

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Aplicación de ensayos no destructivos para la determinación de la capacidad estructural del pavimento, antes y después de la rehabilitación del proyecto CA-09 Sur, tramo: Monumento al Caminero – entrada Puente Villa Nueva (Estación 8+500 a Estación 11+050)

Jorge Adalberto Juárez Menéndez

Guatemala
2007

Aplicación de ensayos no destructivos para la determinación de la capacidad estructural del pavimento, antes y después de la rehabilitación del proyecto CA-09 Sur, tramo: Monumento al Caminero – entrada Puente Villa Nueva (Estación 8+500 a Estación 11+050)

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Aplicación de ensayos no destructivos para la determinación de la capacidad estructural del pavimento, antes y después de la rehabilitación del proyecto CA-09 Sur, tramo: Monumento al Caminero – entrada Puente Villa Nueva (Estación 8+500 a Estación 11+050)

Trabajo de investigación presentado por Jorge Adalberto Juárez Menéndez para optar al grado académico de Ingeniero Civil

Guatemala

2007

Vo. Bo. :

(f) _____
MSc. Carlos Rafael Gramajo Alvarez

Tribunal:

(f) _____
Ing. Carlos Alejandro Maldonado Lutomirsky

(f) _____
MSc. Carlos Rafael Gramajo Alvarez

(f) _____
Arq. Luís Fernando Meléndez

Fecha de aprobación:

Guatemala, 05 de diciembre de 2007

PREFACIO

Desde mis inicios como auxiliar de ingeniero en la empresa C. M. Ingenieros en el 2005 surge la inquietud por elaborar un trabajo de graduación relacionado con el tema de pavimentos. Conforme me fui adentrando en el trabajo y fui conociendo el sistema de evaluación de estructuras de pavimento con ensayos no destructivos la inquietud creció. Este sistema, del que nunca antes había oído mencionar, me llamó la atención por el mecanismo de evaluación utilizado en campo, geófonos. Sin embargo, el grado de capacitación requerido para el análisis de los datos fue lo que desencadenó la motivación para exponer este tema.

Siendo parte en 2005 de la evaluación y diseño del tramo en análisis, aunque sólo como observador y aprendiz, se da la pauta para empezar a recolectar la información para el futuro trabajo de investigación. Durante este periodo se realizaron constantes visitas de campo. Utilizando diversos mecanismos, se recolectó la información, en su mayoría gráfica, la cual complementó el análisis del FWD.

Posterior a esto, en días más cercanos la empresa C. M. Ingenieros me facilita toda la documentación como mapas, datos y gráficas de la evaluación realizada después del recapeo de este tramo con el fin de llevar a cabo una evaluación comparativa del antes y después de la rehabilitación.

Este estudio permitirá demostrar la efectividad del método FWD en el análisis de estructuras de pavimento para el diseño y evaluación de tramos de carretera mediante la comparación del tramo Monumento Al Caminero – Entrada Puente Villa Nueva.

Los datos presentados son propiedad de la empresa Ingeniería y Arquitectura TEKTON por lo que se le agradece haber autorizado su uso para este trabajo.

Quisiera terminar agradeciendo a Dios por la oportunidad de realizar este trabajo, a la empresa C. M. Ingenieros en especial al Ing. Carlos Cordón por facilitarme toda la información y apoyo, a mi asesor Ing. Carlos Gramajo por su constante asesoría y guía a lo largo de este proceso, a mi esposa Jennifer de Juarez, a mis papás, Betio y Luqui y a mi hermanita Ana. Muchas Gracias a todos.

ÍNDICE

	Página
PREFACIO.....	vi
LISTA DE CUADROS.....	viii
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	ix
LISTA DE GRÁFICAS.....	x
RESUMEN.....	xi
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS.....	2
III. EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO DEL PROYECTO CA-09 SUR, TRAMO: MONUMENTO AL CAMINERO – ENTRADA PUENTE VILLA NUEVA ANTES DE SU REHABILITACIÓN.....	23
IV. EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO DEL PROYECTO CA-09 SUR, TRAMO: MONUMENTO AL CAMINERO – ENTRADA PUENTE VILLA NUEVA DESPUÉS DE SU REHABILITACIÓN.....	47
V. COMPARACIÓN ENTRE LA EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO ANTES Y DESPUÉS DE LA REHABILITACIÓN.....	64
VI. CONCLUSIONES.....	78
VII. RECOMENDACIONES.....	79
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	80

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Valores típicos para el modulo poisson.....	20
2	Valores típicos del modulo de elasticidad.....	21
3	Programa para calculo inverso.....	22
4	Perforaciones en la pista derecha.....	28
5	Perforaciones en la pista izquierda.....	28

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración		Página
1	Grietas por fatiga conocidas como cuero de lagarto.....	4
2	Depresiones.....	4
3	Agrietamientos en los bordes.....	5
4	Agrietamientos longitudinales.....	5
5	Agrietamiento transversal.....	6
6	Baches reparados.....	6
7	Baches sin reparar.....	7
8	Ahuellamiento.....	7
9	Deformaciones y esfuerzo que ocurren en un pavimento sometido a cargas.....	8
10	Viga Benkelman.....	9
11	Dynalect.....	10
12	Road Rater.....	11
13	FWD-Dynatest.....	12
14	FWD-Kuab.....	12
15	FWD-Jils.....	13
16	Zonas de esfuerzo en la estructura del pavimento bajo la carga del FWD.....	19
17	Bache de 10 cm de diámetro y 3 cm de profundidad aproximadamente.....	24
18	Grietas de piel de cocodrilo de alta severidad con desportillamiento de la carpeta asfáltica en áreas con parchado.....	24
19	Frente a ingreso colegio Monte María, ahuellamiento de media severidad con grietas de piel de cocodrilo de media severidad.....	25
20	Área parchada con daño de alta severidad (estación 9+283).....	25
21	Ahuellamiento y corrimiento de alta severidad en el tercero y cuarto carril.....	26
22	Grietas de piel de cocodrilo de media severidad en el primero y segundo carril.....	26
23	Grietas de piel de cocodrilo y ahuellamiento de media severidad en el 2º carril...	27
24	Grietas de piel de cocodrilo y peladura de severidad media al final de la sección...	27

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica		Página
1	Fuerza ejercida por el generador de fuerza dinámica.	10
2	Pulso de carga típica producida por el FWD.....	14
3	Influencia de la temperatura en la deflexión de los pavimentos de concreto asfáltico	16
4	Influencia de las variaciones estacionales en la deflexión.....	17

RESUMEN

Este trabajo se enfoca en la evaluación estructural de un pavimento por medio de la comparación de mediciones hechas a un tramo de pavimento flexible antes y después de su rehabilitación. Esta evaluación se realizó por métodos no destructivos que se basan en un reconocimiento visual de las fallas de la superficie de rodadura y la medición de deflexiones en la estructura.

Durante el reconocimiento visual de la carpeta de rodadura se pueden evidenciar fallas como cuero de lagarto, depresiones, agrietamiento en los bordes, agrietamiento longitudinal, agrietamiento transversal, baches reparados, baches sin reparar y ahuellamiento que son signos de una falla en la estructura del pavimento.

Para la evaluación por medio de aplicación de cargas el método no destructivo FWD permitió establecer la variabilidad de las deflexiones a lo largo del proyecto, permitiendo seleccionar distintas secciones de diseño (secciones homogéneas). En la ejecución de estos ensayos fue importante tomar en cuenta la temperatura ambiental y de la estructura, la ubicación de ensayos y frecuencia de los mismos.

La evaluación por métodos no destructivos después de la rehabilitación evitó alterar las propiedades físicas de la estructura y permitió modular, a través de las cargas de impacto, el comportamiento de la estructura bajo las cargas de tránsito.

Se realizó el análisis de los datos para poder evaluar si existió un aporte estructural luego de la rehabilitación. Esta evaluación muestra una disminución promedio entre 55% y 65% de las deflexiones luego de la rehabilitación. Así mismo, un incremento en el número estructural efectivo (SN_{eff}) y el módulo equivalente dando como resultado una mejoría de la estructura.

I. INTRODUCCIÓN

En Guatemala la construcción o rehabilitación de tramos de carretera es constante y va en aumento. El costo de estos trabajos es elevado y requiere de mucha experiencia para su ejecución. Es por esto que es importante poder contar con un método que permita evaluar la condición funcional y estructural de los pavimentos existentes y a la vez poder realizar un rediseño de estos. El proceso para la rehabilitación de algún tramo no termina con el diseño, posterior a esto viene la rehabilitación o reconstrucción la cual, una vez finalizada la estructura del pavimento, debe ser evaluada para comprobar que se alcanzaron las expectativas de diseño. Esta evaluación se puede llevar a cabo por medio de un análisis deflectométrico con equipo FWD.

Este trabajo inicia con una breve definición de lo que es la evaluación de estructuras de pavimentos, definido dos tipos básicos, evaluación por análisis de componentes o método destructivo y la evaluación por ensayos no destructivos.

En lo que respecta a la evaluación por ensayos no destructivos se hace una descripción detallada de cómo realizar una evaluación visual y las fallas que se pueden identificar durante esta evaluación. También, se presenta la evaluación por medio de aplicación de cargas, los equipos utilizados y los factores que influyen en la medición.

Posterior al análisis teórico de lo que consiste evaluar una estructura de pavimento se procede a analizar la estructura comprendida en el tramo Monumento Al Caminero – Entrada Puente Villa Nueva. Con este análisis se determinan los valores de deflexiones máximas, número estructural efectivo y módulo efectivo del pavimento para antes y después de la rehabilitación del tramo.

Por último, se presenta una comparación de ambos análisis por FWD para poder evaluar el aporte estructural de la rehabilitación del tramo.

II. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS

La evaluación estructural de pavimentos consiste, básicamente, en la determinación de la capacidad estructural del sistema pavimento-subrasante en una estructura vial existente, en cualquier momento de su vida de servicio, para establecer y cuantificar las necesidades de rehabilitación, cuando el pavimento se acerca al fin de su vida útil o cuando el pavimento va a cambiar su función. Las necesidades de evaluar estructuralmente los pavimentos de una red aumentan a medida que se completa el diseño y la construcción de una red vial nacional o regional y consecuentemente aumenta la necesidad de su preservación y rehabilitación.

La capacidad estructural de un pavimento se refiere a la capacidad que tenga él mismo para soportar las cargas de tránsito, actuales y futuras. Cuando la capacidad estructural del pavimento es excedida, el pavimento falla. Sin embargo, se puede distinguir entre dos tipos de fallas en un pavimento, la falla funcional y la falla estructural, según se relacione con la capacidad para cumplir su función, o con el deterioro de uno o más de sus componentes.

Dentro de las formas para evaluar la condición estructural (condición que se analiza en este documento y no la funcional) del pavimento existe el análisis de componentes con distintos tipos de ensayos no destructivos (NDT - *Non Destructive Testing*) el cual permite realizar una evaluación de manera más rápida.

Independientemente del tipo de evaluación que se lleve a cabo, se debe efectuar una investigación de las fallas existentes en el pavimento. Esta investigación tiene por objeto establecer la severidad y extensión de cada tipo de falla, así como el origen de la misma.

La evaluación estructural de pavimentos se puede dividir en dos partes, la evaluación estructural por análisis de componentes, también conocido como método destructivo y la evaluación estructural con métodos no destructivos.

A. Evaluación estructural por análisis de componentes

Consiste en hacer un muestreo de los materiales que conforman las distintas capas del pavimento. Este muestreo consiste en efectuar ensayos *in situ* (perforaciones de aproximadamente 85 cm de profundidad)¹. Una vez obtenidas las muestras de materiales se procede a realizar ensayos de laboratorio para definir el

¹ También conocidas como calicatas.

tipo de materiales, sus espesores y condición. Esta información puede ser utilizada para asignar coeficientes estructurales ² a cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento.

Los coeficientes estructurales son utilizados para calcular el Número Estructural (SN³) que es un indicativo de la capacidad de carga total del pavimento, es decir es la sumatoria de los espesores de las capas por el coeficiente de cada una de ellas. Utilizando el SN y el módulo de resiliencia (M_R⁴) de la subrasante se puede establecer la capacidad remanente de carga a partir de las estimaciones del tránsito futuro.

Este procedimiento, en conjunto con la evaluación de fallas, puede utilizarse para evaluar la capacidad estructural de un pavimento siempre que los materiales que conforman la estructura del pavimento no se hayan deteriorado sustancialmente debido a los efectos del tráfico, agua y ambiente, etc.

Aunque este procedimiento pueda dar muy buenos resultados, requiere de una cantidad considerable de muestreos y ensayos a los materiales de las distintas capas que conforman la estructura del pavimento y la subrasante, lo que implica un periodo de tiempo muy largo, del cual no siempre se dispone además de una alteración física de la estructura.

B. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL POR MEDIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (NDT⁵)

Esta evaluación, a diferencia del análisis de componentes, no daña la estructura del pavimento, es decir, no requiere ningún tipo de muestreo o perforaciones. Se basa en la evaluación visual y mediante mecanismos con la capacidad de recolección de datos sin alterar la estructura como los ensayos de medición de deflexiones producidas por impacto.

1. Evaluación visual. Para realizar una investigación de fallas, la Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA) publicó en Diciembre del año 2000 la actualización del *Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras*. En el Tomo III de dicho manual, se presenta el *Catálogo Centroamericano de Daños a Pavimentos Viales*, el cual es un resumen de las fallas más comunes que se encuentran en la región, incluyendo una descripción, posibles causas, niveles de severidad, medición, un esquema representativo y fotografías de las mismas. De esta manera, se reduce en buena medida el factor subjetivo asociado a la identificación visual de las fallas. A continuación se describen algunos tipos de falla, sin que se trate de un listado completo o exhaustivo.

²El coeficiente estructural representa la capacidad estructural del material para resistir las cargas solicitadas.

³Structural Number por sus siglas en ingles

⁴Módulo de resiliencia: energía absorbida durante la deformación elástica, la cual puede recuperarse al descargar el material. Este valor es la energía por unidad de volumen requerida para llevar el material desde un esfuerzo nulo hasta el valor de esfuerzo de fluencia o límite elástico s_0 .

⁵NDT Non Destructive Test por sus siglas en ingles

a. Cuero de lagarto. Se denomina así a una serie de grietas interconectadas debidas a la falla por fatiga de la superficie de concreto asfáltico producida bajo la aplicación repetida de las cargas de tráfico; por ello también se conocen como grietas por fatiga. Generalmente estas grietas se inician en la base de la capa asfáltica cuando los esfuerzos de tensión y las deformaciones producidos por la carga aplicada por una llanta son muy altos. Las grietas se propagan hacia la superficie, inicialmente como una serie de grietas longitudinales paralelas que con la repetida aplicación de las cargas de tránsito, se conectan unas con otras formando figuras de muchos lados con ángulos obtusos, que desarrollan un patrón semejante al cuero de un lagarto. Estas figuras generalmente tienen una dimensión menor de 0.60 metros en su lado mayor y se encuentran ubicadas en la zona en donde los vehículos marcan las huellas de sus llantas.

b. Depresiones. Son áreas localizadas de la superficie del pavimento que presentan una elevación ligeramente menor que el pavimento circundante. En muchos casos las depresiones son muy ligeras y no se notan sino hasta después que la lluvia las deja inundadas. Las depresiones usualmente pueden identificarse por la mancha dejada por el agua. Las depresiones se deben al asentamiento del suelo de cimentación o son el resultado de una construcción inapropiada.

Ilustración No. 1

Grietas por fatiga conocidas como Cuero de Lagarto⁶



Ilustración No. 2

Depresiones⁷



c. Agrietamientos en los bordes. Son grietas paralelas a una distancia generalmente menor de unos 0.3 a 0.6 m del borde del pavimento. Estos agrietamientos son acelerados por las cargas de tránsito y pueden ser provocados por mala compactación, falta de confinamiento lateral o agua infiltrándose por el borde, produciendo pérdida de soporte por erosión.

⁶Fuente C. M. Ingenieros

⁷Fuente C. M. Ingenieros

Ilustración No. 3
Agrietamientos en los bordes⁸



d. Agrietamientos longitudinales. Ocurren paralelos a la dirección de construcción del pavimento y pueden ser causados por:

- 1) Construcción deficiente de la junta longitudinal
- 2) Acortamiento de la superficie de concreto asfáltico debido a bajas temperaturas o endurecimiento del asfalto y/o variación cíclica de la temperatura diaria
- 3) Reflexión de grietas existentes bajo la superficie.

Ilustración No. 4
Agrietamientos longitudinales⁹



e. Agrietamientos transversales. Se presentan aproximadamente a ángulos rectos a la línea central y pueden deberse a:

- 1) Acortamiento de la superficie de concreto asfáltico debido a bajas temperaturas o endurecimiento del asfalto y/o variación cíclica de la temperatura diaria.

⁸Fuente C. M. Ingenieros

⁹Fuente C. M. Ingenieros

2) Reflexión de grietas existentes bajo la superficie.

Ilustración No. 5

Agrietamientos transversales¹⁰



f. Baches reparados. Son áreas de pavimento que han sido reemplazadas con nuevo material para reparar el pavimento existente. Se consideran un defecto sin importar la forma como se comportan, ya que las áreas circundantes usualmente no interactúan de la misma manera.

Ilustración No. 6

Baches reparados¹¹



g. Baches sin reparar. Generalmente son pequeñas depresiones en forma de guacal, menores de 0.90 metros de diámetro, que suelen tener los bordes afilados y con caras verticales cerca de la superficie. Su crecimiento se ve acelerado por la acumulación de agua dentro del bache.

¹⁰ Fuente C. M. Ingenieros

¹¹ Fuente C. M. Ingenieros

Ilustración No. 7
Baches sin reparar¹²



h. Ahuellamiento. Es una depresión provocada por el paso de las llantas de los vehículos. En algunos casos puede ocurrir el levantamiento del pavimento a los lados de la huella y muchas veces sólo se nota después de la lluvia cuando el agua se acumula en la huella. El ahuellamiento se debe a la deformación en cualquiera de las capas del pavimento o en la subrasante causada por consolidación o movimiento lateral de los materiales bajo las cargas del tránsito.

Ilustración No. 8
Ahuellamiento¹³



Dependiendo del tipo, severidad y extensión de las fallas existentes en un pavimento se puede establecer si es posible la reparación de las mismas para la aplicación de un recapeo o si es necesario realizar algún tipo de reconstrucción total o parcial de la estructura del pavimento.

No obstante que la identificación de las fallas en un pavimento es subjetiva, permite definir el estado general del pavimento e identificar secciones con deficiencia estructural contribuyendo así a la evaluación estructural.

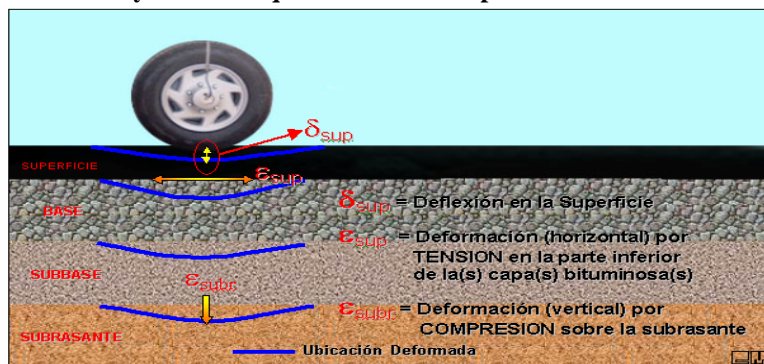
¹² Fuente C. M. Ingenieros

¹³ Fuente C. M. Ingenieros

2. **Evaluación por medio de aplicación de cargas.** Los ensayos no destructivos bajo una carga dada permiten establecer la variabilidad de las deflexiones a lo largo de un proyecto, para seleccionar distintas secciones de diseño (secciones homogéneas). Estas deflexiones representan el sistema de respuesta de la estructura del pavimento y su subrasante a una carga aplicada como se ilustra a continuación.

Ilustración No. 9

Deformaciones y esfuerzos que ocurren en un pavimento sometido a cargas¹⁴



a. **Tipos de equipos de ensayos no destructivos (NDT).** Las consideraciones básicas para la selección de un equipo para NDT son:

- 1) Características operacionales (recolección y capacidad para almacenaje de datos, obstrucción del tráfico, requerimientos de calibración, movilidad y requerimientos de entrenamiento de operadores).
- 2) Calidad de datos (adaptación, repetibilidad, aproximación).
- 3) Versatilidad (número de sensores, configuración y movilidad de sensores y rango de niveles de carga).

Los equipos para medición de deflexiones existentes actualmente se pueden agrupar en tres clases diferentes, dependiendo del tipo de carga utilizada.

a) **Equipos para medición de deflexiones bajo carga estática.** Este tipo de equipos mide la máxima deflexión del pavimento bajo una carga estática o aplicada lentamente. El más comúnmente utilizado es la Viga Benkelman (ver Ilustración No. 10). Las mediciones se efectúan por medio de un procedimiento estándar. Dentro de los equipos para medición bajo carga estática también se puede mencionar los equipos para ensayos de placa de carga y el medidor de curvatura. También existen equipos automatizados que utilizan una carga que se mueve lentamente como el Deflectógrafo de La Croix y el Deflectómetro Móvil de California.

¹⁴Fuente C. M. Ingenieros

Ilustración No. 10
Viga Benkelman¹⁵



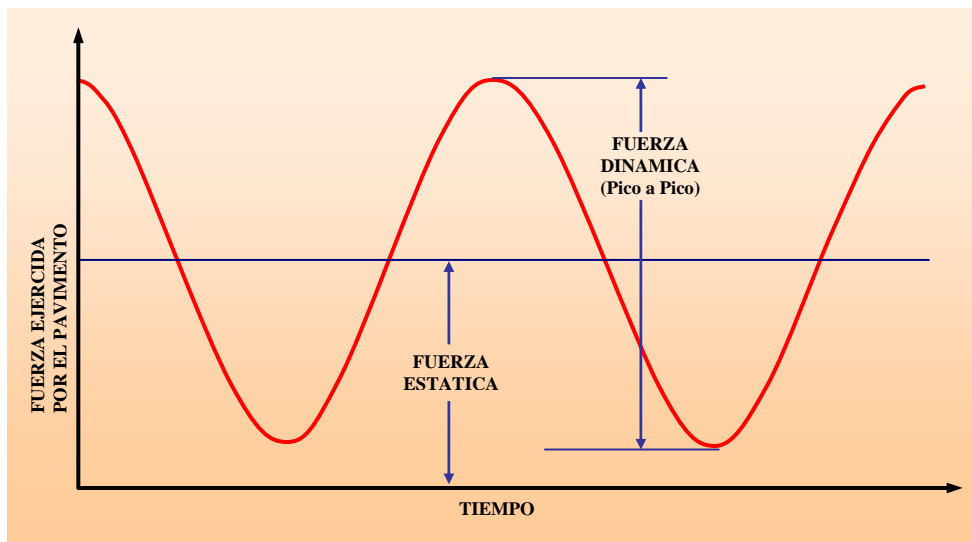
Las ventajas de la Viga Benkelman incluyen: la facilidad de uso, el bajo costo del equipo y la existencia de una extensa base de datos debido a su uso a través de muchos años. Por otra parte, las mayores desventajas de la viga Benkelman incluyen: la dificultad para asegurar que los soportes frontales no se encuentran dentro de la zona de deformación, la dificultad o incapacidad para determinar la forma y tamaño de la zona de deformación, la pobre repetibilidad de las mediciones obtenidas con este equipo y el intenso y dificultoso trabajo que requiere el aparato.

Además de los problemas anteriores, un problema técnico asociado con todos los equipos de tipo estático es el método de aplicación de la carga. La carga estática empleada no representa adecuadamente los efectos de la carga móvil sobre las llantas de los vehículos. Estos equipos tampoco pueden ser utilizados para determinar la transferencia de carga a través de las juntas en un pavimento rígido.

b) Equipos de deflexión bajo carga dinámica sostenida. Los equipos de medición de deflexiones bajo carga dinámica sostenida aplican una precarga estática al pavimento y luego aplican una vibración sinusoidal por medio de un generador de fuerza dinámica, como se ilustra en la Gráfica No. 1. Para asegurar que el equipo no rebote sobre la superficie del pavimento, la magnitud de la fuerza dinámica, pico a pico, debe ser menor del doble de la precarga estática. Consecuentemente, si se incrementa la carga dinámica pico a pico, debe incrementarse la precarga estática.

¹⁵ Fuente C. M. Ingenieros

Gráfica No. 1
Fuerza ejercida por el generador de fuerza dinámica



Los equipos más utilizados dentro de esta categoría son el Dynaflect y el Road Rater, ilustraciones 11 y 12, respectivamente. La secuencia normal de operación consiste en mover el aparato al punto de ensayo e hidráulicamente bajar las ruedas de carga y los receptores de la deflexión a la superficie del pavimento. Se efectúa el ensayo, se graban los datos y se mueve el equipo al siguiente punto de ensayo.

