
9502	188,56	182,51	178,94	172,65	164,00	145,11	123,71	102,71
10006	184,28	175,61	170,30	162,30	151,34	129,67	107,35	86,43
10501	149,97	141,04	136,45	128,75	120,17	102,31	84,02	65,36
11007	122,40	117,94	115,22	110,99	103,40	89,29	75,38	62,57
11503	152,72	143,80	140,56	133,03	123,90	106,78	86,55	69,48
12010	121,62	116,00	113,19	106,39	98,14	83,10	66,99	56,02
12502	114,06	105,32	102,59	98,30	90,97	79,22	66,44	55,13
13009	128,96	115,28	112,06	103,15	94,83	79,04	64,24	51,12
13500	158,18	151,64	147,53	140,89	131,61	114,30	96,54	78,27
14007	175,81	171,37	168,23	161,48	154,94	135,12	115,16	94,89
14502	199,01	192,27	187,94	182,62	170,68	148,01	124,34	101,73
15007	143,08	134,34	131,17	123,81	115,15	98,01	80,41	63,43
15501	192,56	186,79	183,75	178,00	169,06	150,47	126,40	103,74
16012	185,19	159,45	147,54	130,51	114,61	90,00	68,34	52,41
16502	118,26	112,71	110,36	105,03	96,39	82,94	68,00	55,14
17021	114,19	108,77	104,82	97,94	90,45	75,88	60,96	47,04
17502	227,87	219,54	212,37	203,46	191,84	166,54	137,71	109,91
18011	81,54	72,14	69,33	65,51	60,21	51,10	41,10	34,76
18534	139,26	129,31	126,80	119,20	110,25	91,78	72,38	57,58
19008	105,99	103,15	101,25	97,00	92,29	82,72	71,71	59,74
19499	193,09	176,10	168,65	156,68	142,95	117,77	92,42	69,89
19500	329,84	282,40	262,04	229,40	199,03	147,00	100,28	61,62
20009	83,96	77,55	74,37	68,97	65,18	52,20	41,27	32,36
20500	108,87	107,22	104,71	100,04	94,60	84,54	74,45	64,60
21002	117,28	108,51	107,89	106,48	98,70	82,91	69,47	58,35
21501	102,38	94,59	91,51	85,80	79,84	68,16	56,88	46,92
22000	133,89	131,82	132,21	132,03	131,03	131,02	28,29	25,61
22502	102,55	88,91	83,46	75,36	68,57	51,68	38,94	29,32
23022	148,83	134,66	130,67	121,69	112,25	94,91	78,64	63,83
23503	106,09	98,68	94,92	89,13	82,80	70,46	57,74	47,24
24013	117,73	107,97	103,39	96,26	88,91	74,51	60,27	48,00
24502	141,17	130,24	126,26	117,06	109,13	90,29	74,09	62,11
25018	111,12	97,55	93,85	85,42	75,96	61,06	46,54	36,39

Continuación Tabla 3

25502	102,76	89,16	85,10	80,18	71,53	57,79	45,79	35,44
26015	139,42	128,38	123,89	116,60	107,49	91,32	74,88	59,72
26501	118,38	105,48	100,67	92,37	84,37	70,05	56,54	46,20
27015	70,88	62,17	58,58	52,56	46,66	36,68	27,97	21,97
27501	71,71	62,65	59,61	55,02	50,51	40,81	32,41	25,16
28015	115,37	106,21	103,05	95,51	87,69	73,32	60,20	49,92
28500	125,96	115,79	111,31	103,71	96,04	80,01	65,43	53,25
29019	110,49	100,62	97,44	90,28	83,00	70,09	58,05	48,59
29502	126,55	119,72	115,41	110,56	100,38	83,22	67,26	55,74
30022	88,30	79,98	76,64	71,58	64,52	51,20	41,51	33,42
30500	116,31	107,10	103,82	98,30	92,86	82,57	73,77	68,04
31028	120,15	109,52	105,85	99,87	92,79	79,34	65,70	55,25
31498	161,14	150,78	145,23	135,07	123,77	102,69	82,04	66,93
32024	156,76	145,78	140,67	131,66	122,16	103,63	84,64	66,50
32024	156,21	145,49	140,71	133,75	122,51	103,07	84,61	67,06
32502	112,43	103,40	99,70	93,70	88,49	73,24	59,78	47,10
33020	150,55	145,33	140,91	133,35	124,44	107,84	92,45	83,38
33499	180,08	164,73	161,61	153,06	142,35	121,64	100,72	89,67
34022	148,50	135,97	132,29	124,39	115,75	97,93	82,55	70,84
34500	123,45	111,45	108,58	101,87	93,98	77,85	62,38	51,88
35022	371,03	28,12	28,09	26,37	27,81	21,02	16,16	13,34
35501	132,93	123,16	118,26	110,30	101,54	85,02	69,90	56,44
36030	108,25	99,98	96,36	90,74	84,34	71,66	59,56	49,96
36401	192,84	168,80	157,98	141,79	125,62	99,65	79,44	64,24

De la Figura 19 a la 24 se presentan las gráficas donde se muestran los valores de deflexión para el sensor central D_0 , grupo de geófonos, área normalizada, módulo de reacción de la subrasante k , y vida remanente obtenidos en la medición del cuerpo A (baja velocidad) del km 0+ 000 al km 36 + 500.

La Figura 19 contiene las deflexiones correspondientes al sensor central D_0 , los resultados están comprendidos entre 100 y 200 micras. El valor promedio corresponde a 140 micras para un esfuerzo normalizado de 700 kPa. Hay algunos puntos donde la deflexión es muy alta y esto obedece a que la losa se encuentra dañada, por ejemplo con agrietamientos donde incluso la losa puede estar fracturada.

En la Figura 20 se presentan las deflexiones para los diferentes sensores utilizados, observando que los valores van en general desde 140 micras (promedio) para sensor central hasta valores de 60 micras (promedio) en el sensor más alejado (D_{150}).

**Libramiento Noreste de Querétaro
km 0 a 36+500 Cuerpo A
Deflexión central (D0)**

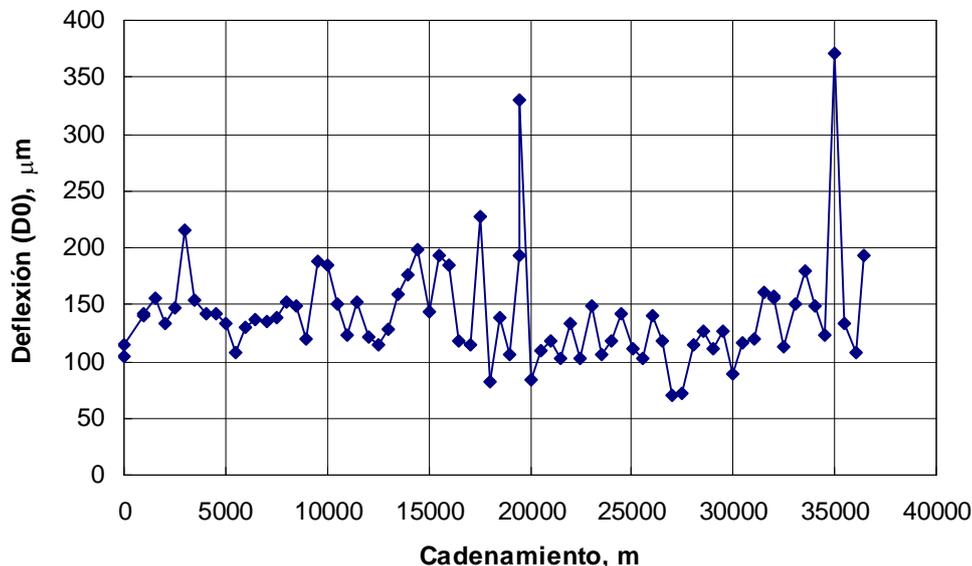


Figura 19. Evolución de las deflexiones para el sensor central, cuerpo A, libramiento noreste de Querétaro.

**Libramiento Noreste de Querétaro
km 0 a 36+500 Cuerpo A
Deflexiones**

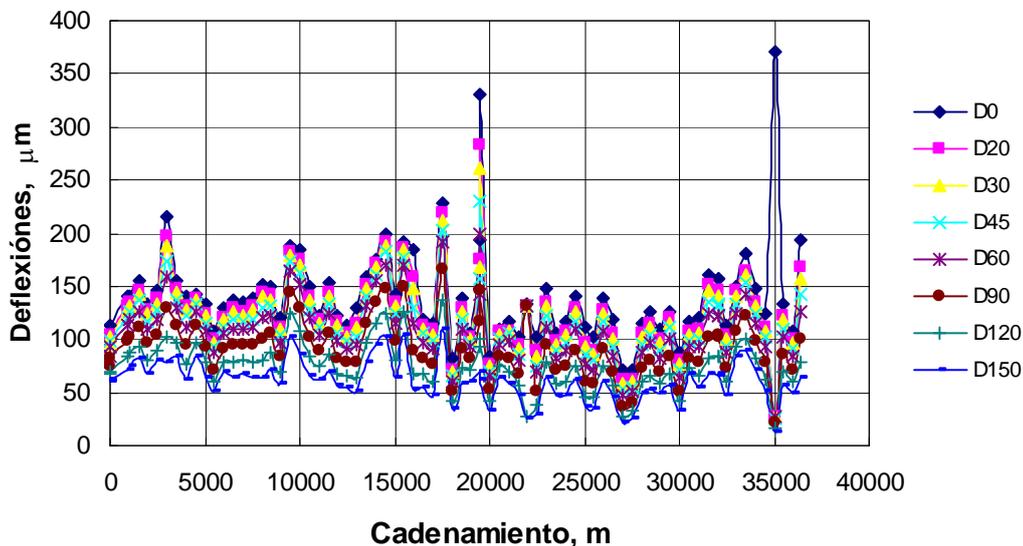


Figura 20. Deflexiones obtenidas con el Deflectómetro de Impacto, para los geófonos utilizados.

La Figura 21 presenta la variación de las áreas de las cuencas obtenidas en las mediciones realizadas con deflectómetro de impacto en el carril de baja velocidad del cadenamiento 0+ 000 al 36 + 500. Los valores oscilan alrededor de 750 mm.

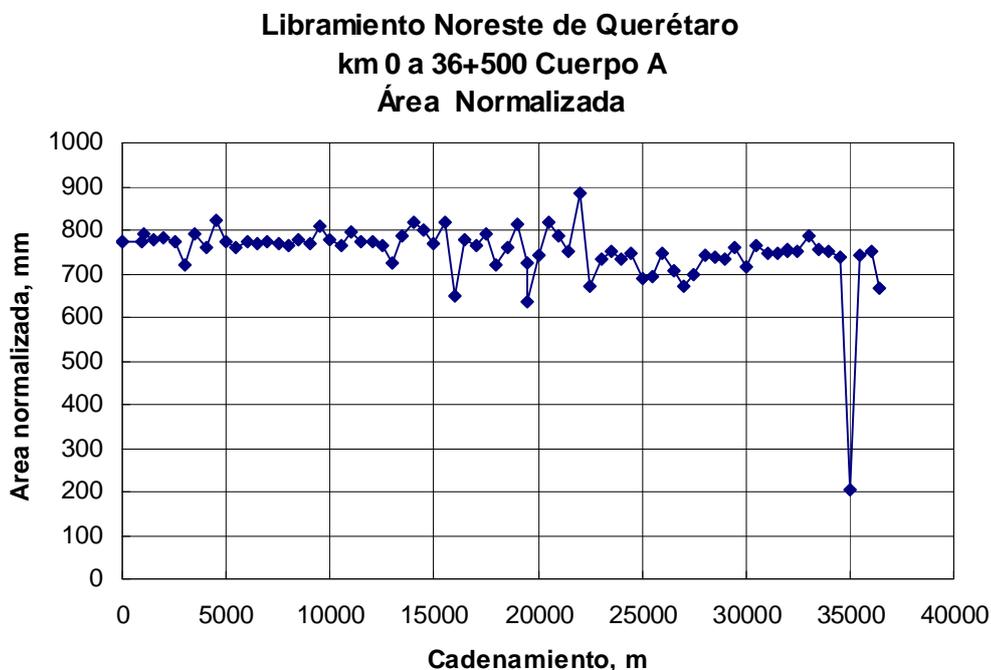


Figura 21. Evolución de las áreas de las cuencas y normalizadas en el cuerpo A, libramiento noreste de Querétaro.

En la Figura 22 se observa la evolución de los módulos de elasticidad **E_c** para la losa de concreto los cuales fueron obtenidos por medio de retrocálculo utilizando **ÁREA-7** de la FHWA, los datos utilizados corresponden a una longitud de losa de 4,5 m, ancho de losa de 3,5 m y un espesor de losa de concreto de 28 cm; las cargas contempladas en el análisis corresponden a las aplicadas para generar las deflexiones en el pavimento. También se obtuvieron los valores del módulo de reacción de la subrasante **k** que corresponden a la reacción del sistema pavimento-terreno de cimentación, este parámetro se muestra en la Figura 23.

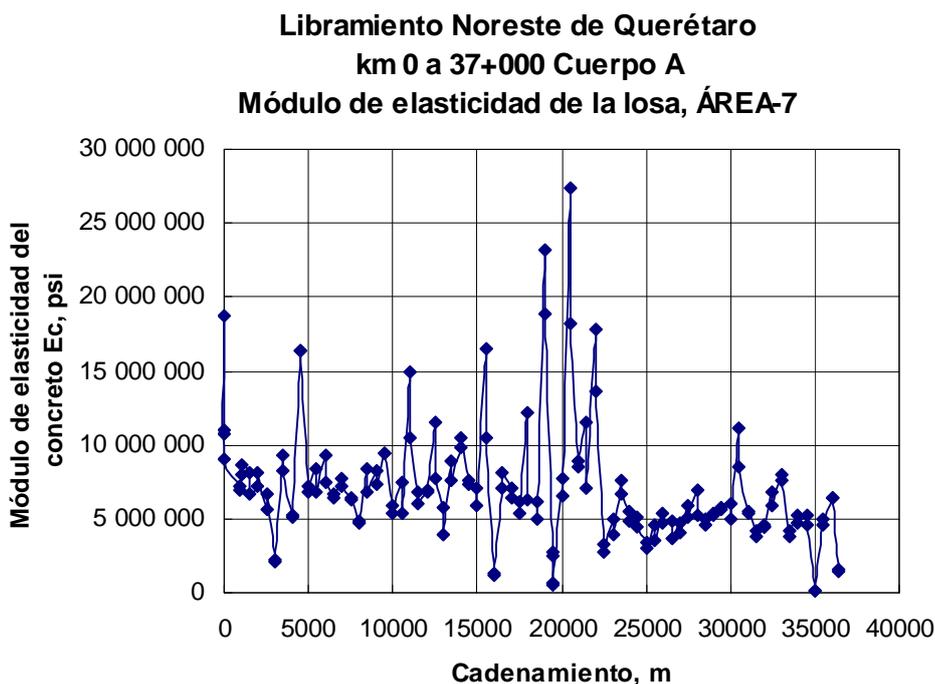


Figura 22. Evolución de los módulos de elasticidad, Ec, para la losa de concreto en el cuerpo A, libramiento noreste de Querétaro (ÁREA-7, FHWA).

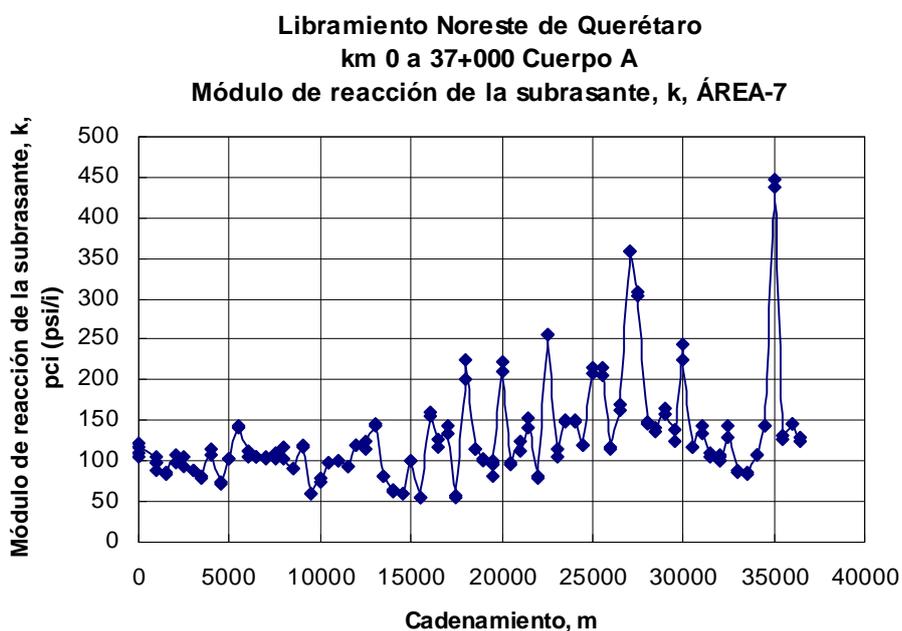


Figura 23. Evolución de del módulo de reacción de la subrasante, k, en el cuerpo A, libramiento noreste de Querétaro (ÁREA-7 FHWA).

La Figura 24 presenta la evolución de la vida remanente teórica obtenida para el cuerpo A en el libramiento noreste de Querétaro. Es necesario señalar que la vida remanente obtenida fue utilizando las expresiones indicadas en la guía de diseño de pavimentos AASHTO para el caso de pavimentos rígidos. Se consideraron valores que corresponden a un pavimento ya en operación y en el cual el tránsito es intenso (TDPa de 11953), compuestos por 41,3 % de automóviles, 4 % de autobuses y 54,7 % de vehículos de carga, esta información es obtenida de la Dirección General de Servicios Técnicos en Datos Viales 2010 y corresponde al aforo efectuado en la caseta de cobro que se ubica en el km 20+200. En el libramiento el tránsito pesado desde hace algunos años es superior al 50 % del total, además hay que recordar que los estudios efectuados en carreteras federales indican que un porcentaje importante de dichos vehículos pesados van excedidos en pesos y dimensiones lo cual es una razón adicional para que en un momento dado se acelere el deterioro del pavimento en estudio.



Figura 24. Evolución de la vida remanente en años en el pavimento de concreto en el Cuerpo A.

En la Tabla 4 se presentan los valores de deflexiones normalizadas para 700 kPa correspondientes al cuerpo B del cadenamiento 36+500 al 0+000 para el carril de baja velocidad, en el sentido hacia la ciudad de México.

Tabla 4. Deflexiones normalizadas para el cuerpo B del km 36 + 850 al km 0 + 000 (carril de baja velocidad).

Deflexiones normalizadas a 700 kPa								
Cad	D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	D ₁₅₀
M	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm	μm
36850	119,34	109,99	105,85	99,09	92,39	79,74	66,45	57,61
36500	158,66	146,85	142,65	132,54	123,20	104,58	88,04	77,17
36000	149,45	137,02	133,82	126,74	117,69	100,99	84,48	68,76
35501	121,90	115,44	111,52	106,80	100,29	85,81	71,64	58,90
34988	133,07	124,64	119,58	110,64	101,96	84,83	66,38	49,99
34501	157,68	147,57	141,63	131,02	122,05	104,78	89,95	58,67
34002	127,65	120,00	116,97	109,68	103,16	84,95	68,56	54,41
33498	164,15	156,08	150,92	142,41	131,59	110,96	89,19	68,76
32999	171,87	160,82	156,09	146,16	136,39	117,47	101,15	90,61
32499	129,42	118,79	114,56	107,74	102,05	84,46	69,64	56,92
31999	135,83	125,77	122,49	115,85	108,24	93,48	76,96	62,77
31498	144,02	136,60	133,06	127,55	119,09	103,09	86,68	69,84
30993	139,84	133,72	127,52	118,61	108,24	91,17	74,27	61,26
30501	76,15	70,73	68,11	65,12	61,12	53,54	45,55	41,23
29997	109,96	103,97	101,23	94,22	87,68	75,18	62,98	50,72
29499	125,41	119,87	116,67	110,56	103,64	91,92	82,68	78,77
28995	88,06	77,26	73,23	66,77	60,18	48,99	39,45	31,71
28499	101,04	86,72	81,61	76,50	70,81	58,76	48,25	37,93
27998	160,28	154,40	149,21	141,61	134,19	114,18	95,76	79,79
27495	134,01	121,34	114,55	105,10	94,17	76,29	59,13	44,80
26995	143,22	133,43	129,44	122,24	113,93	96,24	78,09	61,27
26499	106,15	94,35	90,18	83,34	77,81	62,19	49,65	38,68
25988	172,68	155,82	150,60	139,16	127,39	106,16	85,97	67,59
25500	112,15	103,22	99,75	92,57	85,48	67,83	52,51	41,94
24996	111,35	107,07	103,74	98,72	92,14	79,80	66,26	53,56
24499	169,70	156,08	150,29	139,12	127,91	107,36	87,29	70,29
23994	116,84	109,20	105,86	99,71	93,19	80,44	67,58	55,62
23497	136,89	129,11	125,51	119,11	110,44	95,15	79,35	63,95
22994	135,86	128,10	124,17	117,28	110,64	92,47	76,12	63,07
22495	164,75	150,83	145,95	137,11	126,60	104,41	82,59	64,88
21997	129,46	124,56	121,36	114,15	107,24	93,24	79,60	67,90
21501	136,24	127,65	123,67	116,17	107,29	91,78	76,45	61,95
20997	131,80	118,48	114,54	107,80	98,72	83,19	68,61	56,22
20500	146,50	131,25	126,63	119,58	109,42	90,74	76,51	64,05
20000	117,21	100,61	94,48	85,63	77,83	60,79	47,23	37,07
19501	139,31	130,73	126,56	118,56	110,48	96,03	83,70	75,68
18996	84,93	74,11	70,85	64,82	58,56	47,30	37,08	29,07
18499	107,61	96,76	93,48	87,22	80,21	66,54	53,74	43,91
17997	117,11	104,81	100,76	93,86	86,28	71,11	55,31	41,58
17497	108,40	97,30	93,12	86,29	80,79	65,35	50,92	43,98
16993	152,62	139,01	133,41	123,23	112,01	91,44	72,20	56,27
16501	123,59	108,82	104,15	95,62	86,37	66,89	49,99	36,07
15998	140,55	134,53	130,85	125,00	117,37	101,83	88,04	79,83
15499	96,96	86,43	82,44	76,47	70,58	54,89	43,30	35,23
14996	84,94	77,32	73,72	69,41	63,50	52,38	42,47	33,76
14497	104,99	99,11	94,05	86,64	79,36	65,28	52,03	42,09
13994	99,44	89,50	86,11	79,57	73,40	62,22	51,13	43,09
13495	81,08	71,46	69,16	65,68	60,43	52,89	45,45	38,60
13000	106,25	97,75	94,19	88,34	82,48	69,83	57,86	49,13

Continuación Tabla 4

12498	108,88	100,43	95,99	89,30	82,66	69,34	57,44	46,51
12005	107,83	96,51	93,70	89,25	81,83	68,20	56,53	45,47
11498	104,11	91,31	88,55	82,81	76,18	65,51	54,67	47,18
10995	93,73	85,21	81,90	76,19	69,48	55,76	43,64	35,93
10500	102,92	93,91	90,86	86,79	79,32	67,75	55,77	47,43
9994	143,22	134,52	130,47	125,72	118,08	103,14	87,00	74,34
9499	108,89	101,84	98,67	93,04	86,79	75,80	63,95	53,52
8993	205,17	162,87	154,22	140,72	128,80	103,49	82,66	65,46
8500	170,38	154,71	148,12	139,04	126,22	102,54	80,73	60,97
7992	144,35	135,01	132,38	126,35	117,10	101,35	84,71	70,44
7498	95,09	88,12	87,28	83,98	78,40	69,07	57,54	49,27
6991	126,14	119,81	118,57	112,82	106,39	93,39	79,55	66,59
6500	116,21	108,24	106,11	103,20	95,76	82,86	70,60	60,86
5992	126,40	120,01	115,02	111,83	104,54	88,96	73,49	59,21
5497	153,02	142,30	139,62	133,46	124,66	107,46	90,13	71,49
4989	131,55	124,30	121,96	117,48	111,49	97,18	82,42	69,29
4502	131,45	122,79	119,06	111,83	102,06	86,63	71,76	60,03
3993	114,54	108,71	106,48	101,57	97,18	86,52	74,99	68,06
3498	115,68	107,71	105,20	100,92	94,39	81,93	69,29	60,17
2992	142,75	137,92	136,48	132,58	126,84	115,54	105,02	97,92
2496	187,25	170,24	162,59	151,88	137,11	112,06	89,09	73,49
1993	119,72	111,72	108,49	102,30	95,84	82,53	68,64	57,64
1499	120,09	114,68	112,29	107,86	101,45	89,61	77,37	67,13
991	148,23	142,76	140,63	134,54	128,51	116,66	103,68	90,30
502	129,30	119,70	117,38	112,72	105,19	90,16	75,56	65,40

De la Figura 25 a la 30 se presentan las gráficas donde se muestran los valores de deflexión para el sensor central D_0 , grupo de geófonos, área normalizada, módulo de reacción de la subrasante k , y vida remanente obtenidos en la medición del cuerpo B (baja velocidad) del km 37+ 000 al km 0 + 000, esto es en el sentido de San Luis Potosí hacia la ciudad de México.