Ilustración No. 11
Dynaflect¹⁶



¹⁶Fuente www.dynaflect.com

Ilustración No. 12
Road Rater¹⁷



Mientras que el equipo de carga bajo una vibración sostenida representa una mejora sobre el equipo de deflexiones bajo carga estática (en el sentido que no se necesita un punto de referencia), la precarga estática aún representa un problema técnico. La precarga estática es relativamente grande en comparación con la carga máxima pico a pico. Dado que la mayoría de los materiales para pavimentos son sensibles a los esfuerzos (los suelos finos muestran un ablandamiento bajo esfuerzos y los materiales granulares exhiben un endurecimiento bajo esfuerzos), los estados de esfuerzos y rigidez pueden ser modificadas por la precarga estática. La precarga estática puede cerrar los vacíos que existen bajo el pavimento, resultando en deflexiones bajas no representativas. Finalmente, la frecuencia de carga afecta los resultados de deflexión y es difícil establecer una frecuencia de carga que corresponda con la de los vehículos en movimiento.

c) Equipos de deflexión por carga de impulso. Los equipos de deflexión por carga de impulso, mejor conocidos por sus siglas en inglés FWD (Falling Weight Deflectometer), distribuyen una fuerza de impulso temporal al pavimento. Se levanta un peso a una altura dada sobre la guía del sistema y luego se deja caer sobre una placa circular colocada sobre el pavimento. La fuerza de impulso temporal, puede ser modificada variando la magnitud del peso que se deja caer o variando la altura de caída. Entre los equipos comerciales existentes para la medida de deflexiones por una carga de impulso están los fabricados por Dynatest, KUAB y Jils (Ilustraciones 13, 14 y 15, respectivamente).

¹⁷ Fuente www.wsdot.wa.gov

Ilustración No. 13
FWD – Dynatest¹⁸



Ilustración No. 14
FWD – KUAB¹⁹



¹⁸ Fuente C. M. Ingenieros

¹⁹ Fuente www.erikuab.com

Ilustración No. 15

FWD –Jils²⁰



En la secuencia normal de operación, el equipo se mueve al punto de ensayo y se bajan hidráulicamente el plato de carga y los sensores de deflexión (geófonos) hasta entrar en contacto con la superficie del pavimento. Se aplica la secuencia del ensayo para la carga elegida y el número de caídas desde la altura seleccionada (regularmente buscando producir una carga que simule el paso de una llanta de un eje equivalente de 80 kN (18,000 lb). Luego el plato de carga y los sensores se levantan hidráulicamente y se mueve el equipo al sitio de ensayo siguiente.¹⁶

Una de las principales ventajas de los equipos que trabajan con la aplicación de carga por impulso es su capacidad de modelar más acertadamente la carga producida por la llanta tanto en magnitud como en duración, produciendo así una deflexión que se asemeja más a la deflexión que se produce en el pavimento al paso de un vehículo. Adicionalmente, como se muestra en la gráfica No. 2, se aplica una precarga muy pequeña en comparación con la generada por equipos de carga dinámica sostenida. Esta precarga varía con el equipo utilizado, pero generalmente se encuentra en el rango de 8 a 18 por ciento de la carga máxima de impulso, antes de que se libere la carga. Durante el período en que el peso se deja caer, la precarga normalmente se reduce al rango de 5 a 14 por ciento de la carga máxima de impulso.

Hay otras ventajas del FWD que lo hacen un equipo bastante deseable para realizar una evaluación estructural. Entre éstas se incluye:

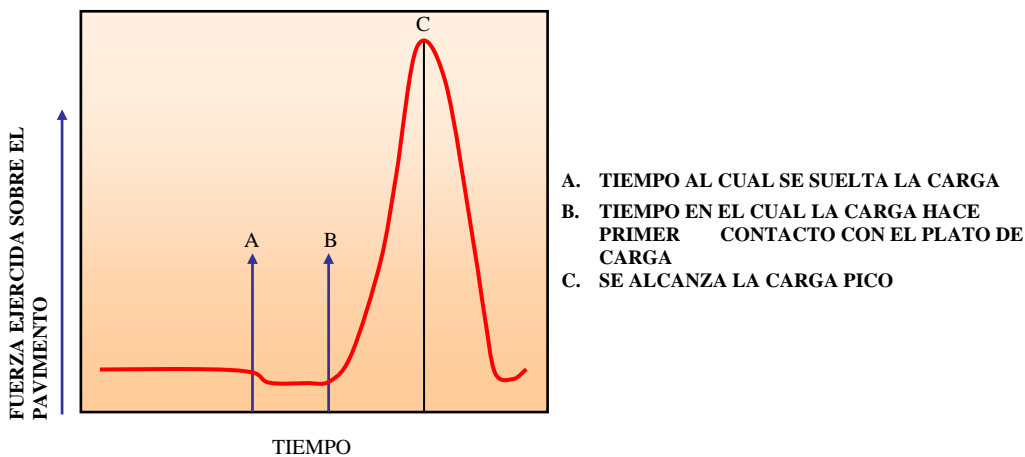
- la capacidad para medir la eficiencia de la transferencia de carga y la presencia de vacíos.

²⁰ Fuente www.jilswd.com

- la capacidad para grabar los datos del cuenco de deflexión (gráfica de deformación de la superficie *vs* distancia medida desde el centro de plato de carga).
- la velocidad en la ejecución del ensayo.

Gráfica No. 2

Pulso de carga típica producida por el FWD



b. Factores que influyen sobre la medida de las deflexiones. Existen muchos factores que influyen en la medición de deflexiones y dificultan la interpretación de los resultados, sin embargo, los más importantes son los relacionados con la carga, el pavimento y el clima o condiciones ambientales.

a) Factores relacionados con la carga. Idealmente, la deflexión medida debería simular la deflexión que ocurre bajo las condiciones de diseño (por ejemplo carga de rueda de 40 kN (9,000 lbs), ya que el tipo y magnitud de la carga influye en la deflexión que el pavimento presente como respuesta. Al incrementarse la carga, la deflexión del pavimento también se incrementará. Sin embargo, ésta no es una relación lineal, ya que la mayoría de materiales de la subrasante y materiales granulares no tienen una relación lineal de esfuerzo – deformación. Por ello cuando se trata de evaluar pavimentos con un tráfico pesado muy alto, se utilizan métodos no destructivos que apliquen cargas cercanas a aquellas que aplican esos vehículos pesados. El FWD es el que mejor puede simular esta condición, eliminando así el problema de extrapolar la deflexión bajo cargas pesadas a partir de la aplicación de cargas livianas.

Se han desarrollado correlaciones entre las deflexiones obtenidas por equipos con cargas livianas y las deflexiones producidas por equipos con cargas pesadas, pero tales correlaciones no son recomendables ya que:

- Se basan en datos que muestran mucha dispersión, de manera que la correlación puede producir grandes errores.

- La correlación obtenida para un tipo de pavimento y subrasante puede no ser aplicable para otro tipo de estructura diferente.

Aún cuando se comparen equipos que apliquen cargas similares, las deflexiones obtenidas pueden ser diferentes si difieren las formas de aplicación de la carga. La duración de la carga asociada con un determinado equipo causa variación en las deflexiones, de manera que mientras más corto sea el tiempo de aplicación de la carga (vehículo más rápido), menores serán las deflexiones. Por ejemplo, un equipo con aplicación estática de carga tiende a producir deflexiones significativamente mayores a aquellas que producen los vehículos en movimiento. Los equipos que aplican una carga dinámica constante producen deflexiones que varían con la frecuencia de la carga. Los equipos que utilizan una carga por impulso (FWD) son los que dan lugar a deflexiones que mejor simulan las deflexiones producidas por la carga de una llanta en movimiento.

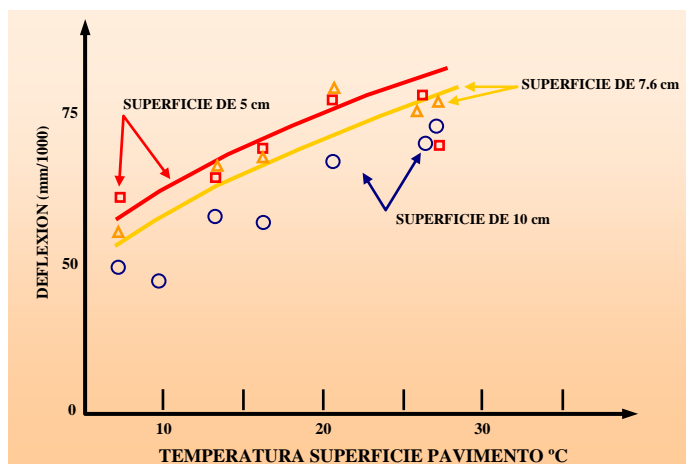
b) Factores relacionados con el pavimento. Las variaciones en las deflexiones de los pavimentos pueden deberse a muchos factores asociados al pavimento. Algunas situaciones que inciden en la variación de las deflexiones se presentan a continuación:

- La deflexión medida en un pavimento asfáltico sobre o cerca de una zona fallada (cuero de lagarto, agrietamientos lineales, etc.), normalmente será mayor que la medida en una zona no fallada.
- La deflexión medida en la zona de paso de las llantas de los vehículos en un pavimento asfáltico, es mayor que la medida entre ellas.
- Las deflexiones en zonas en corte pueden ser diferentes a las que se midan en zonas de relleno.
- Los cambios en la estructura del pavimento o en el suelo de subrasante afectan significativamente las deflexiones, así como también lo hace la presencia cercana de la roca, especialmente en pavimentos flexibles.
- Las variaciones de la rigidez/resistencia en el pavimento producidas por factores tales como compactación, propiedades de los materiales y contenido de humedad producen diferencias en las deflexiones a lo largo de un proyecto típico aunque las mediciones se hagan a muy cortos intervalos.

c) Factores climáticos. Hay varios factores climáticos que pueden afectar las deflexiones y deben ser considerados al planificar y realizar una evaluación de deflexiones. Por ejemplo, la temperatura afecta las deflexiones de un pavimento asfáltico. Conforme se incrementa la temperatura promedio del asfalto, se incrementa la deflexión como se muestra en la Gráfica No. 3. Esto es consecuencia del ablandamiento que sufre el asfalto a altas temperaturas con la consecuente reducción en su módulo.

Gráfica No. 3

Influencia de la temperatura en la deflexión de los pavimentos de concreto asfáltico



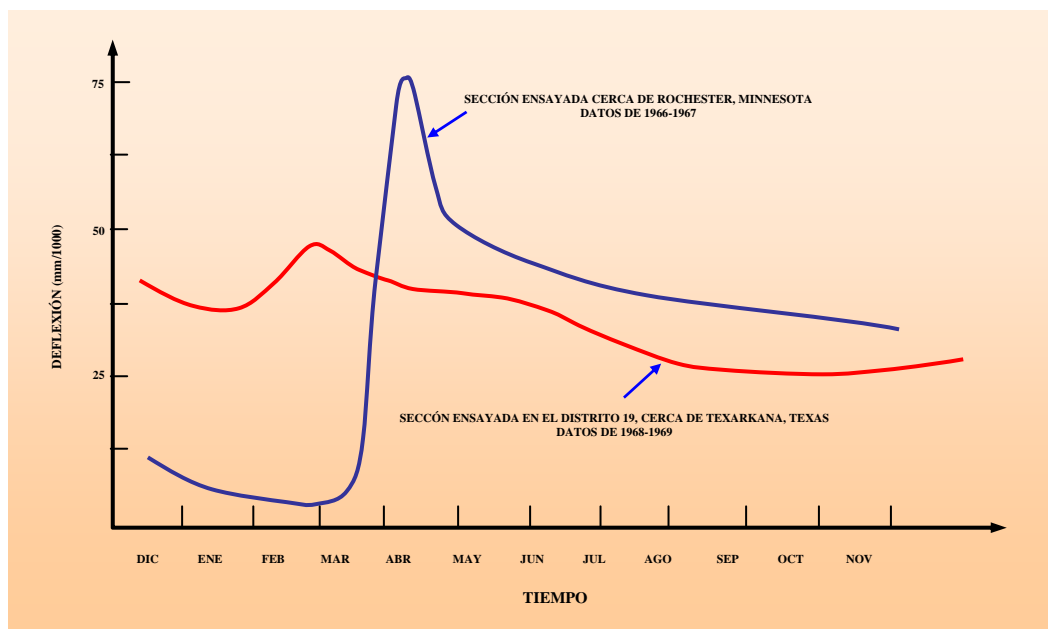
Las variaciones climáticas estacionales tienen una gran influencia en las deflexiones del pavimento asfáltico, como se ilustra en la gráfica No. 4²¹, en donde se puede observar el cambio en las deflexiones según distintos periodos climáticos, tales como:

- El período de congelamiento, que es cuando el pavimento es más resistente y las deflexiones son menores.
- El período de deshielo, durante el cual comienza a desaparecer el hielo del pavimento y subrasante, y las deflexiones se incrementan.
- El período durante el cual el exceso de agua libre del hielo derretido sale del pavimento y la subrasante, que es cuando el suelo comienza a recuperarse y las deflexiones se reducen.
- El período durante el cual la deflexión se nivela conforme el contenido de agua se reduce.

El tipo de suelo de la subrasante también interactúa con los factores climáticos estacionales para influir sobre las deflexiones. Por ejemplo un suelo arenoso bien drenado presentará deflexiones menores que un depósito de limo arcilloso o un depósito de arcilla.