La Figura 25 contiene las deflexiones correspondientes al sensor central D_0 , los resultados están comprendidos entre 100 y 180 micras. El valor promedio corresponde a 140 micras para un esfuerzo normalizado de 700 kPa. Existen zonas donde la deflexión es más alta, debido a que la losa se encuentra dañada con agrietamientos transversales o longitudinales donde incluso la losa puede estar fracturada.

En la Figura 26 se presentan las deflexiones para los diferentes sensores utilizados, observando que los valores van en general desde 150 micras para sensor central hasta valores de 45 micras (promedio) en el sensor más alejado (D_{150}).

**Libramiento Noreste de Querétaro
km 37+000 a 0+000 Cuerpo B
Deflexión central, (D0)**

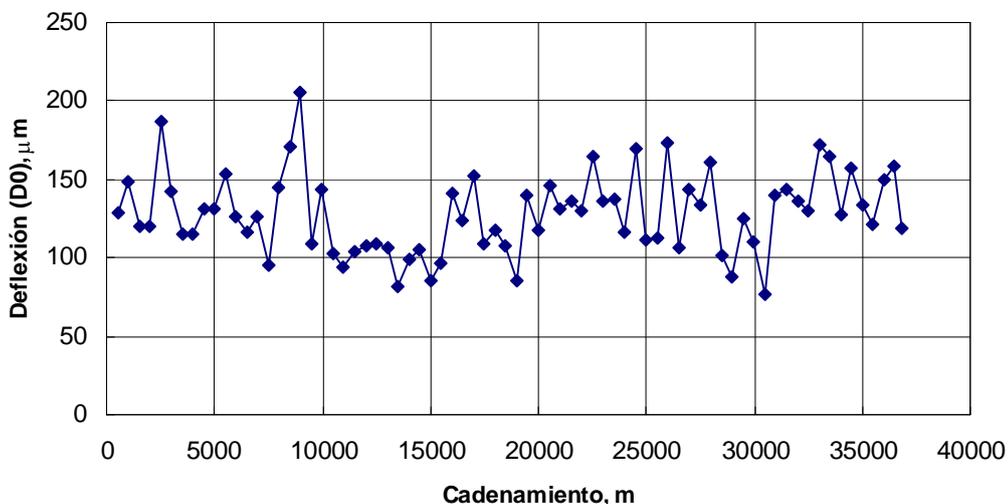


Figura 25. Evolución de las deflexiones para el sensor central, cuerpo B, libramiento noreste de Querétaro.

**Libramiento Noreste de Querétaro
km 37+000 a 0+000 Cuerpo B
Deflexiones**

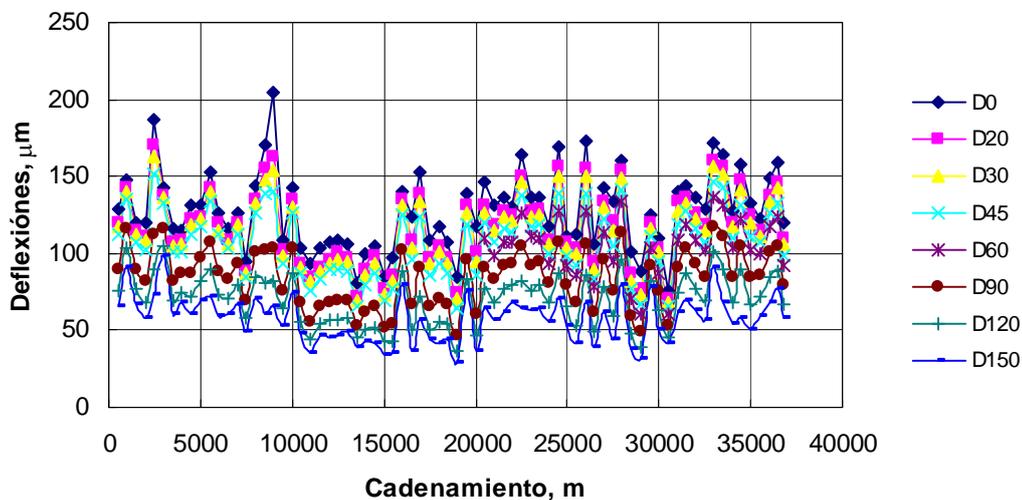


Figura 26. Deflexiones obtenidas con el Deflectómetro de Impacto, para los geófonos utilizados.

La Figura 27 presenta la variación de las áreas de las cuencas obtenidas en las mediciones realizadas con deflectómetro de impacto en el carril de baja velocidad del cadenamiento 37+000 al 0+000. Los valores se encuentran alrededor de 750 mm.

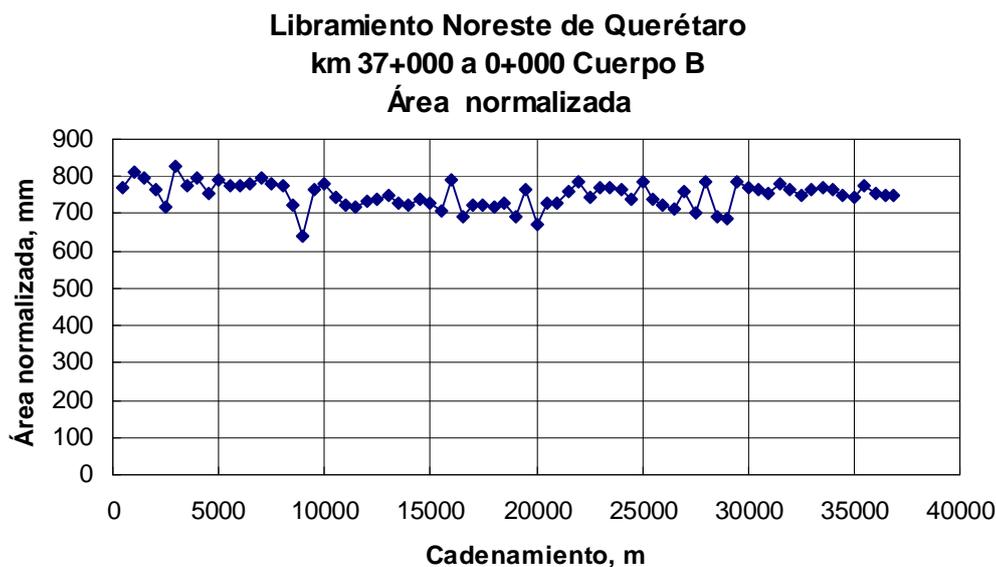


Figura 27. Evolución de las áreas de las cuencas y normalizadas en el cuerpo B, libramiento noreste de Querétaro.

En la Figura 28 se observa la evolución de los módulos de elasticidad **E_c** para la losa de concreto obtenidos por medio de retrocálculo utilizando ÁREA-7 de la FHWA, los datos utilizados corresponden a longitud de losa de 4,5 m, ancho de losa de 3,5 m y un espesor de losa de concreto de 28 cm; las cargas contempladas en el análisis corresponden a las aplicadas para generar las deflexiones en el pavimento; los valores de módulos de elasticidad retrocalculados corresponden a valores alrededor de los 5 000 000 psi aunque se tienen valores superiores para el tramo comprendido entre el km 0+000 y 20+000. También se obtuvieron los valores del módulo de reacción de la subrasante **k** que corresponden a la reacción del sistema pavimento-terreno de cimentación los cuales se presentan en la Figura 29. Se observa un mejor comportamiento en el tramo comprendido entre el cadenamiento 0+000 y el 20+000 donde los valores van desde 100 pci (psi/i) hasta prácticamente 200 pci. En el caso del tramo del km 37+000 al 20+000 se tienen valores de módulo de reacción de la subrasante de aproximadamente 100 pci, esto es aún cuando se observó que existe un número importante de losas de concreto que fueron reemplazadas.

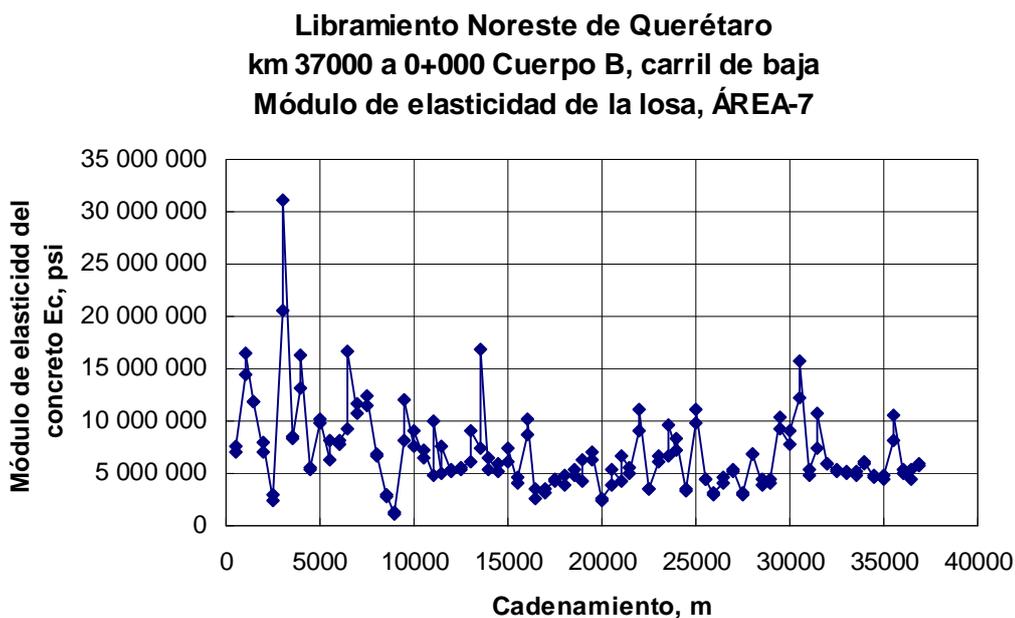


Figura 28. Evolución de los módulos de elasticidad, E_c , para la losa de concreto en el cuerpo B, libramiento noreste de Querétaro (ÁREA-7, FHWA).