²¹ AASHTO *Guide for Design of Pavement Structure*, 1993

Gráfica No. 4
Influencia de las variaciones estacionales en la deflexión



Para regiones como la nuestra donde no existe la posibilidad del congelamiento, la variación estacional de las deflexiones se presenta más como una curva sinusoidal aplanada, con la deflexión pico durante la época lluviosa cuando existe una gran cantidad de humedad. En las regiones muy secas, el período de máximas deflexiones se presenta durante el verano o época más calurosa, cuando la superficie asfáltica se ablanda debido a las altas temperaturas y la intensa radiación solar.

Es importante considerar la hora del día y la época del año en la programación de una evaluación de ensayos no destructivos, así como considerar sus efectos al interpretar los resultados. Idealmente, las mediciones de deflexiones deben ser corregidas para una temperatura estándar de 21°C (70 °F) y para la estación crítica equivalente basados en procedimientos desarrollados localmente.

C. EJECUCIÓN DE UNA INVESTIGACIÓN MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS CON FWD

Cuando los datos de la investigación con ensayos no destructivos se van a utilizar para determinar los espesores de recapeo o refuerzo a partir de las deflexiones, la investigación con NDT debería realizarse durante la época crítica del año, es decir cuando la capacidad portante de la subrasante es menor. Si los ensayos no se pueden realizar durante la época crítica, debe utilizarse un factor de ajuste para convertir las deflexiones medidas en deflexiones para la época crítica. Una condición importante es que, para realizar

una interpretación apropiada, es necesario contar con los espesores reales de cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento.

1. Mediciones de temperatura. La temperatura del pavimento debe ser medida cuando se realiza la investigación con NDT para que las deflexiones o los módulos puedan ser corregidos a la temperatura estándar. Se puede obtener una relación ubicando unos pocos puntos en el pavimento y efectuando mediciones de las deflexiones en estos puntos a distintas horas durante el día desde temprano en la mañana hasta tarde por la noche. La temperatura del aire y del pavimento y las deflexiones para establecer una correlación deberían medirse cada hora y los resultados representados gráficamente para obtener la relación entre temperatura y deflexión. Los puntos seleccionados deben ser representativos de aquellos en los que se realizará las determinaciones para el proyecto, por ejemplo en el área de la huella de los vehículos.

La información sobre la temperatura del pavimento puede determinarse perforando agujeros de distinta profundidad para obtener información sobre el perfil de temperatura. Esta debe obtenerse como mínimo en la superficie, siendo recomendable obtenerla también a medio espesor de la capa de superficie de rodadura. Si no es posible obtener la temperatura a medio estrato, las mediciones de temperatura en la superficie deberán obtenerse simultáneamente con la temperatura promedio del aire durante cinco días para aproximar el valor de la temperatura de la capa utilizando correlaciones, tal como las ecuaciones de Bell.

2. Ubicación de ensayos y frecuencia de los mismos. La distancia entre los puntos de ensayo puede variar dependiendo de la longitud y tipo de proyecto a evaluar, usualmente esta distancia puede estar dentro del rango de 50 m a 100 m. En el caso de mediciones a nivel de red (Gerencia de Pavimentos), el espaciamiento entre cada punto de ensayo suele ser de 200 m a 250 m. Cuando se tiene más de una pista en cada dirección, normalmente es suficiente con efectuar las mediciones en la pista externa, o pista del tránsito pesado, sin embargo es deseable realizar mediciones en otras pistas si las fallas asociadas con la carga en el pavimento varían mucho de pista a pista. En carreteras de dos pistas, el perfil de mediciones debe escalonarse entre pista y pista, por ejemplo, si se efectúan mediciones a cada 50 m, en una dirección deberán efectuarse en las estaciones 30+000, 30+050, 30+100 y en la otra dirección en las estaciones 30+025, 30+075, 30+125. En pavimentos asfálticos las deflexiones deben medirse en la zona de paso de las llantas de los vehículos (zona del ahuellamiento).

Las deflexiones corregidas pueden ser representadas gráficamente contra el estacionamiento del proyecto para ilustrar la variación en los resultados y facilitar su relación respecto a levantamientos de fallas existentes, drenajes, etc.

3. Campaña Intensiva de ensayos de deflexión. Si se requiere información adicional para establecer con mayor certeza la causa o extensión de un cierto tipo de falla, se puede realizar un programa

intensivo de ensayos de deflexión. Por ejemplo, si se encuentra que las deflexiones en una zona de un proyecto son inexplicablemente altas se puede realizar una campaña intensiva en conjunto con un programa de perforaciones para determinar las causas.

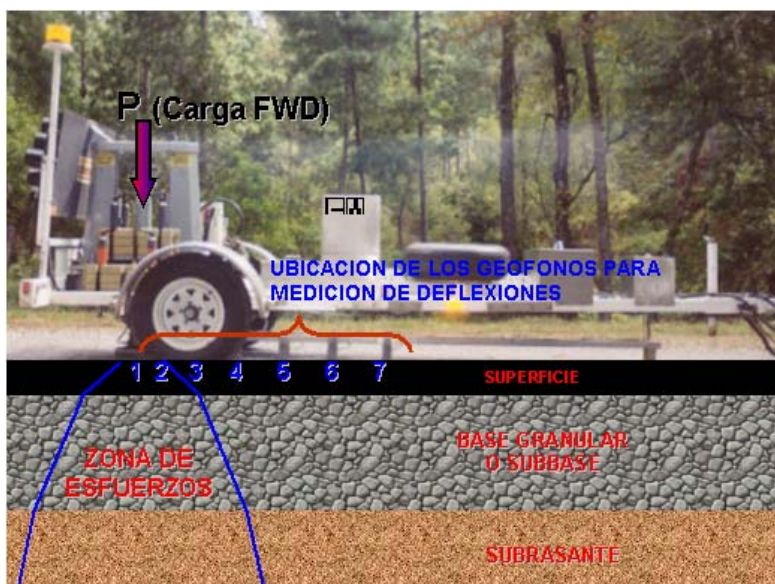
4. Interpretación de resultados de ensayos no destructivos. Los datos de deflexión obtenidos con NDT deben utilizarse en combinación con los resultados de las investigaciones de fallas, drenaje, materiales y subrasante para determinar la condición estructural de pavimento. A continuación se presenta el procedimiento de análisis:

a. Uniformidad del proyecto. El perfil de deflexiones a lo largo del proyecto puede ser examinado para determinar si existe algún cambio significativo en la respuesta estructural del pavimento. Para efectuar este examen se debe comparar el perfil de deflexiones con los resultados de las investigaciones de fallas, drenaje, materiales y subrasante para establecer las causas o valores de alta o baja deflexión en las áreas afectadas. Con base en los resultados de este examen, se podrá dividir el proyecto en dos o más secciones de diseño. Cada sección debe ser tratada por separado para fines del diseño de rehabilitación o refuerzo del pavimento, es decir, que el espesor de refuerzo, el diseño de subdrenajes, etc. puede ser diferente para cada sección.

b. Determinación del módulo de elasticidad de las capas del pavimento. En la Ilustración No. 16 se presenta un esquema para un NDT con FWD. En éste, el pavimento se presenta como un sistema elástico de múltiples capas.

Ilustración No. 16

Zonas de esfuerzo en la estructura del pavimento bajo la carga del FWD



Para determinar el módulo de elasticidad de cada capa se debe conocer el espesor (h) y el módulo de Poisson (μ) de cada una. En la práctica, para propósitos del análisis, se asume el módulo de Poisson basándose en el tipo de material que conforma cada capa. En el Cuadro No. 1 se presenta los valores típicos para varios materiales usados en la construcción de pavimentos.

Cuadro No. 1
Valores típicos para el módulo de Poisson

Material	Rango general	Observaciones	Valor típico
Concreto de cemento Portland	0.10 – 0.20		0.15
Concreto asfáltico y base tratada con asfalto	0.15 – 0.45	Altamente dependiente de la temperatura. Usar límite inferior (0.15) para temperatura baja (menor de 0° C) y límite superior (0.45) para temperatura alta (50° C o más).	0.35
Base estabilizada con cemento	0.15 – 0.30	El grado de agrietamiento en la base estabilizada tiende a reducir el valor de 0.30 (sana, libre de grietas) a 0.15 (muy agrietada).	0.20
Base granular y subbase	0.30 – 0.40	Usar límite inferior para material triturado y el límite superior para gravas y arenas naturales.	0.35
Subrasante	0.30 – 0.50	Depende del tipo de suelo de la subrasante. Para suelos granulares usar un valor cercano a 0.30 y para suelos cohesivos un valor cercano a 0.50.	0.40

Durante el ensayo, se miden las deflexiones a diferentes distancias radiales r_n del centro de la placa de carga, para definir el cuenco de deflexión. La suposición básica es que existe un conjunto de módulos de elasticidad de las capas (E_1, E_2, \dots, E_n), que bajo la combinación de carga/pavimento da lugar a valores de deflexión iguales a las deflexiones medidas del cuenco de deflexión de campo. Debe notarse sin embargo, que ésta no es una solución única. Se utiliza la técnica de cálculo inverso (backcalculation) aplicada a la teoría de la elasticidad de capas múltiples para obtener valores de módulos de elasticidad que satisfagan los valores de deflexión medidos. Una limitación de este procedimiento es que su complejidad matemática obliga a la solución computarizada del problema. Sin embargo, actualmente se encuentran disponibles varios de estos programas, algunos de los cuales se listan en el Cuadro No. 2. Otra limitación es la suposición de que los materiales que conforman la estructura del pavimento se comportan en condiciones idealizadas de ser linealmente elásticos, uniformes y continuos. Esta suposición ignora las discontinuidades (agrietamientos), la dependencia de los esfuerzos, la variabilidad de los materiales y el efecto de los gradientes de temperatura.

Los valores de los módulos de elasticidad de cada capa obtenidos por el cálculo inverso a partir de las mediciones del NDT deben compararse con la experiencia previa en materiales similares y con los valores típicos (ver Cuadro No. 2) para verificar que los resultados sean razonables.

Cuadro No. 2
Valores típicos del modulo de elasticidad²²

Material	Rango general (lbs/plg ²)	Valor típico (lbs/plg ²)
Concreto asfáltico	200,000 – 450,000	350,000
Concreto de cemento Portland	3,000,000 – 8,000,000	4,000,000
Base tratada con asfalto	100,000 – 400,000	200,000
Base tratada con cemento	500,000 – 1,000,000	800,000
Concreto pobre	1,000,000 – 3,000,000	2,000,000
Base granular	20,000 – 50,000	35,000
Subrasante granular	10,000 – 20,000	15,000
Subrasante de suelos finos	3,000 – 10,000	5,000

Los sistemas de pavimentos de concreto asfáltico generalmente se modelan como un sistema de capas múltiples utilizando la teoría de la elasticidad, sin embargo, también se utilizan los procedimientos basados en la relación variable de esfuerzo-deformación. Los valores de módulo de elasticidad determinados por cálculo inverso deben considerarse como valores efectivos sobre un área dada horizontal y verticalmente debido a la dependencia de esfuerzos de la mayoría de los materiales utilizados en pavimentos.

c. Programas para el cálculo inverso (Backcalculation). Los resultados de deflexión obtenidos por cualquiera de los equipos de deflexión dinámica (carga dinámica sostenida y carga de impulso), pueden ser usados para determinar los módulos de los materiales que conforman la estructura del pavimento. La mayoría de los programas para el cálculo inverso incluyen la aplicación de la teoría de la elasticidad para capas múltiples a un conjunto de deflexiones teóricas para el sistema del pavimento con la estimación de módulos iniciales. Estos módulos iniciales son modificados a través de una serie de iteraciones en las que las deflexiones calculadas son comparadas con las deflexiones medidas hasta que se obtiene valores dentro de los límites de tolerancia establecidos. Los módulos calculados por este proceso constituyen un sistema teórico para el pavimento que responde a las deflexiones superficiales bajo la carga aplicada de manera similar al sistema real del pavimento *in situ*.

²² Las propiedades de las capas asfálticas son altamente dependientes de la temperatura. Los valores indicados corresponden a temperaturas en el rango de 21-27°C (70-80°F)

Según sea el procedimiento de cálculo utilizado para encontrar la correspondencia entre las deflexiones medidas y las calculadas, se puede tener distintos tipos de programas de cálculo. Una lista de algunos de los programas de cálculo inverso actualmente disponibles se presenta en el Cuadro No. 3.

Cuadro No. 3
Programas para cálculo inverso

Programa de calculo regresivo	Numero de capas	Base	Tipo de pavimento	Consideración de variación no lineal de esfuerzos
BISDEF	4	BISAR	Flexible	No
ELSDEF	4	ELSYM5	Flexible	No
CHEVEDEF	4	CHEVRON	Flexible	No
MODULUS	4	WESLEA	Flexible	No
COMDEF	3	CHEVRON	Compuesto	No
ILLI-BACK	2	Westergaard	Rígido	No
MODCOMP5	8	ELSYM5	Flexible	Sí
BOUSDEF	4	Espesor equivalente	Flexible	No
ELMOD	4	Espesor equivalente	Flexible y rígido	Sí
EVERCALC	5	CHEVRON	Flexible	Sí
WESDEF	5	WESLEA	Flexible	No

III. EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO DEL PROYECTO CA-9 SUR, TRAMO: MONUMENTO AL CAMINERO – ENTRADA PUENTE VILLA NUEVA ANTES DE SU REHABILITACIÓN

A. INSPECCIÓN DEL ESTADO FÍSICO DE LA SUPERFICIE DE RODADURA

El inicio del tramo se encuentra en el Monumento al Caminero (estación 8+500) y finaliza aproximadamente 100 m después del paso elevado del primer ingreso a Villanueva (estación 15+150). Con el fin de tener un registro con terminología adecuada la inspección del tramo se hizo basándose en el *Catálogo de Daños para Pavimentos Viales del Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras* de la SIECA.

Para la evaluación física del tramo se utilizó un GPS y una cámara digital. La cámara digital permitió registrar fotografías de los puntos o tramos en donde se evidenciaba alguna falla. El GPS proporcionó la localización de cada uno de estos puntos, así como el recorrido a lo largo del tramo en evaluación.

El procedimiento de evaluación consistió en un reconocimiento general del tramo ubicando a grandes rasgos las áreas con mayor daño. Luego de este reconocimiento y de tener el recorrido grabado en el GPS como referencia del tramo, se procedió al registro digital de las fallas más serias vistas.

Una vez evaluado en campo y con la ayuda del GPS y la cámara digital podemos decir que el tramo evaluado consiste en un pavimento con superficie de rodadura de concreto asfáltico colocado en caliente de aproximadamente 6.5 km de longitud.

A continuación se describen e ilustran algunos de los daños encontrados en cada una de las pistas²³:

1. Pista derecha, monumento Al Caminero - puente Entrada Villanueva. Esta pista se caracterizó por evidenciar grandes áreas con grietas de piel de cocodrilo de mediana y gran severidad. Adicionalmente, presencia de baches de media severidad, fisuras transversales de baja severidad y ahuellamiento de media severidad en algunos puntos (ver ilustraciones 17 a 20).

²³ Debido al detalle en el que entra esta evaluación el presente trabajo sólo describirá algunos de los daños evidenciados.

Ilustración No. 17

Bache de 10 cm de diámetro y 3 cm de profundidad aproximadamente.

**Ilustración No. 18**

Grietas de piel de cocodrilo de alta severidad con desportillamiento de la carpeta asfáltica en áreas con parchado.



Ilustración No. 19

Frente a ingreso al Colegio Monte María, ahuellamiento de media severidad con grietas de piel de cocodrilo de media severidad

**Ilustración No. 20**

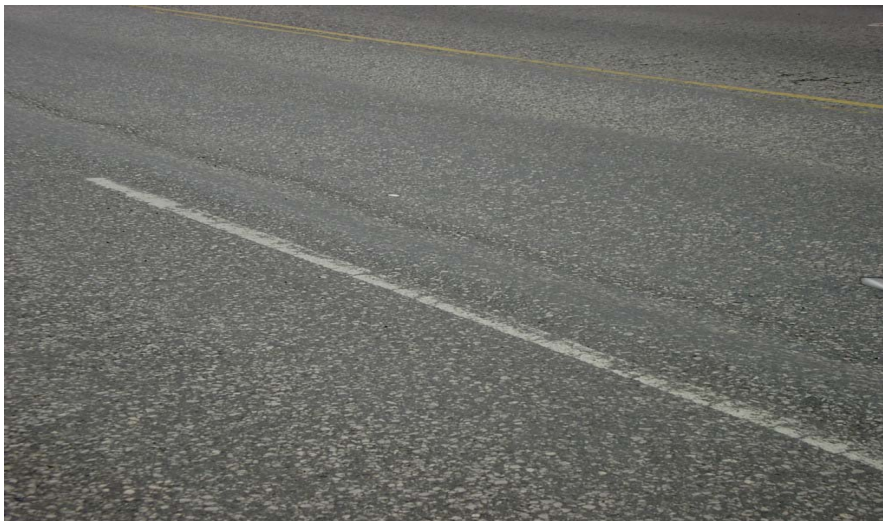
Área parchada con daño de alta severidad (estación 9+283).



2. Pista izquierda, entrada Puente Villanueva - monumento Al Caminero. Esta pista presentaba ahuellamiento y corrimiento de alta severidad en los dos carriles externos (3er y 4º carril) con huella de 4 a 7 cm de profundidad aproximadamente y formación de grietas longitudinales largas en el fondo de las huellas en aproximadamente un 70-80% de la longitud de la sección. Grietas de piel de cocodrilo de media severidad en los dos carriles internos como se muestra a continuación.

Ilustración No. 21

Ahuellamiento y corrimiento de alta severidad en el 3° y 4° carril.

**Ilustración No. 22**

Grietas de piel de cocodrilo de media severidad en el 1° y 2° carril.



Ilustración No. 23

Grietas de piel de cocodrilo y ahuellamiento de media severidad en el 2º carril.

**Ilustración No. 24**

Grietas de piel de cocodrilo y peladura de severidad media al final de la sección.



B. ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO EXISTENTE

Debido a que no existía ninguna información acerca de las capas que conforman la estructura del pavimento se realizaron varios sondeos o toma de muestras (calicatas). Estos sondeos permitirían conocer el material y por ende las propiedades de éste. A continuación se presentan dos cuadros con los resultados de los sondeos en donde, según la evaluación visual, existía algún tipo de falla.

Cuadro No. 4
Perforaciones en la pista derecha

Estación	Capa	Profundidad (cm)	Espesor de la capa (cm)	Descripción del material
9+278	Concreto asfáltico	10.0	10.0	
	Base triturada	45.0	35.0	Grava gruesa a fina con bastante arena y limo color café
	Sub-base	70.0	25.0	Arena limosa, pómez con arcilla color café claro
10+497	Concreto asfáltico	10.0	10.0	
	Base estabilizada	40.0	30.0	Suelo cemento
14+423	Concreto asfáltico	15.0	15.0	
	Base triturada	35.0	20.0	Grava arenosa gruesa a fina con limo color café amarillento
	Sub-base	92.0	57.0	Arena gravosa con pómez y limo color beige claro

Cuadro No. 5
Perforaciones en la pista izquierda

Estación	Capa	Profundidad (cm)	Espesor de la capa (cm)	Descripción del material
8+773	Concreto asfáltico	14.0	14.0	
	Base triturada	33.0	19.0	Grava arenosa, gruesa a fina con limo color café
	Sub-base	66.0	33.0	Arena gravosa con pómez y limo color beige claro
12+013	Concreto asfáltico	14.0	14.0	
	Base triturada	33.0	19.0	Base estabilizada con emulsión
	Sub-base	64.0	31.0	Arena gravosa con pómez y limo color beige
14+196	Concreto asfáltico	16.0	16.0	
	Base triturada	37.0	21.0	Grava arenosa gruesa a fina con limo color café claro
	Sub-base	62.0	55.0	Arena gravosa con pómez y limo color beige

C. CARGAS DE TRÁNSITO

Las cargas de tránsito sirven como base para establecer el espesor de refuerzo requerido para cierto periodo de diseño. En Guatemala, la Unidad Ejecutora de Conservación Vial (COVIAL) requiere que el periodo de diseño sea de 20 años.

En este caso, bajo el periodo de diseño de 20 años, la empresa Ingeniería y Arquitectura TEKTON suministró el dato de 86,409,381 ejes de carga equivalente en una dirección para el pavimento flexible calculado según AASHTO 1993.

D. MEDICIÓN DE DEFLEXIONES Y TEMPERATURAS

La medición de deflexiones en el pavimento se realizó con un deflectómetro por impacto de un peso (Falling Weight Deflectometer, FWD), modelo FWD 8002 marca Dynatest²⁴, con sensores automáticos para medir la temperatura ambiente (Dynatest modelo 86231) y de la superficie del pavimento (Raytek modelo LT IR), así como 7 geófonos para medición de las deflexiones, de manera que se defina completamente la curva de deflexión. El espaciamiento entre geófonos es de 0, 300, 600, 900, 1200, 1500 y 1800 mm medidos a partir del centro del plato de carga cuyo diámetro es de 300 mm.

Las mediciones se realizaron utilizando una secuencia de cuatro impactos por punto de evaluación (para verificación de la relación carga – deformación) y una distancia de 100 metros entre puntos. Es decir que se efectuaron 10 a 11 ensayos por kilómetro por carril, como se puede observar en las representaciones gráficas.

Simultáneamente a la ejecución de cada ensayo de deflexión, la temperatura ambiente y la temperatura de la superficie del pavimento, fueron medidas en forma automática por medio de los sensores, los cuales transmiten directamente las lecturas a la computadora del sistema.

E. PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DEFLEXIONES

Los resultados de la medición de deflexiones fueron analizados con el programa ELMOD²⁵, que utiliza el procedimiento Odemark - Boussinesq para el retrocálculo de los módulos de las distintas capas que conforman la estructura del pavimento. A través de este análisis y el posterior procesamiento de los módulos resultantes con el programa CM-FWD, se obtuvo también el número estructural efectivo (SN_{ef}) del pavimento y el módulo equivalente del pavimento (E_p) por el método contenido en la *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, edición 1993.

²⁴ El equipo utilizado para la medición es el mismo que se muestra en la Ilustración No. 13 de este trabajo.

²⁵ **E**valuation of **L**ayer **M**oduli and **O**verlay **D**esign por sus siglas en inglés.

Los resultados del procesamiento indicado con el programa CM-FWD, se presentan por medio de tablas y gráficas en las que se indica las secciones homogéneas correspondientes²⁶ y los cálculos estadísticos de valor promedio, desviación estándar y percentil. Los resultados obtenidos se resumen a continuación para cada uno de los siguientes parámetros:

- **Deflexión máxima o deflexión central (d_0), en micrones (1/1000 mm).** Este valor se obtiene directamente de la medición de campo.
- **El número estructural efectivo del pavimento (SN_{ef}),** representa la capacidad de una estructura para soportar las cargas de tránsito requeridas en el momento de la medición y se determina mediante la suposición de que la capacidad estructural del pavimento está en función del espesor total de todas las capas por encima de la subrasante y la rigidez de estas.
- **El módulo equivalente del pavimento (E_p), en kg/cm^2 .** Este valor es determinado a partir del módulo de resiliencia de la subrasante, el espesor total de todas las capas por encima de la subrasante y la deflexión máxima.

1. Resumen estadístico para la pista derecha

a. Primer carril

Cuadro No. 6
DEFLEXIÓN MÁXIMA en micrones (1/1000 mm)

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv Est	Prom + Desv Est	Percentil 85
8.500	15.150	6.650	435.46	291.34	726.80	795.35
8.50	10.10	1.600	735.71	275.27	1010.98	1007.00
10.10	11.00	0.898	168.88	63.02	231.90	242.00
11.00	11.70	0.702	535.14	207.73	742.87	809.00
11.70	12.55	0.850	252.22	97.97	350.19	374.00
12.55	13.70	1.150	420.00	347.48	767.48	865.00
13.70	15.15	1.450	365.88	131.55	497.43	396.00

Cuadro No. 7
NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO DEL PAVIMENTO

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv Est	Prom - Desv Est	Percentil 15
8.500	15.150	6.650	6.25	1.53	4.72	4.44
8.50	10.10	1.600	4.79	0.89	3.90	4.03

²⁶ Obtenidas a través del procedimiento de diferencias acumuladas contenido en el Apéndice J del *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, edición 1993 y por medio del programa CM-FWD)

Continúa Cuadro No. 7.