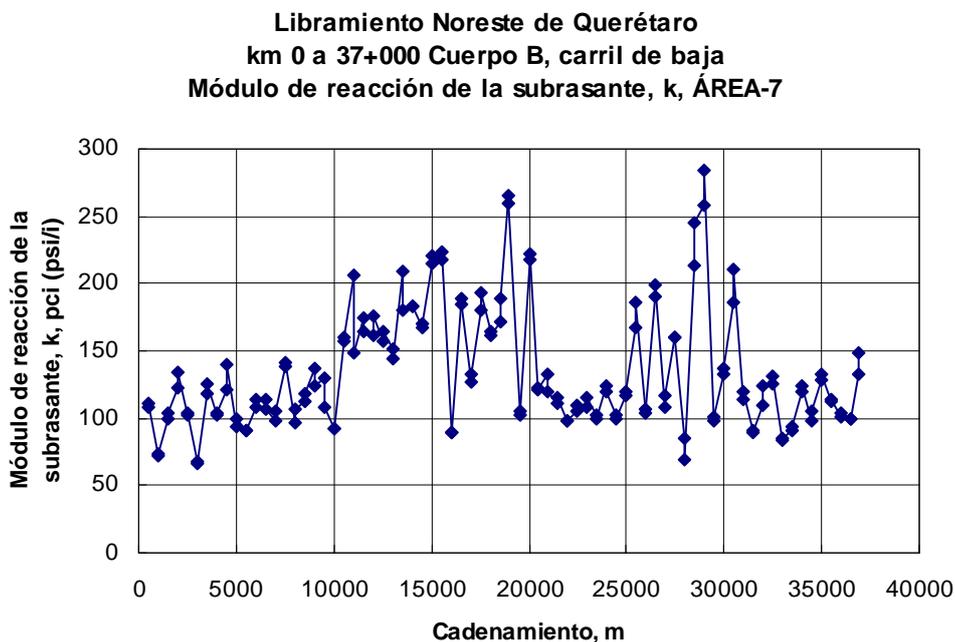


Figura 29. Evolución de del módulo de reacción de la subrasante, k , en el cuerpo B, libramiento noreste de Querétaro (ÁREA-7 FHWA).

La Figura 30 presenta la evolución de la vida remanente teórica obtenida para el cuerpo B en el libramiento noreste de Querétaro. El tiempo de vida estimado es considerando parámetros para

un pavimento en operación y tomando en cuenta que sobre de él ha pasado un tránsito que incluso no fue considerado en su inicio.

Es necesario señalar que las disposiciones emitidas por el gobierno del estado de Querétaro en cuanto a la prohibición del paso de vehículos pesados por la ciudad (año 2000-2001) propició que dicho tránsito circulara por el libramiento acumulándose los 40×10^6 ejes equivalentes para los que fue diseñado originalmente. En la actualidad se ha rebasado el tránsito con mucho y la vida remanente que se muestra es la que teóricamente se espera de acuerdo a la evaluación efectuada con Deflectómetro de Impacto.

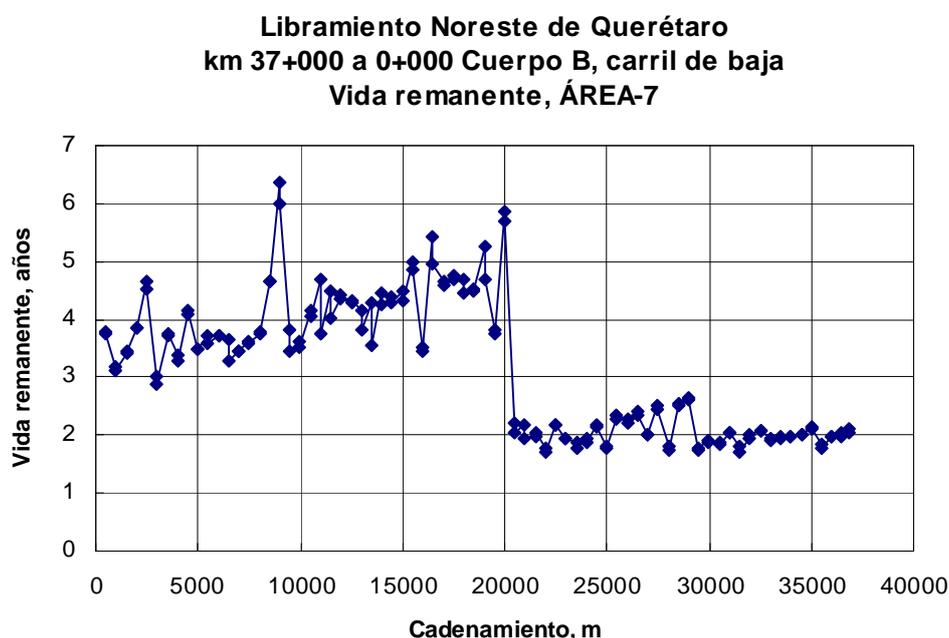


Figura 30. Evolución de la vida remanente en años en el pavimento de concreto en el Cuerpo B.

En los últimos años hubo un programa de trabajo intenso de reposición de losas de concreto con el fin de mantener en operación el tramo del km 37+000 al 20+000 del cuerpo B, esto es en el sentido de San Luis Potosí hacia la ciudad de México, aún y con eso se obtiene una vida remanente de tan sólo 2 años.

4.4. Resultados de la evaluación de transferencia de carga en juntas.

La medición de transferencia de carga en juntas del pavimento de concreto se efectuó a cada 500 m en todo el libramiento noreste de Querétaro en ambos sentidos pero solamente en los carriles de baja velocidad. Los resultados se indican en las Figuras 31 y 32 respectivamente.

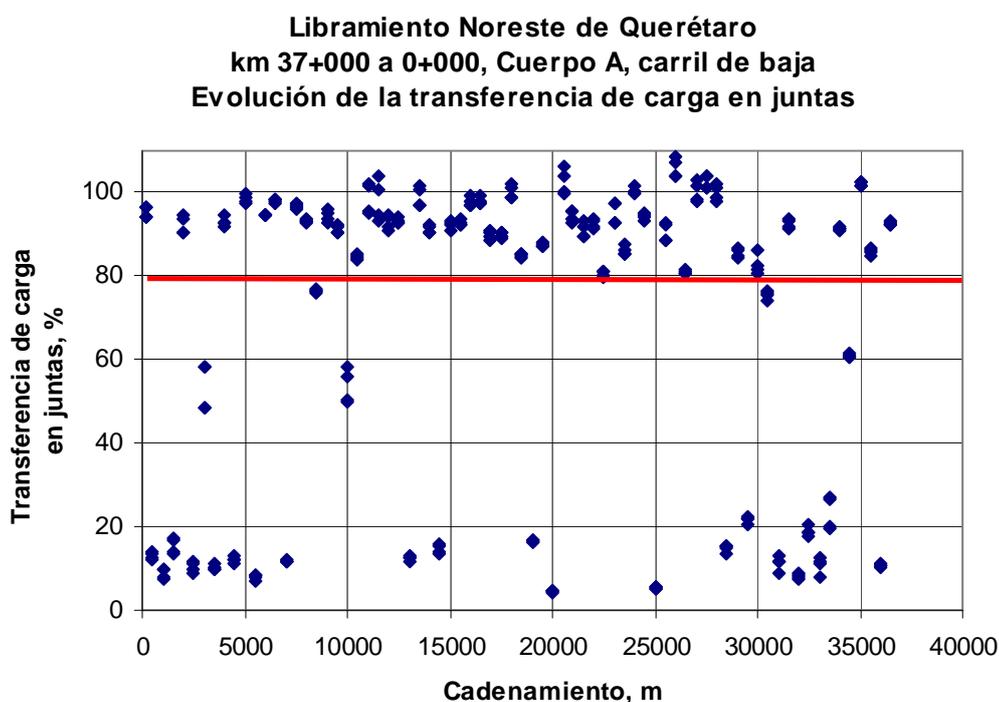


Figura 31. Transferencia de carga en juntas, libramiento Noreste de Querétaro cuerpo A, carril de baja velocidad.

Los valores mostrados en las Figuras 31 y 32 indican la transferencia de carga que se presenta en las juntas a lo largo de todo el libramiento. Vale la pena señalar que se encuentran más puntos por arriba del 80 % en el cuerpo A, no así en el cuerpo B. El promedio general para el cuerpo A es de 68 % y para el cuerpo B le corresponde el 65 %. En la Figura 32 se observa que existen valores de baja capacidad de transferencia de carga en el tramo comprendido entre el km 37+000 y el 20+000, aún y aunque físicamente en dicho tramo se observa que han sido repuestas un buen número de losas. El promedio general de transferencia de carga del libramiento es bajo debido a que existen muchas mediciones donde los valores de transferencia obtenidos corresponden a valores inferiores al 20 % (en algunos casos agrietamiento de losas).

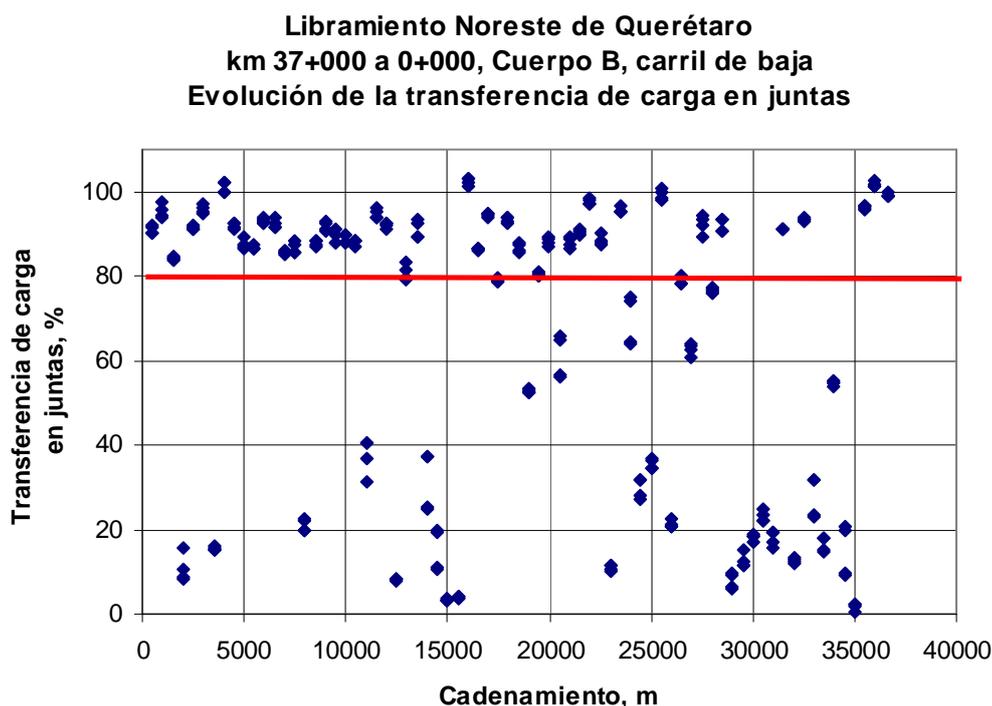


Figura 32. Transferencia de carga en juntas, libramiento Noreste de Querétaro cuerpo B, carril de baja velocidad.

4.5 Detección de vacíos en losas de pavimento hidráulico.

Los resultados de detección de vacíos pueden observarse en las Figuras 33 y 34. Se observa como se comporta el pavimento, losa de concreto, cuando se aplican cargas en las esquinas y como varían las deflexiones generadas por dichas cargas. Teóricamente cuando una losa presenta %ero+vacíos debajo de ella corresponde cuando al proyectar las cargas a un valor de cero las deflexiones deberían de ser precisamente nulas. Por el contrario cuando los valores caen por arriba o incluso debajo de cero significa que existen vacíos en las losas. En el caso de la Figura 33 se aprecia que un número importante de las losas ensayadas presentan vacíos pues incluso para esfuerzo %ero+corresponden deflexiones de hasta 353 μm (caso extremo). Cabe señalar que la tendencia es precisamente a cero. En la Figura 34 el problema de vacíos se incrementa pues se tienen valores extremos hasta de casi 600 μm . El problema es mayor en el cuerpo B y más aún en el tramo del km 37+000 hasta antes de la caseta (km 20+000) pues se encuentran un número importante de losas con problemas como agrietamientos

transversales y longitudinales o incluso con problemas de rotura en las esquinas. En ambas figuras la línea roja pasa por el origen.

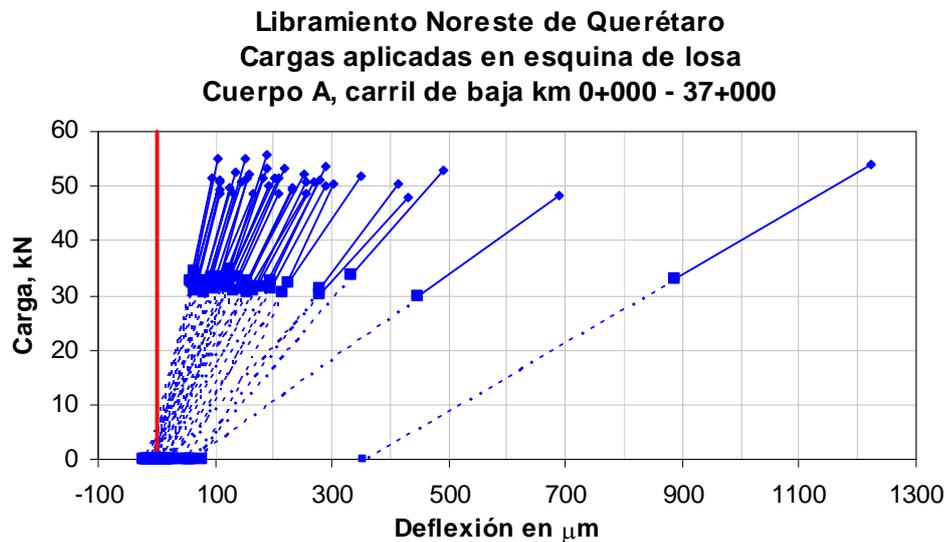


Figura 33 Detección de vacíos en losas, cargas aplicadas en esquina, cuerpo A carril de baja.

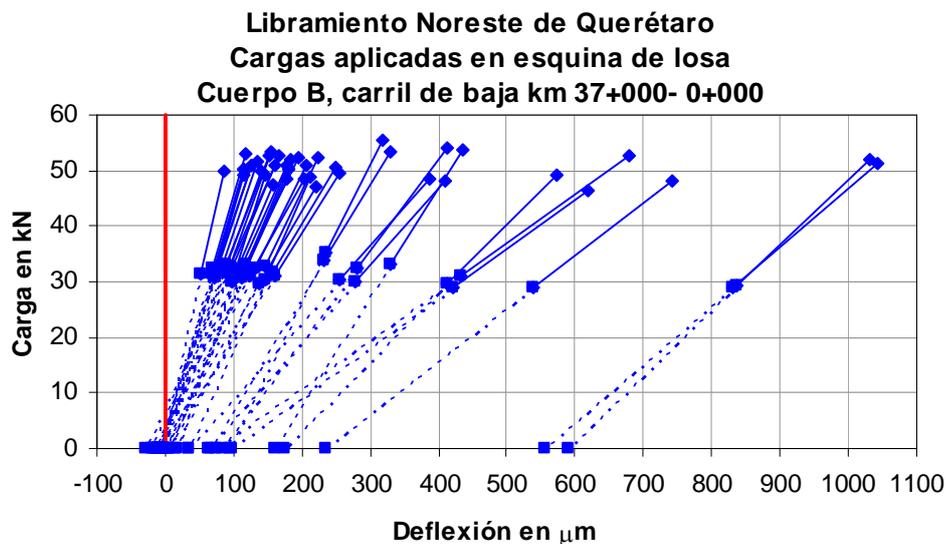


Figura 34 Detección de vacíos en losas, cargas aplicadas en esquina, cuerpo B carril de baja.

El nivel de vacíos que pueda estar presente en las losas analizadas no se cuantifica simplemente es un indicio del mal soporte que hay entre base y losa de concreto hidráulico lo cual puede propiciar problemas serios de fallas en esquinas por la concentración de cargas a las que está expuesto el pavimento.

4.6 Evaluación de los deterioros en el libramiento Noreste de Querétaro.

Se presenta un análisis del nivel de deterioro actual y del número de losas afectadas del Libramiento Noreste de Querétaro, el análisis de deterioro se hizo mediante el uso de equipo de alto rendimiento con video digital y después los deterioros fueron clasificados de acuerdo al %LTPP Distress Identification Manual+(Manual de Identificación de deterioros del LTPP).

Los deterioros considerados son: grietas en esquina, agrietamiento longitudinal y transversal, deterioros de las juntas longitudinales y transversales y reparaciones deterioradas. Todos los deterioros fueron clasificados de acuerdo a su nivel de severidad y a su extensión, cuantificando además el número de losas afectadas.

Antecedentes. En el año 2005 se llevó a cabo un levantamiento de deterioros en forma manual del libramiento Noreste, el cual se hizo en un vehículo a baja velocidad (20 km/hr) y mediante la ayuda de un software realizado ex profeso para ese proyecto, se iba registrando la incidencia de cada deterioro y su nivel de severidad (Figuras 35 y 36).

Se observa para el cuerpo A que la mayoría de deterioros se encontraban entre el km 9 y el 20, siendo en su mayoría el debido al agrietamiento transversal y longitudinal y al deterioro de las juntas transversales, habiendo en promedio 20 incidencias por km en dicho tramo.

En el cuerpo B en cambio se encontraba un tramo muy deteriorado en la segunda mitad del libramiento del km 20 al 37, al que se ha denominado tramo crítico, siendo en su mayoría deterioros de grietas de esquina y agrietamientos transversales. El número de incidencias en el Cuerpo B es más marcado que en el cuerpo A.

Estudio 2011. Seis años después en el año 2011 se hizo el levantamiento nuevamente pero esta vez con video digital para la identificación de los deterioros y basados en la clasificación LTPP, los resultados pueden observarse en las Figuras 37 y 38 para el cuerpo A y B respectivamente.

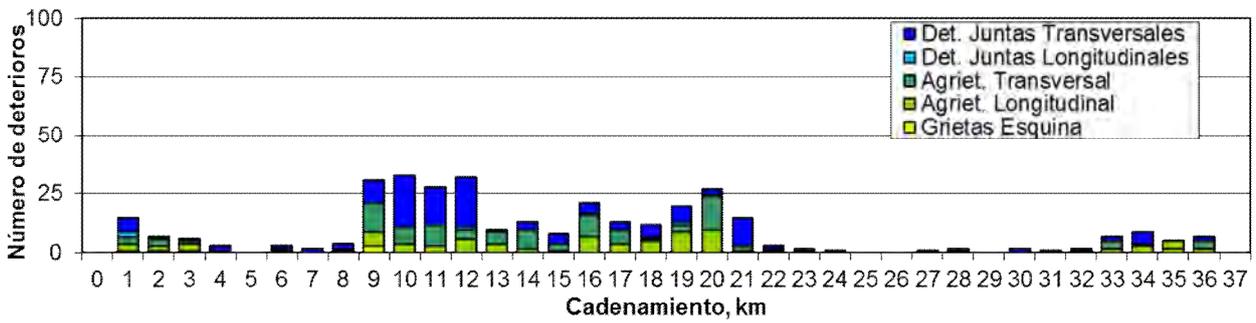


Figura 35 Deterioros en el cuerpo A, año 2005
Libramiento Noreste de Querétaro.

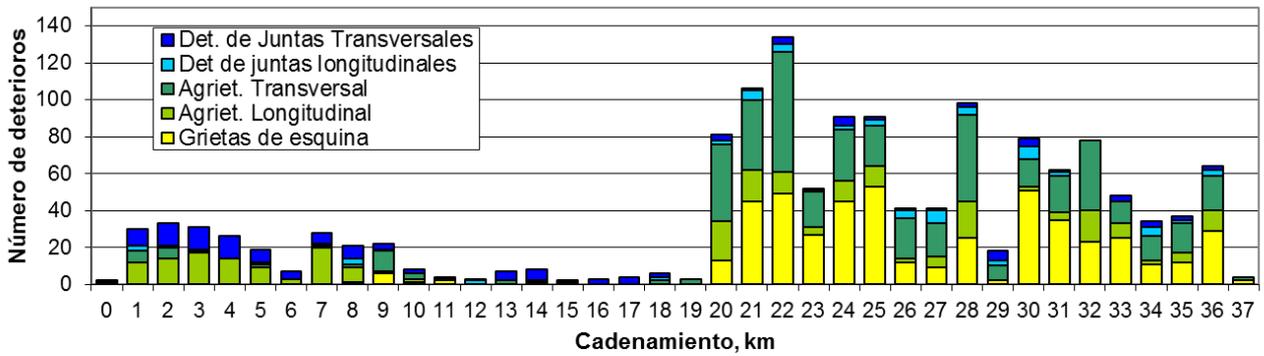


Figura 36 Deterioros en el cuerpo B, año 2005
Libramiento Noreste de Querétaro.

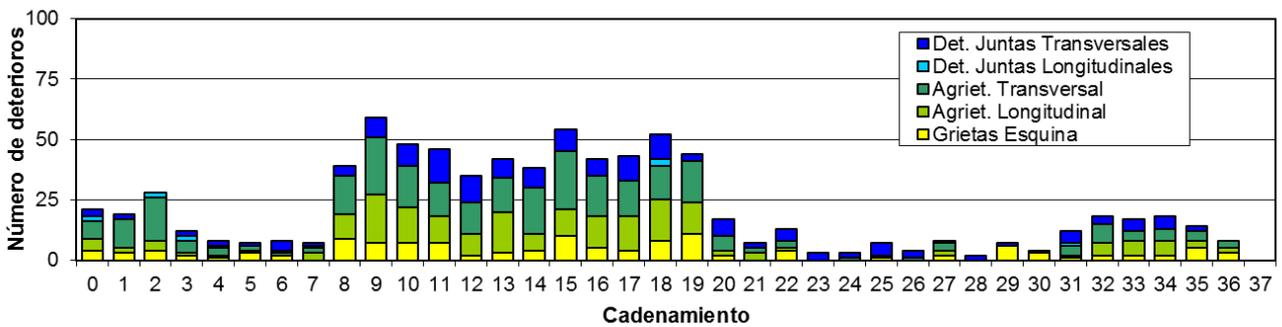


Figura 37 Deterioros en el cuerpo A, año 2011
Libramiento Noreste de Querétaro.

De los resultados mostrados en las figuras puede notarse que la similitud entre los levantamientos es bastante parecida aún habiendo sido realizados por dos medios distintos, lo cual ofrece un sólido parámetro comparativo.

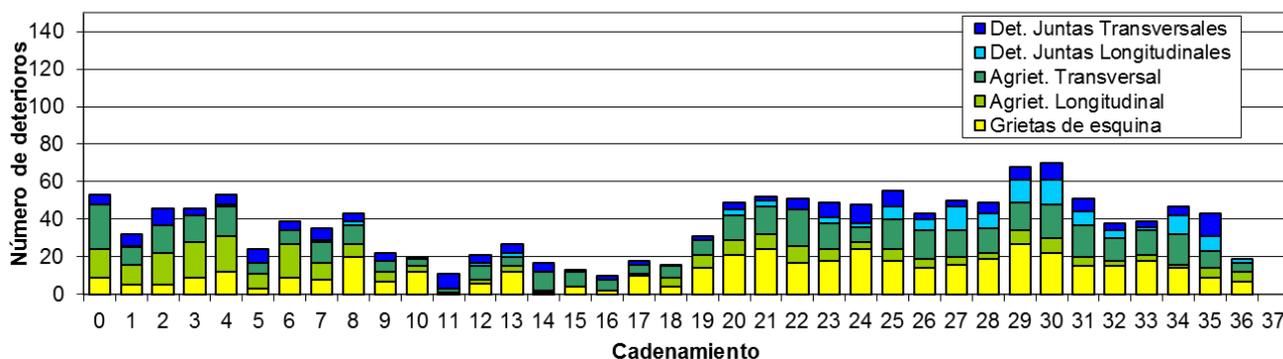


Figura 38 Deterioros en el Cuerpo B, Año 2011
Libramiento Noreste de Querétaro.

Es evidente la evolución de los deterioros en los últimos años, en el cuerpo A (km 9 al 20) ha crecido notablemente el número de incidencias, teniendo en promedio 40 incidencias por km en el año 2011, por otra parte en el Cuerpo B aparecen menor número de incidencias en el tramo crítico (km 20 al 37) debido a las acciones de reparación que se han realizado (reposición de losas) pero en la primera mitad del cuerpo B el número de deterioros se ha incrementado notoriamente.

Si se analizan los deterioros del año 2005 y del año 2011 en el cuerpo B prácticamente se generalizaron a lo largo de todo el tramo, siendo casi uniformes, lo cual indica que a pesar de haberse hecho un buen número de reparaciones en el tramo crítico del Cuerpo B, no han sido las suficientes para contrarrestar la tasa de deterioro de las losas del libramiento y se vuelve necesario reparar a la brevedad los nuevos deterioros.