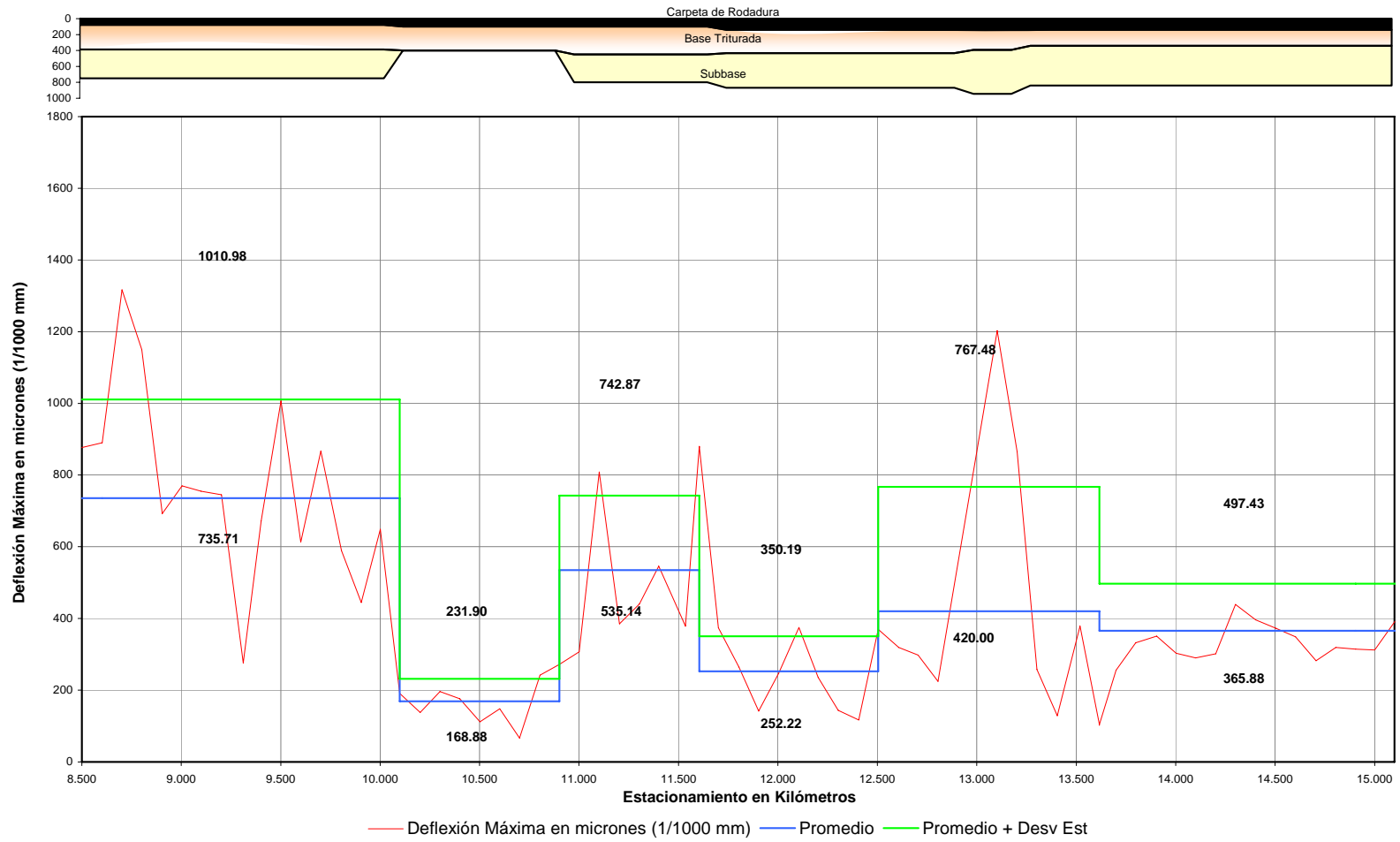
10.10	11.00	0.898	5.52	1.03	4.49	4.43
11.00	11.70	0.702	5.70	0.78	4.92	4.54
11.70	12.55	0.850	7.91	1.05	6.86	6.85
12.55	13.30	0.750	6.55	1.37	5.18	4.60
13.30	15.15	1.850	7.23	0.96	6.27	6.52

Cuadro No. 8

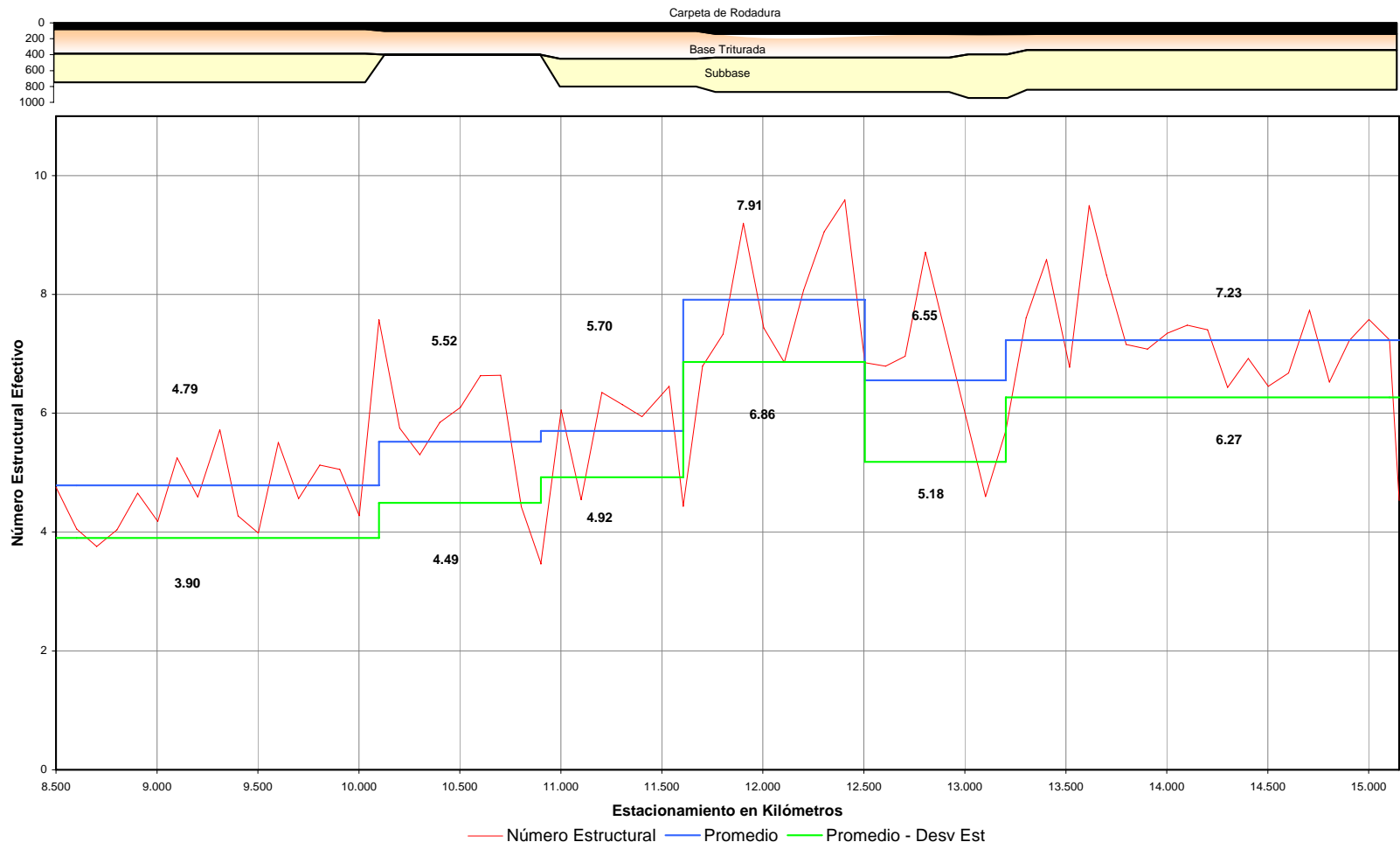
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (kg/cm²)

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv Est	Prom - Desv Est	Percentil 15
8.500	15.150	6.650	10339.63	11643.22	1303.59	2928.01
8.50	10.10	1.600	4087.10	2893.63	1193.47	2199.66
10.10	11.00	0.898	36584.08	16621.89	19962.19	17178.03
11.00	11.80	0.802	4990.46	1642.00	3348.46	2322.49
11.80	12.55	0.750	10529.02	4007.87	6521.15	6203.12
12.55	13.90	1.350	8613.41	4621.11	3992.30	2792.96
13.90	15.15	1.250	7275.13	1965.25	5309.88	5739.19

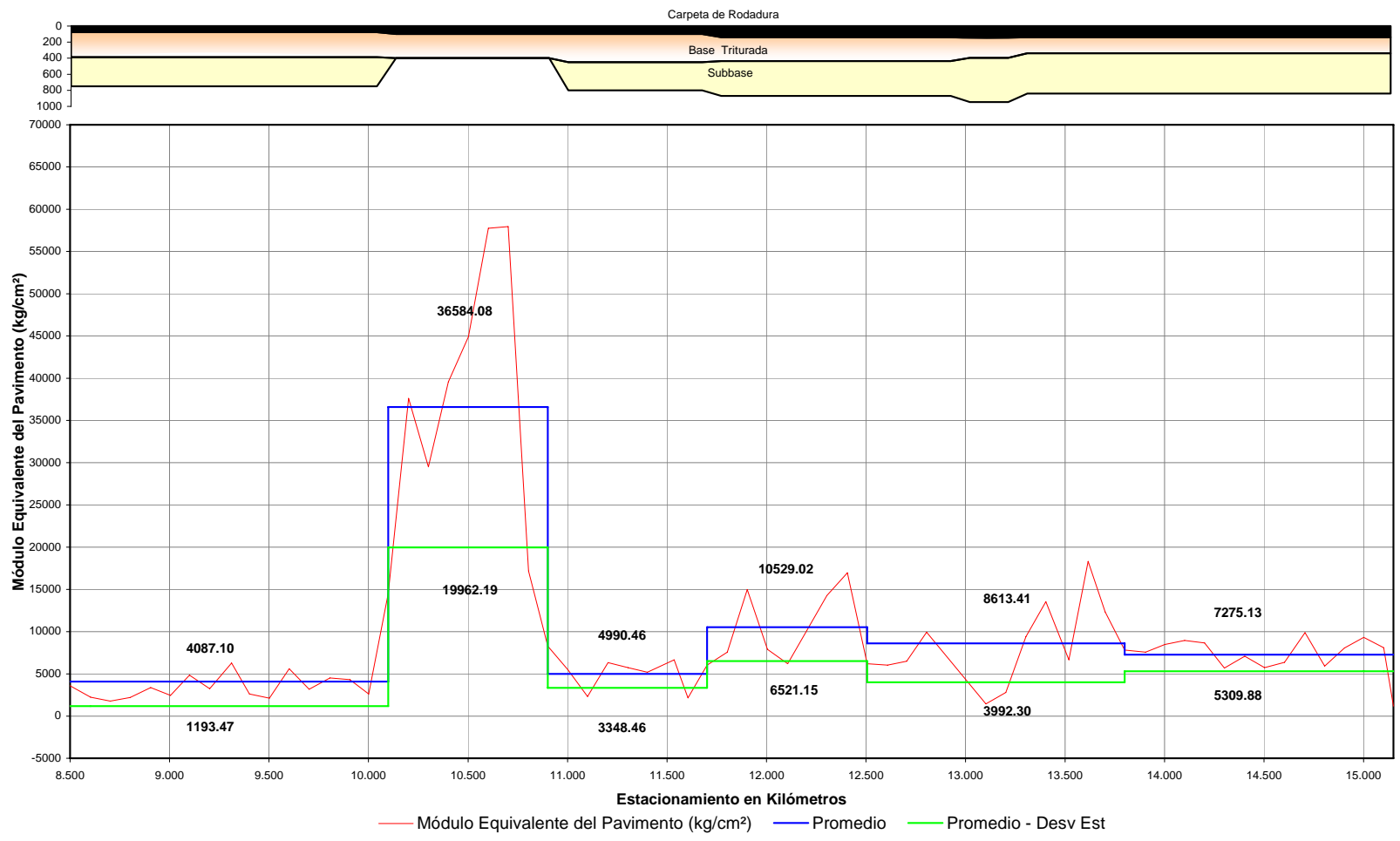
Gráfica No. 5
DEFLEXIÓN MÁXIMA (d_0)
Pista derecha primer carril



Gráfica No. 6
NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (SN_{ef})
Pista derecha primer carril



Gráfica No. 7
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (E_p)
Pista derecha primer carril



b. Segundo carril

Cuadro No. 9
DEFLEXIÓN MÁXIMA en micrones (1/1000 mm)

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv Est	Prom + Desv Est	Percentil 85
8.500	15.150	6.650	601.87	378.97	980.84	1055.30
8.50	10.01	1.510	1018.44	226.16	1244.60	1223.00
10.01	11.00	0.988	332.20	232.66	564.86	718.00
11.00	11.60	0.602	887.83	218.75	1106.58	1124.00
11.60	12.55	0.950	259.90	137.26	397.16	459.00
12.55	13.31	0.760	649.17	462.99	1112.16	1591.00
13.31	15.15	1.840	467.74	221.97	689.71	585.00

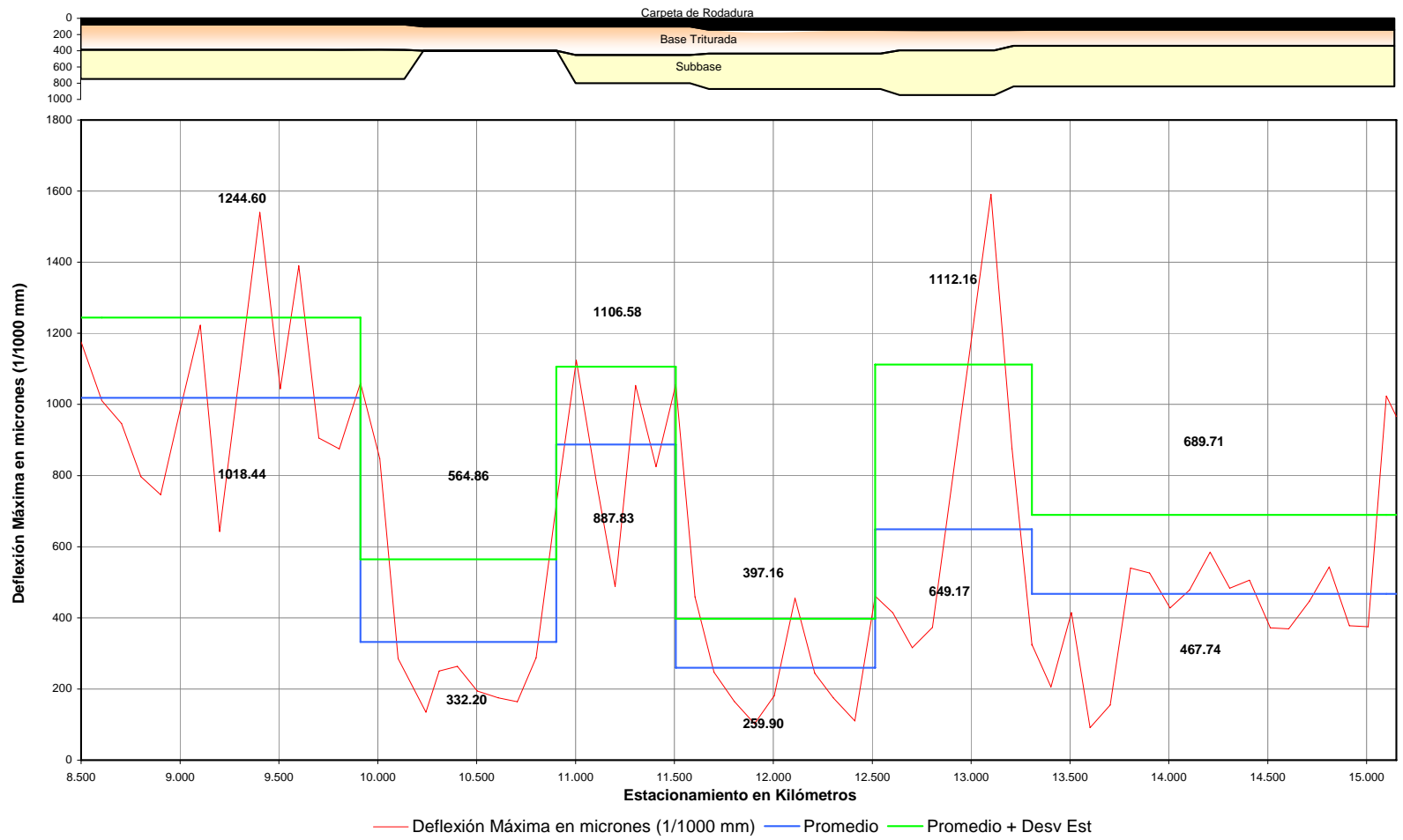
Cuadro No. 10
NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO DEL PAVIMENTO

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv Est	Prom - Desv Est	Percentil 15
8.500	15.150	6.650	5.70	1.75	3.95	3.92
8.50	10.01	1.510	4.06	0.44	3.62	3.73
10.01	11.00	0.988	5.17	1.27	3.90	3.93
11.00	11.70	0.702	5.24	1.42	3.82	3.91
11.70	12.55	0.850	8.09	1.17	6.92	6.61
12.55	13.21	0.660	6.14	1.14	5.00	4.27
13.21	15.15	1.940	6.44	1.38	5.06	5.68

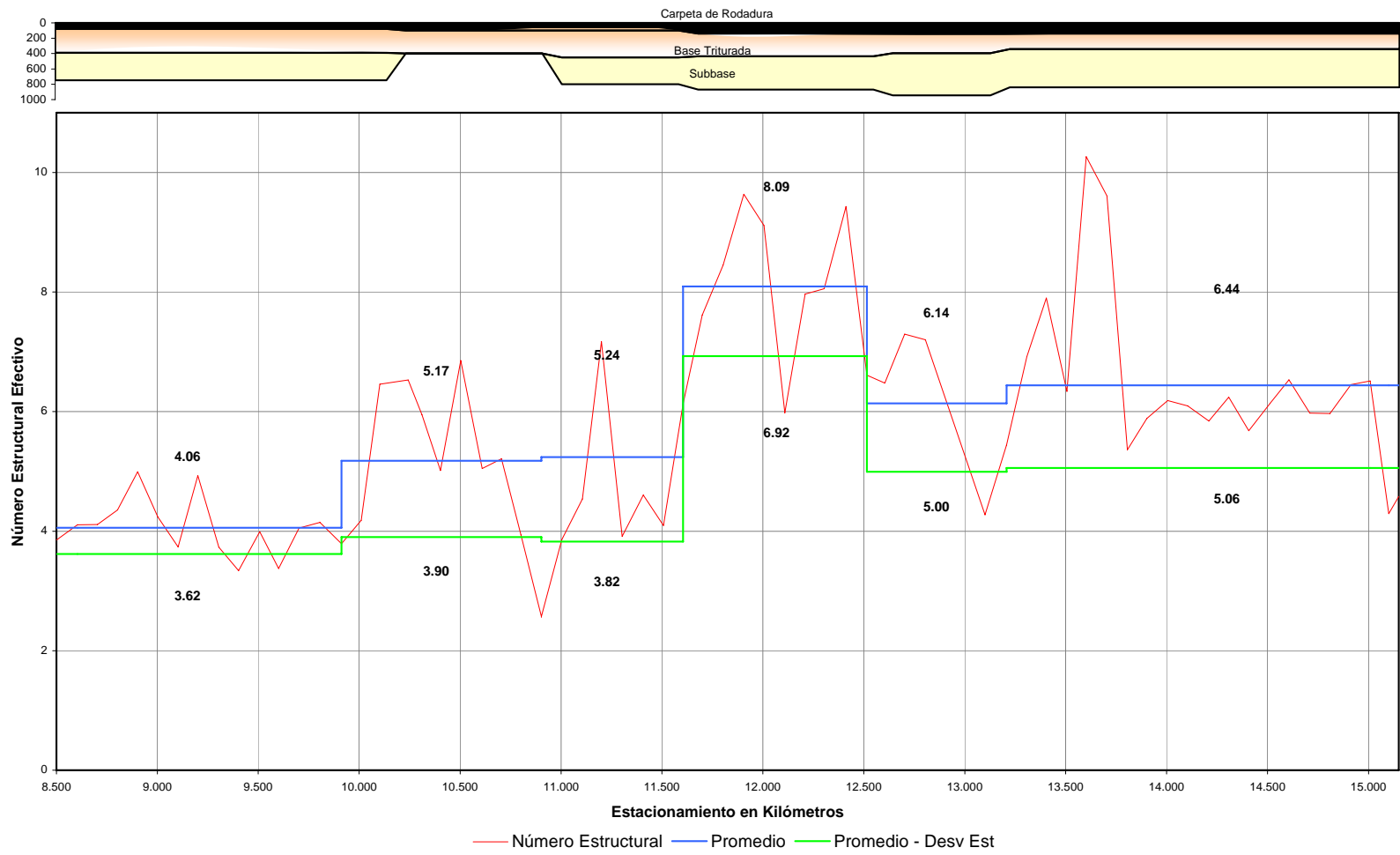
Cuadro No. 11
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (kg/cm²)

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv Est	Prom - Desv Est	Percentil 15
8.500	15.150	6.650	8347.53	11550.82	-3203.29	1794.45
8.50	10.10	1.600	2092.71	710.11	1382.60	1571.42
10.10	11.00	0.898	29156.42	19582.35	9574.07	8153.04
11.00	11.70	0.702	3921.08	2963.29	957.79	1484.67
11.70	12.55	0.850	10693.81	4445.95	6247.86	4335.36
12.55	13.51	0.960	5400.32	2572.70	2827.62	3445.11
13.51	15.15	1.640	6375.42	5520.30	855.12	3299.39

Gráfica No. 8
DEFLEXIÓN MÁXIMA (d_0)
Pista derecha segundo carril

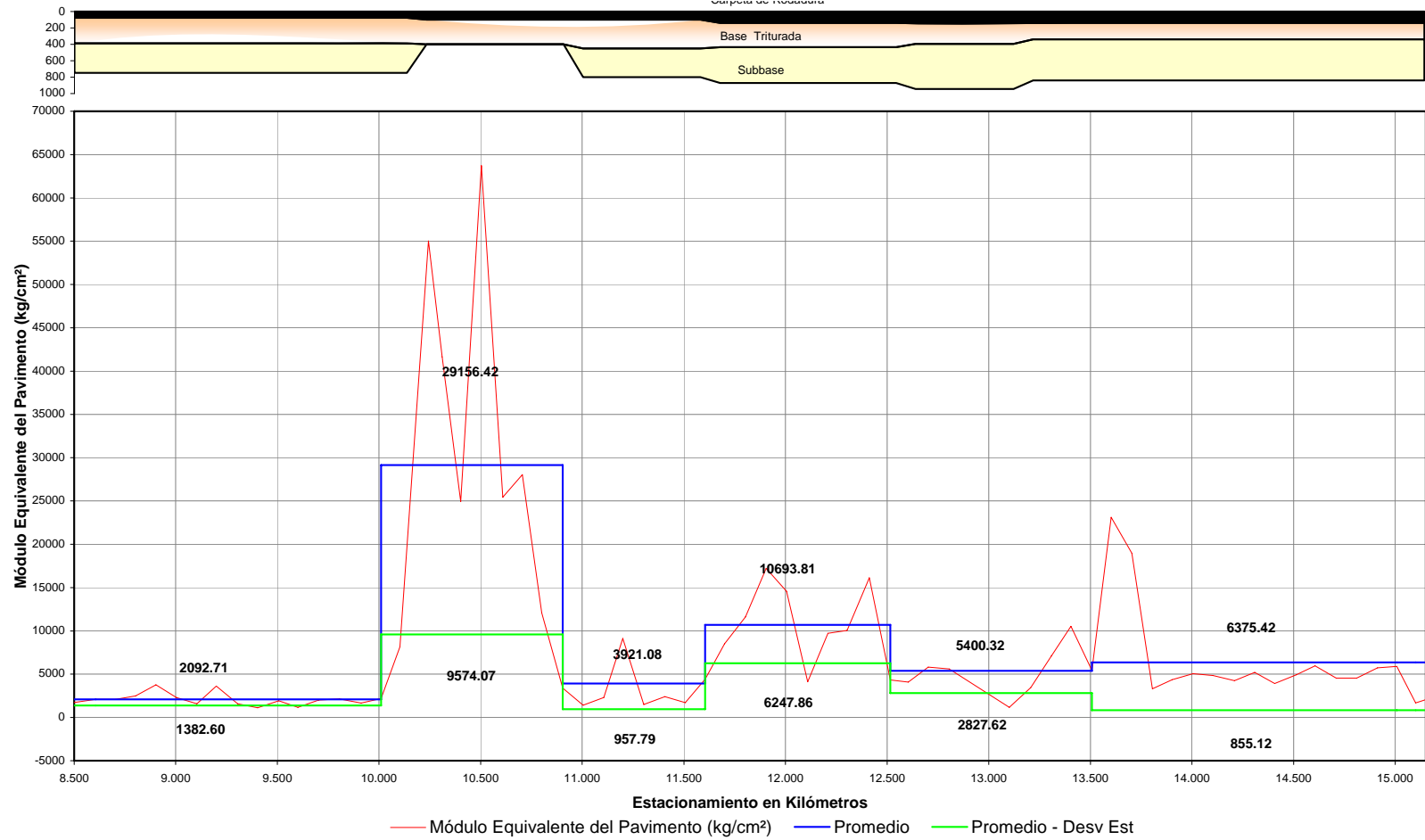


Gráfica No. 9
NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (SN_{ef})
Pista derecha segundo carril



Gráfica No. 10
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (E_p)

Pista derecha segundo carril



2. Resumen estadístico para la pista izquierda

a. Primer carril

Cuadro No. 12
DEFLEXIÓN MÁXIMA en micrones (1/1000 mm)

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv Est	Prom + Desv Est	Percentil 85
8.500	15.150	6.650	437.07	255.93	693.00	689.00
8.500	10.000	1.500	782.80	276.68	1059.48	1071.00
10.000	11.100	1.100	212.25	127.85	340.10	349.00
11.100	12.800	1.700	338.35	79.91	418.26	424.00
12.800	15.150	2.350	402.17	130.17	532.34	541.00