De la comparación de la evolución de deterioros entre el año 2005 y 2011 se nota un incremento sustancial en el número de incidencias, a pesar de haberse realizado muchas reparaciones en el tramo que se encontraba en peor estado en el año 2005 (tramo crítico). En las Figuras 39 y 40 se muestran el número de losas deterioradas o aquellas a ser reparadas por

cada tipo de deterioro distinto, en el cuerpo A el deterioro predominante es el agrietamiento transversal y longitudinal y en el Cuerpo B, la mayoría de losas deben ser reparadas por agrietamientos de esquina.

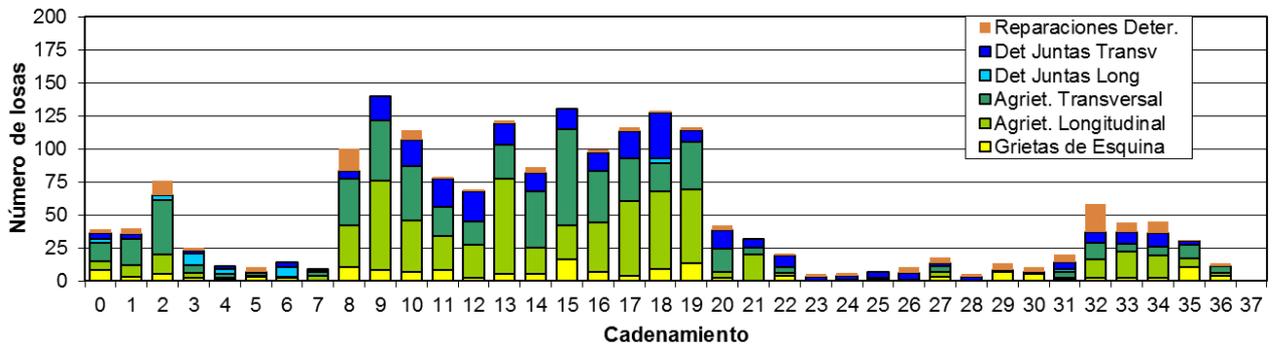


Figura 39 Número de losas afectadas en el cuerpo A, año 2011 Libramiento Noreste de Querétaro.

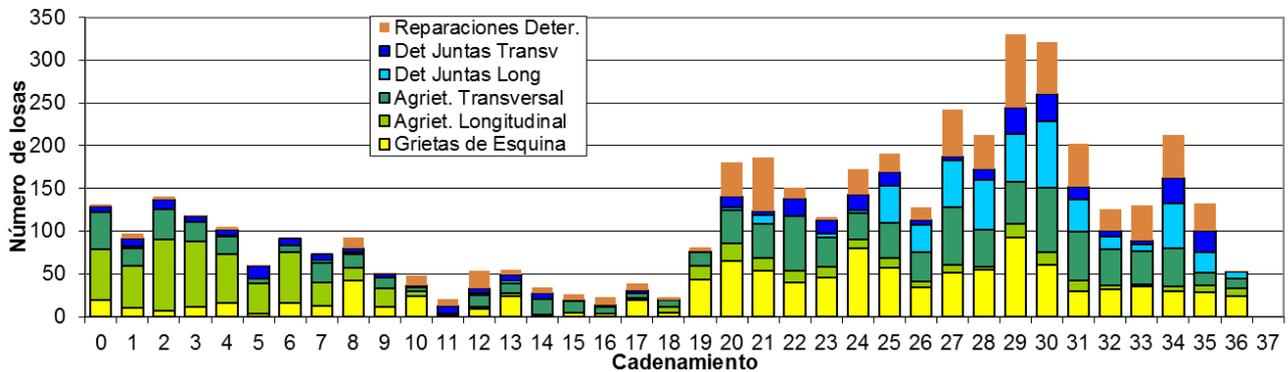


Figura 40 Número de losas afectadas en el cuerpo B, año 2011 Libramiento Noreste de Querétaro.

Considerando que las losas miden 4.5 m por 3.5 m y para una sección transversal por cuerpo de 10.5 m de ancho y de un kilómetro de longitud, se tienen seiscientos sesenta y seis (666) losas por km por cuerpo. En las Figuras 41 y 42 se observa el número de losas a ser reparadas y el porcentaje que significaría por la totalidad de losas por km. Como puede observarse para el cuerpo A en 13 de los 37 km se excede el 10 por ciento de losas deterioradas llegando a casi 20 por ciento en algunos kilómetros, y en el cuerpo B la situación es más crítica ya que 25 de

los 37 km excede el 10 por ciento de losas llegando en dos kilómetros a ser casi el 50 por ciento de losas afectadas por km.

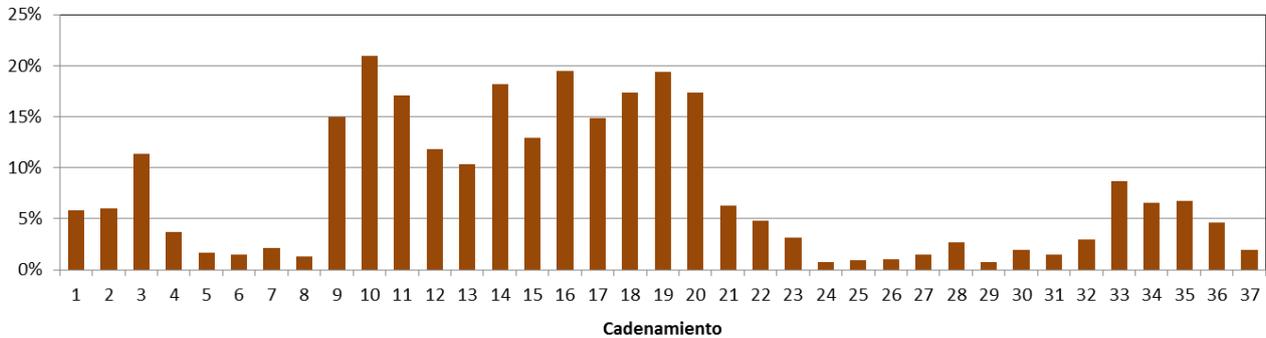


Figura 41 Porcentaje de losas afectadas por km cuerpo A, año 2011 Libramiento Noreste de Querétaro.

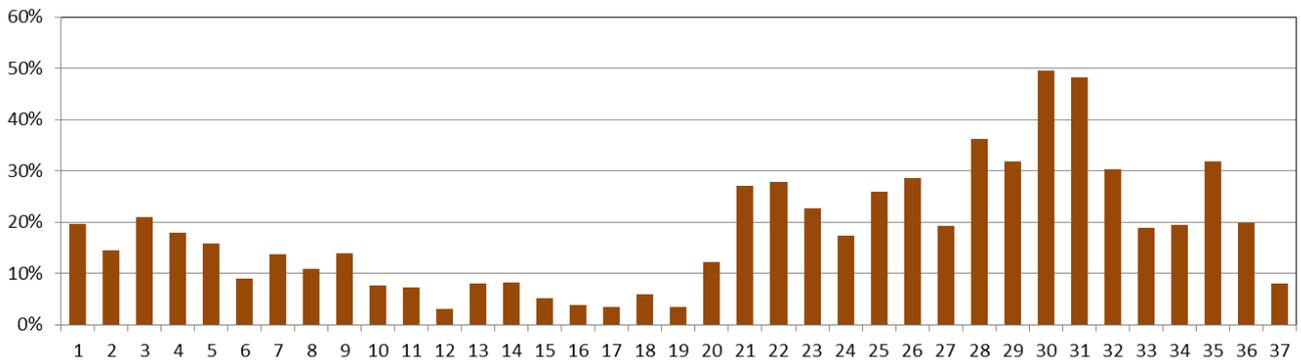


Figura 42 Porcentaje de losas afectadas por km en el cuerpo B, año 2011 Libramiento Noreste de Querétaro.

Por último en las Figuras 43 y 44 se muestran las losas afectadas separadas por nivel de severidad, observándose que para el cuerpo A la mayoría de los deterioros presentan una severidad media debido a que muchas reparaciones en este cuerpo han sido postergadas, es decir, primero se ha dado prioridad a las losas en estado crítico, y en el cuerpo B la gran cantidad de losas afectadas aún presenta severidad baja, pero llama la atención el gran número de losas afectadas, que a pesar de ser de severidad baja seguirán evolucionando y en un futuro próximo se convertirán en un problema mayor.

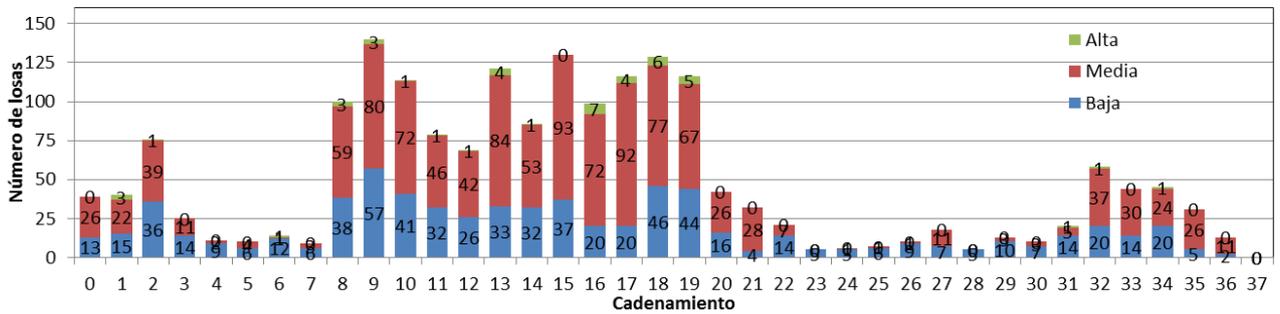


Figura 43 Losas afectadas por nivel de severidad en el cuerpo A, año 2011 Libramiento Noreste de Querétaro.

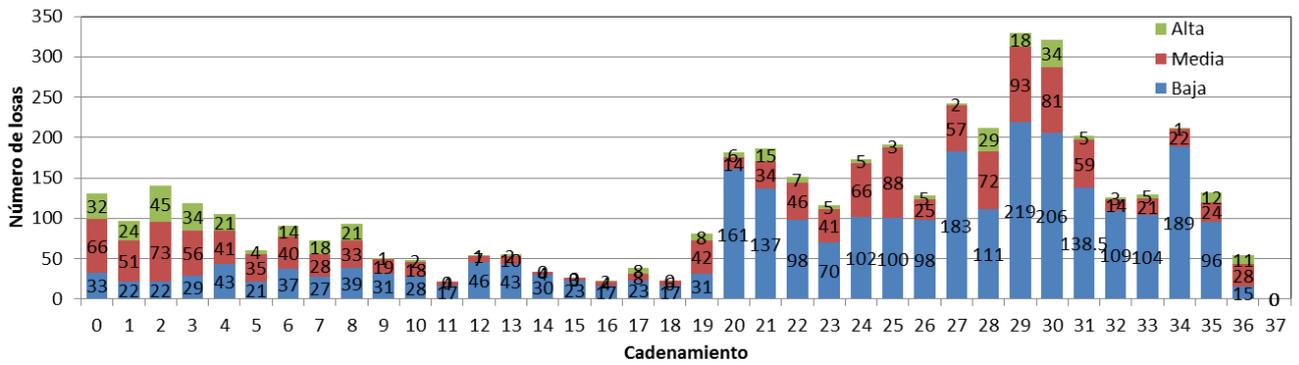


Figura 44 Losas afectadas por nivel de severidad en el cuerpo B, año 2011 Libramiento Noreste de Querétaro.

5. Determinación de la regularidad superficial con Perfilómetro Láser.

5.1 Determinación del Índice de Regularidad superficial, IRI.

Se realizaron los trabajos de regularidad superficial en el Libramiento Noreste de Querétaro desde el km 0+000 al km 37+000 en sus cuatro carriles de circulación (dos por sentido) de acuerdo con la norma ASTM E 950. En la Figura 45 se aprecia el equipo que se utilizó en la evaluación de la regularidad superficial. De igual forma en las Tablas 5 y 6 se presentan los valores de IRI a cada kilómetro de longitud en la carretera evaluada, para ambos sentidos tanto en carril de baja como de alta velocidad, señalando los valores correspondientes a rodada interna como externa, los valores se pueden apreciar gráficamente en las Figuras 46 a 49.



Figura 45 Perfilómetro Láser utilizado para la evaluación superficial del Libramiento Noreste de Querétaro del km 0+000 al 37+000.

Tabla 5. Regularidad superficial en roderas interna y externa del libramiento Noreste de Querétaro, cuerpo A en carriles de baja y de alta velocidad del cadenamiento 0+000 al 36+000.

Cuerpo A	Carril de baja velocidad		Carril de alta velocidad	
Cadenamiento (km)	IRI (m/km)		IRI (m/km)	
Inicial	Rodera Interna	Rodera Externa	Rodera Interna	Rodera Externa
1	3.5	3.924	2.931	2.953
2	3.72	4.15	2.975	2.882
3	3.519	3.548	2.742	2.659
4	3.343	3.44	2.711	2.614
5	3.343	3.44	2.711	2.614
6	2.941	2.976	2.377	2.253
7	3.089	2.963	2.369	2.356
8	2.921	3.166	2.639	2.587
9	3.259	3.247	2.305	2.321
10	2.888	2.734	2.315	2.346
11	2.584	2.869	2.11	2.157
12	2.517	2.695	1.86	1.88
13	3.495	3.88	2.684	2.745
14	2.703	3.081	2.799	2.625
15	2.436	2.784	2.422	2.594
16	2.521	2.833	2.316	2.587
17	2.497	2.928	2.39	2.318
18	2.564	2.983	2.455	2.523
19	3.064	3.578	2.478	2.331
20	4.727	4.3	4.3	4.329
21	3.222	2.86	3.239	3.115
22	3.018	2.973	3.35	3.137
23	2.725	2.658	3.17	3.338
24	3.629	3.51	4.067	4.137
25	2.777	3.063	3.25	3.102
26	2.641	2.641	2.75	2.867
27	3.605	3.317	2.983	3.194
28	5.045	4.678	3.821	3.804
29	3.291	2.658	2.345	2.578
30	3.25	3.177	2.746	3.047
31	2.732	2.987	2.593	3.913
32	4.064	3.848	3.335	3.599
33	3.506	3.68	3.684	4.271
34	3.051	3.667	3.407	3.75
35	3.263	3.159	3.424	4.22

Tabla 6. Regularidad superficial en roderas interna y externa del libramiento Noreste de Querétaro, cuerpo B en carriles de baja y de alta velocidad del cadenamiento 36+000 al 0+000.

Cuerpo B	Carril de baja velocidad		Carril de alta velocidad	
Cadenamiento (km)	IRI (m/km)		IRI (m/km)	
Inicial	Rodera Izquierda	Rodera Derecha	Rodera Izquierda	Rodera Derecha
36	5.88	4.92	---	---
35	3.74	3.89	3.42	4.22
34	4.00	4.45	3.41	3.75
33	3.63	3.81	3.68	4.27
32	3.95	4.06	3.34	3.60
31	4.24	4.00	2.59	2.91
30	4.36	3.90	2.75	3.05
29	4.15	4.47	2.35	2.58
28	4.52	4.40	3.82	3.80
27	4.14	3.42	2.98	3.19
26	4.56	3.81	2.75	2.87
25	4.45	4.27	3.25	3.10
24	5.01	5.49	4.07	4.14
23	5.37	5.53	3.17	3.34
22	4.53	4.52	3.35	3.14
21	3.76	4.05	3.24	3.12
20	4.35	4.44	4.30	4.33
19	2.90	3.01	2.48	2.33
18	2.76	2.94	2.46	2.52
17	2.77	3.08	2.39	2.32
16	2.84	3.06	2.32	2.59
15	4.14	3.92	2.42	2.59
14	3.80	4.04	2.80	2.63
13	5.04	4.23	2.68	2.75
12	3.58	3.45	1.86	1.88
11	4.37	4.17	2.11	2.16
10	4.17	3.86	2.32	2.35
9	3.00	2.70	2.31	2.32
8	2.61	2.90	2.64	2.59
7	1.82	1.86	2.37	2.36
6	1.89	1.93	2.38	2.25
5	1.97	1.99	2.71	2.61
4	2.06	2.20	2.71	2.61
3	2.52	2.37	2.74	2.66
2	2.71	2.73	2.98	2.88
1	2.61	2.60	2.93	2.95
0	3.71	2.82		

En las Figuras de la 46 a la 49 se presentan los valores de IRI por kilómetro para ambos sentidos, tanto en carriles de baja como de alta velocidad.

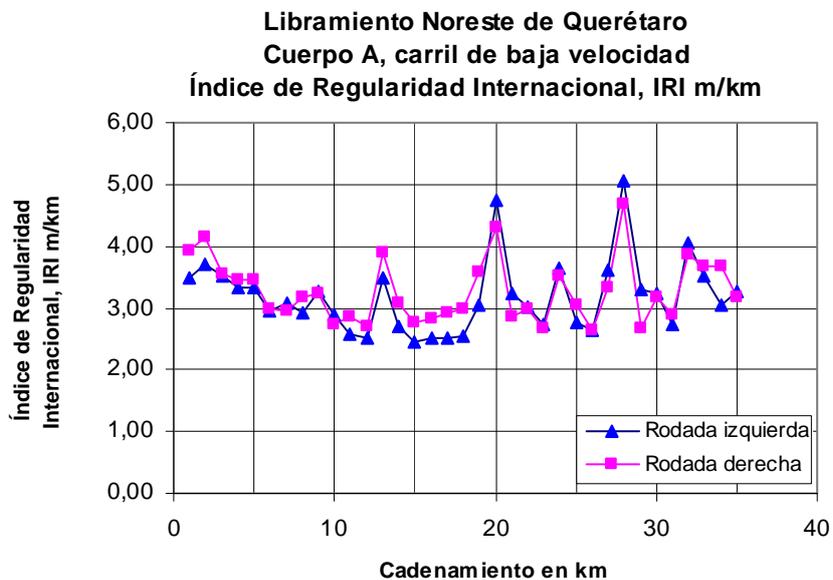


Figura 46 Evolución de la evaluación superficial del libramiento Noreste de Querétaro, del km 0+000 al 36+000, cuerpo A carril de baja velocidad.

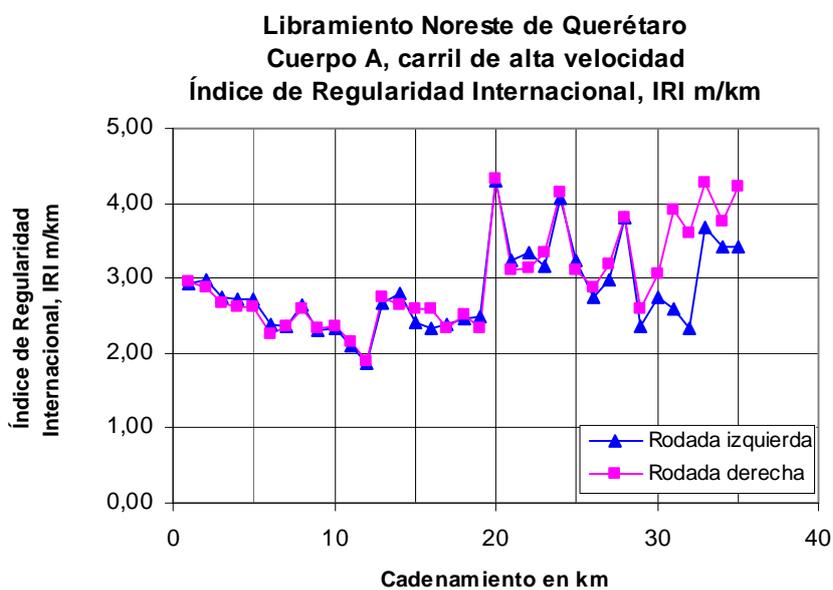


Figura 47 Evolución de la evaluación superficial del libramiento Noreste de Querétaro, del km 0+000 al 36+000 cuerpo A carril de alta velocidad.

En las Figuras 46 y 47 se observa la variación del Índice de Regularidad Internacional para el cuerpo A, es evidente una mejor condición superficial del pavimento en ambos carriles hasta el km 20+000 (caseta de cobro) en comparación con los resultados que se obtuvieron para los cadenamientos después de la caseta y hasta el final del libramiento obteniéndose valores hasta de 4.0 m/km.

En las Figuras 48 y 49 se presenta la variación del Índice de Regularidad Internacional para el cuerpo B, sentido San Luis Potosí hacia México, donde se aprecia un deterioro importante del km 36+000 hasta el 20+000 esto en ambos carriles (baja y alta velocidad) alcanzando valores hasta de 5.0 m/km. Si bien es cierto que se ha repuesto un número importante de losas de concreto el carril de baja velocidad sigue presentando losas agrietadas y fracturadas lo cual se refleja en el IRI, siendo mayores los problemas en el carril de baja velocidad principalmente hasta antes de la caseta de cobro.

Del kilómetro 20+000 hacia el 0+000 en el cuerpo B se aprecia una mejor condición superficial con valores de IRI entre 2 y 3 m/km, principalmente en el carril de alta velocidad y del km 10+000 al 0+000.

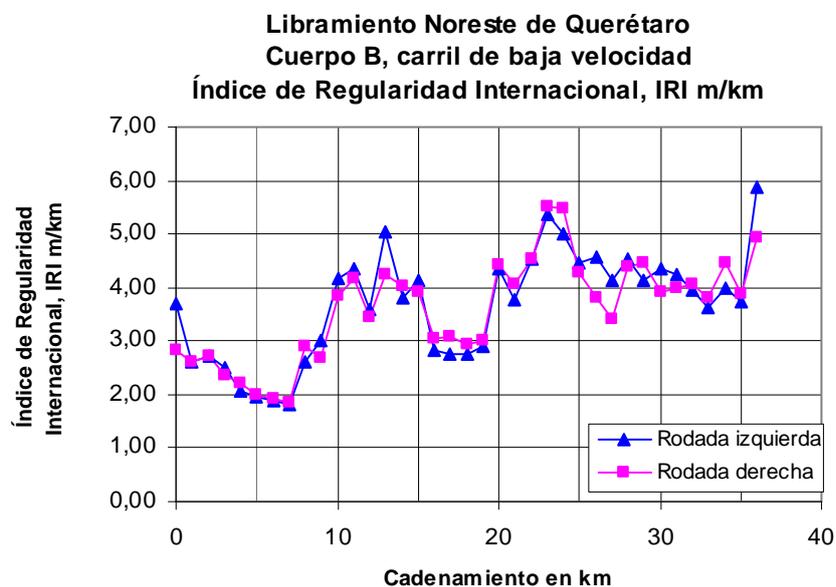


Figura 48 Evolución de la evaluación superficial del libramiento Noreste de Querétaro, del km 36+000 al 0+000, cuerpo B carril de baja velocidad.

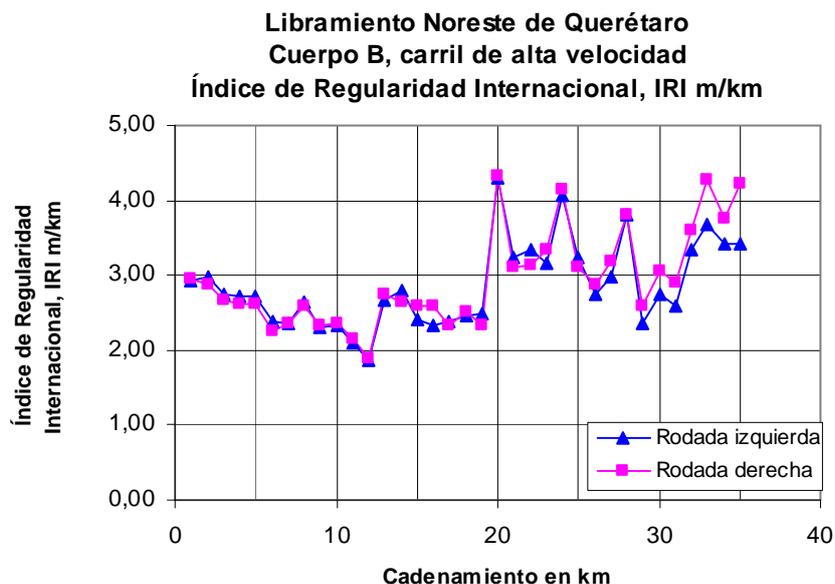


Figura 49 Evolución de la evaluación superficial del libramiento Noreste de Querétaro del km 36+000 al 0+000, cuerpo B carril de alta velocidad.