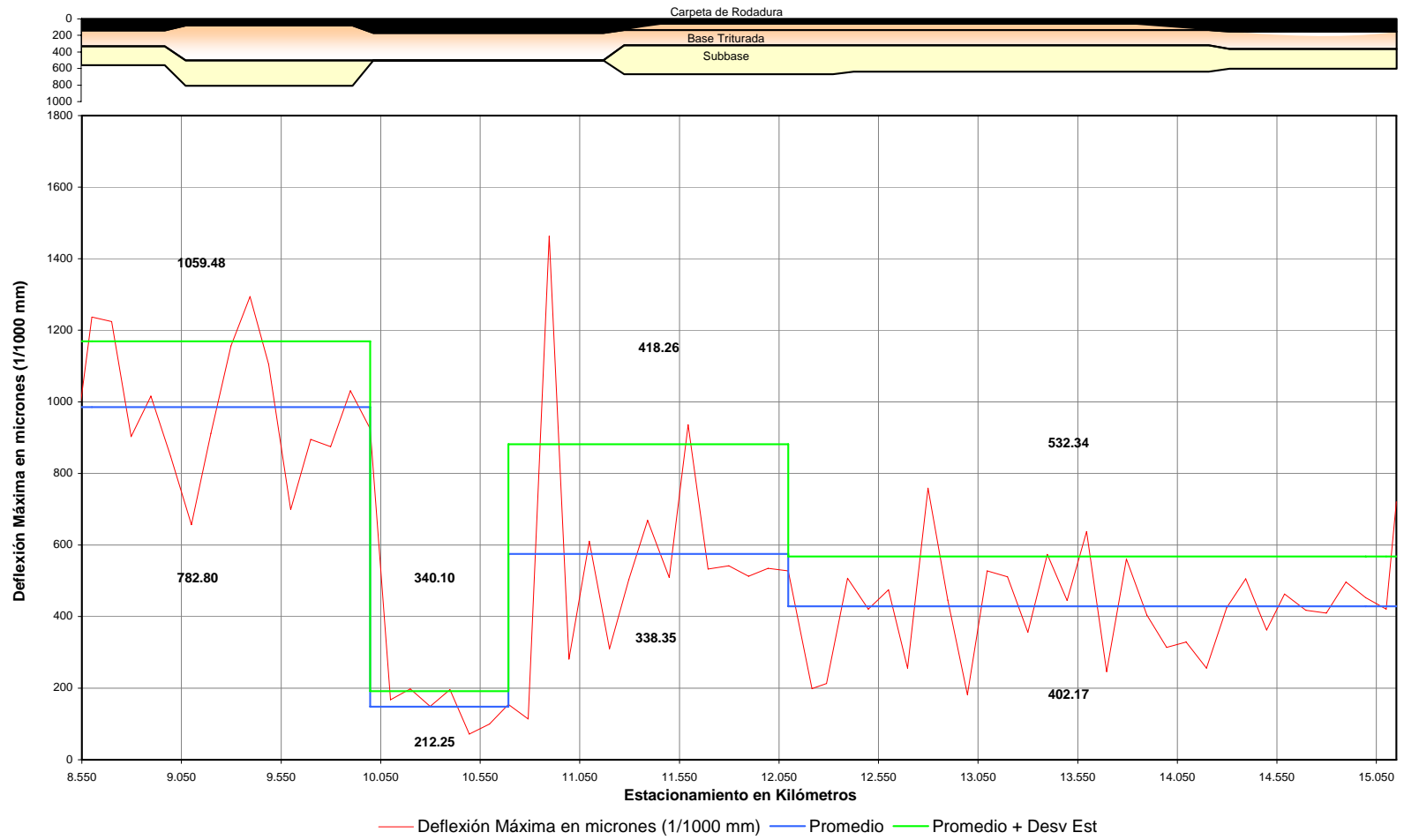
Cuadro No. 13
NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO DEL PAVIMENTO

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv Est	Prom - Desv Est	Percentil 15
8.500	15.150	6.650	5.33	1.10	4.23	3.97
8.500	9.100	0.600	3.57	0.30	3.27	3.27
9.100	10.100	1.000	5.39	1.18	4.21	3.97
10.100	10.900	0.800	6.66	1.47	5.19	5.22
10.900	12.700	1.800	5.49	0.46	5.03	4.86
12.700	13.790	1.090	5.10	0.66	4.44	4.49
13.790	15.150	1.360	5.34	0.50	4.84	4.95

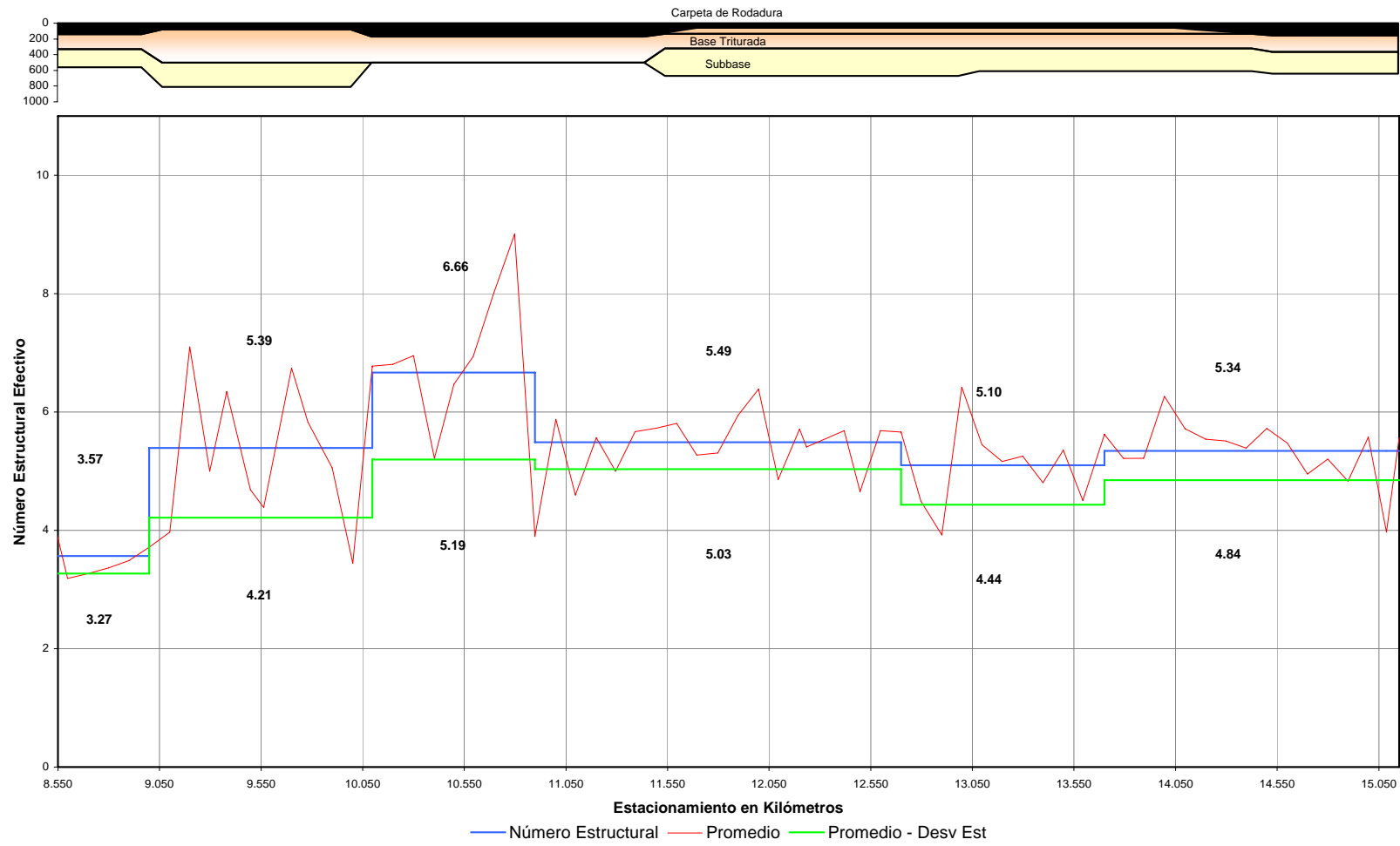
Cuadro No. 14
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (kg/cm²)

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv Est	Prom - Desv Est	Percentil 15
8.500	15.150	6.650	10231.64	11779.51	-1547.87	3183.80
8.500	10.000	1.500	3834.77	1968.80	1865.97	2338.43
10.000	11.000	1.000	29996.47	19182.09	10814.38	6044.94
11.000	15.150	4.150	7911.45	2910.94	5000.51	5259.43

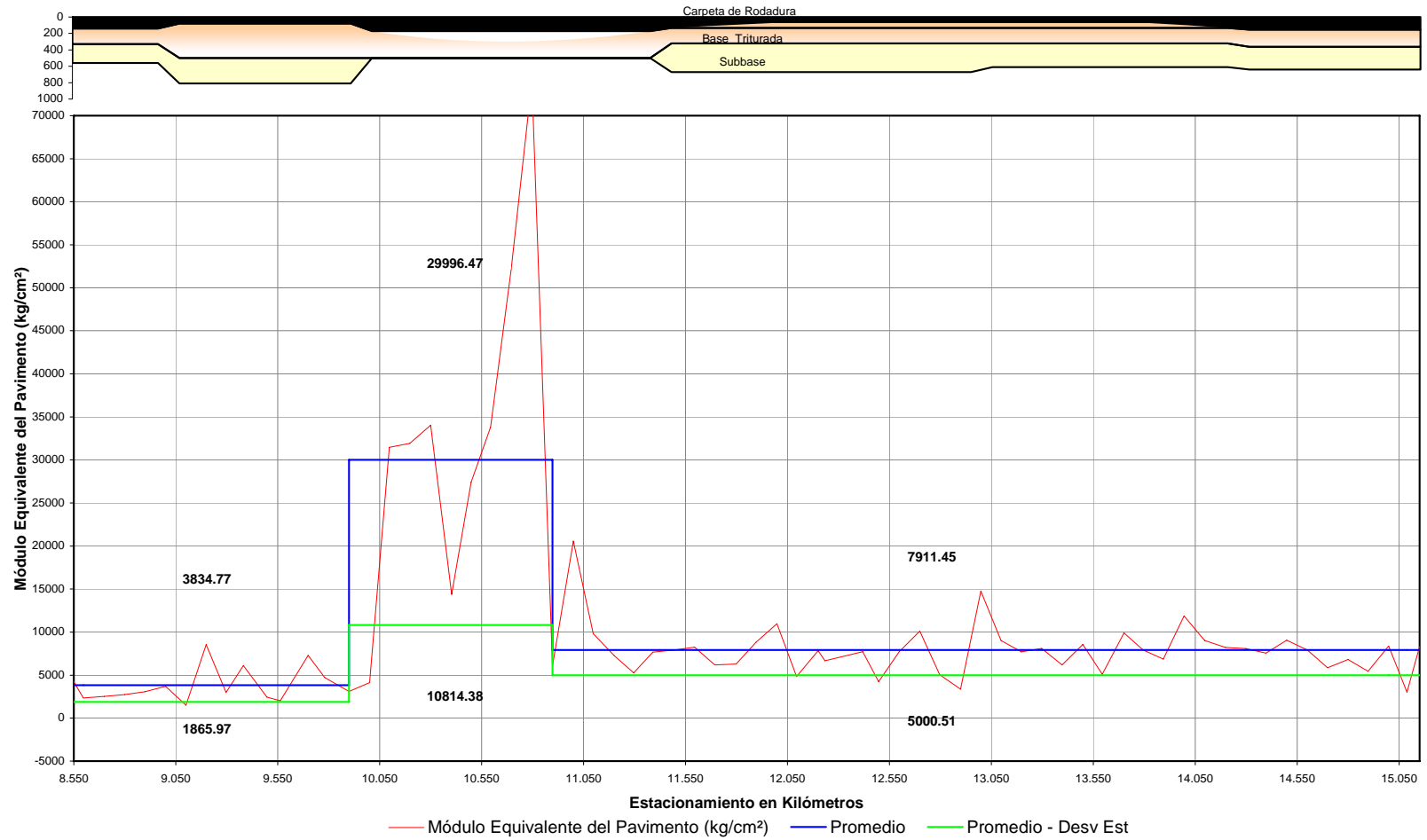
Gráfica No. 11
DEFLEXIÓN MÁXIMA (d_0)
Pista izquierda primer carril



Gráfica No. 12
NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (SN_{ef})
Pista izquierda primer carril



Gráfica No. 13
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (E_p)
Pista izquierda primer carril



b. Segundo carril

Cuadro No. 15
DEFLEXIÓN MÁXIMA en micrones (1/1000