Para carreteras y autopistas de cuota lo recomendable es que el pavimento presente valores de IRI iguales o menores a 2.8 m/km lo cual no se está cumpliendo en el libramiento Noreste de Querétaro, por lo que es necesario que los trabajos de conservación y mantenimiento se realicen con el fin de mantener la carretera y evitar que se degrade aún más, además de que se aumentaría la seguridad en la carretera.

5.2 Escalonamiento en juntas.

Las mediciones del escalonamiento en el pavimento de concreto hidráulico se realizaron a cada 500 m en los carriles de baja velocidad en ambas direcciones. Dichas determinaciones se realizaron con el equipo %Dipstick+ con el cual se obtienen lecturas antes y después de la losa en análisis, la diferencia entre ellas es el escalonamiento, el cual en la mayoría de los casos está por arriba de 2 mm, tomando en cuenta las condiciones del libramiento se espera que el escalonamiento aumente con el tiempo. Es necesario señalar que las mediciones se realizaron a cada 500 m.

Los resultados de escalonamiento obtenidos se muestran en las Figuras 50 y 51.

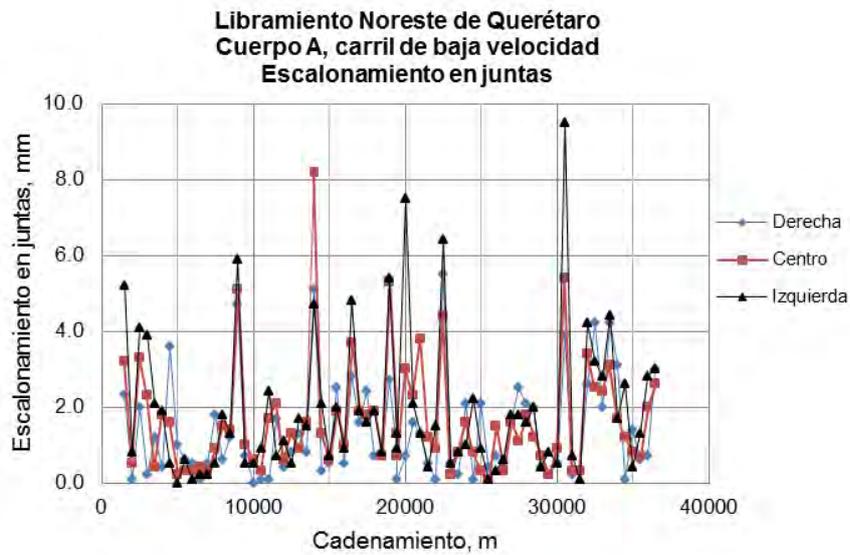


Figura 50 Evolución del escalonamiento en juntas, libramiento Noreste de Querétaro del km 0+000 al 36+000, cuerpo A carril de baja velocidad.

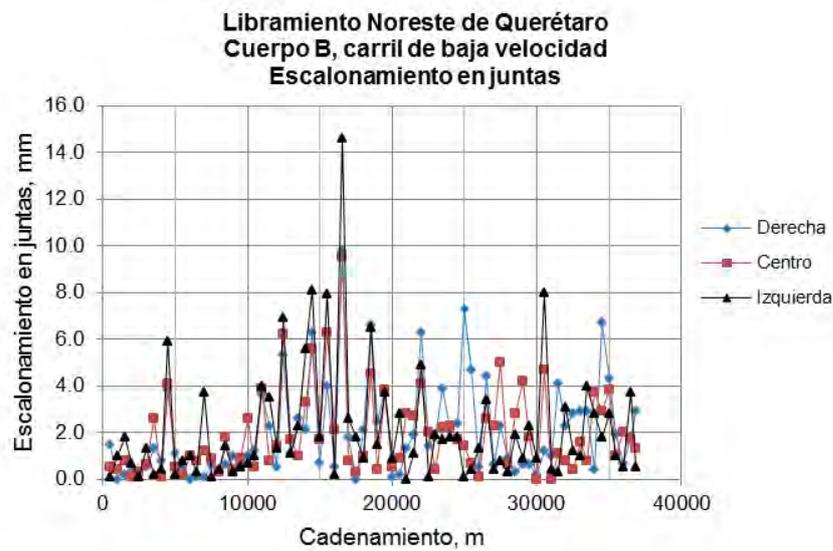


Figura 51 Evolución del escalonamiento en juntas, libramiento Noreste de Querétaro del km 0+000 al 36+000, cuerpo B carril de baja velocidad.

Conclusiones.

Este informe corresponde a los resultados de las mediciones de deflexiones con Deflectómetro de Impacto (HWD) y determinación de Índice de Regularidad Internacional (IRI) con perfilómetro Láser, en el pavimento de concreto hidráulico del Libramiento Noreste de Querétaro comprendiendo toda su longitud desde el kilómetro 0+000 al km 37+000.

Las mediciones de deflexiones con deflectómetro de impacto en centros de losas de pavimento, transferencia de carga en juntas y detección de vacíos al aplicar carga en esquinas de losas, muestran que el pavimento presenta problemas importantes pues los niveles de deflexión en algunos casos es elevado lo cual es debido a que muchas de las losas se encuentran con deterioros de importancia.

En el caso de transferencia de carga y detección de vacíos sucede algo similar, puesto que los valores promedio de transferencia de carga en juntas prácticamente para toda la evaluación son inferiores al 80 % aunque en no pocos casos los valores obtenidos son prácticamente nulos, es necesario señalar que el cuerpo más dañado es el B (sentido San Luis Potosí- México) principalmente en la zona crítica que va del km 36+000 al 20+000 (caseta de cobro); para el caso de carga en esquinas hubo mediciones en las que a ~~0~~ cero carga+ corresponde cierta deflexión lo cual es indicativo de la falta de apoyo entre la losa y la capa inferior (en este caso carpeta asfáltica, o capa de base).

La problemática del libramiento Noreste de Querétaro también está asociada con su concepción original pues el pavimento fue diseñado considerando una vida útil correspondiente a cuarenta millones (40×10^6 ESALs) de ejes equivalentes, es claro que la prohibición de tránsito pesado en la ciudad de Querétaro propiciara un incremento notable de carga y tránsito en el libramiento de tal manera que los ejes equivalentes acumulados a la fecha superan y en mucho a los de proyecto. Además, el problema se incrementó por la disposición que presentan las losas (modulación) en el tramo crítico del km 36+500 al km 20+000 en el cuerpo B. Las cargas del tránsito se aplican prácticamente sobre la junta longitudinal siendo probablemente lo que propicia un daño mayor presentándose problemas de rotura de esquinas y fracturamiento de losas.

El Índice de Regularidad Internacional, IRI, promedio de ambos cuerpos del libramiento Noreste de Querétaro es superior al valor de 2,8 m/km recomendado por la Unidad de Autopistas de cuota de la SCT como máximo para la red de peaje. Los valores oscilan entre 3 m/km y 4 m/km presentándose los valores más altos en el cuerpo B del km 36+000 al km 20+000, y en el carril de alta del cuerpo A para el mismo cadenamiento. Del km 0+000 al km 20+000 en los carriles de alta velocidad tanto para el cuerpo A como el cuerpo B se tienen valores de IRI por debajo de 3 m/km. En general el IRI actual es ligeramente mayor al que presentaba el libramiento cuando fue abierto al tránsito.

El módulo de elasticidad del concreto (E_c) y el módulo de reacción de la subrasante (k) retrocalculados son parámetros de respuesta del sistema estructural de la carretera y no deben considerarse propiedades de los materiales, dichos módulos y características de los materiales estudiados con anterioridad permitieron realizar los análisis de vida remanente del pavimento. Se encuentra que los valores en años que le restan al pavimento son teóricos y obedecen a la respuesta que se tiene al utilizar las recomendaciones establecidas en la Guía AASHTO. El análisis arroja tiempos de vida remanente entre 2 y 4 años lo cual desde el punto de vista ingenieril significa que el pavimento ya cumplió con su vida útil pues los deterioros que se encuentran a lo largo del camino son de consideración. Por otro lado, el tránsito actual con alto porcentaje de vehículos de carga (mas del 50 %) continuará dañando al pavimento tanto estructuralmente como funcionalmente.

Al comparar los resultados del estudio efectuado por el Instituto Mexicano del Transporte en el año 2005 con los obtenidos actualmente se obtiene que el nivel de daños en el pavimento es tal que funcionalmente y estructuralmente el libramiento noreste de Querétaro ha llegado a su vida útil por lo que es recomendable realizar trabajos de rehabilitación con el fin de que el libramiento Noreste de Querétaro sea capaz de brindar el servicio y confort que el autotransporte requiere so pena de que los costos de operación vehicular se sigan incrementando notablemente.

Referencias.

AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993, Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials, Washinton DC, 1993.

Hoffman , M.S. A, Direct Method for Evaluating the Structural Needs of Flexible Pavements Based on FWD Deflections, Transportation Research Record 1860, TRB, Washington DC, 2003.

Pérez S. A. Garnica A. P, Gómez L. J. A., Martínez P. G. E. I., Uso y calibración de deflectómetros de impacto en la evaluación estructural de pavimentos, Publicación Técnica 252, Instituto Mexicano del Transporte (2004).

ASTM D 5858, Cálculo del módulo elástico equivalente de pavimentos en el sitio usando la teoría elástica multicapa, (2000).

ASTM D 4694, Determinación de deflexiones con un dispositivo de carga de impulso, tipo deflectómetro de impacto, (2003).

ASTM D 4695, Medición de deflexiones en general en pavimentos, (2003).

Dynatest 8081 HWD Test System (Manual de Usuario). Versión 1.7.1 para Windows. Starke, Florida 32091.

Huang, Yang H. Pavement Analysis and Design. Pearson Prentice Hall, 2a. edición. Nj, E.U.A., 2004.

Proyecto No IE-01/05. Estudio para el Diagnóstico del Comportamiento Estructural del Pavimento de Concreto Hidráulico del Libramiento Noreste de Querétaro. Proyecto realizado para Caminos y Puentes Federales y de Servicios Conexos, realizado por el Instituto Mexicano del Transporte.



Instituto
Mexicano del
Transporte

COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA
Sistema de Gestión de la Calidad

FECHA
20111128

ENCUESTA DE SERVICIO

Con el objetivo permanente de brindarle un mejor servicio, mucho le agradeceré conteste y devuelva este cuestionario a la atención del M. C. Rodolfo Téllez Gutiérrez al correo rtellez@imt.mx o al fax (442) 2169671

En caso de tener algún comentario con relación al servicio prestado, por favor escríbala en la presente encuesta o envíela por correo electrónico a la dirección clientes@imt.mx.

Atentamente

ING. ROBERTO AGUERREBERE SALIDO
DIRECTOR GENERAL

ORGANIZACIÓN (CLIENTE): DIRECCION GENERAL DE DESARROLLO CARRETERO IE 14/11

TIPO DE SERVICIO:

INVESTIGACIÓN

NOMBRE DEL PROYECTO: "Evaluación Superficial y Estructural del Pavimento de Concreto Hidráulico del Libramiento Noreste de Querétaro.

ENSAYO

NOMBRE DEL ENSAYO:

INSTRUCCIONES: Marque con una (X) la respuesta que considere adecuada con su percepción con respecto al servicio recibido.

1. El informe de resultados le pareció:

a. Completo Incompleto, ¿Por qué? _____

b. Claro Confuso, ¿Por qué? _____

2. ¿El servicio brindado cumplió con sus expectativas?

Sí No, ¿Por qué? _____

3 El tiempo de respuesta a su solicitud de servicio fue:

4 La capacidad técnica fue:

5 El trato brindado por el personal técnico fue:

6 El tiempo de entrega de los resultados fue

7 El tiempo de gestión en los trámites administrativos fue:

Deficiente	Regular	Bueno	Excelente

8. ¿Considera buena la relación beneficio-costos del servicio?

Sí No, ¿Por qué? _____

9. ¿Recomendaría al IMT para realizar un servicio similar?

Sí No, ¿Por qué? _____

DATOS DE QUIEN LLENA LA ENCUESTA

NOMBRE:

FIRMA:

CARGO:

FECHA: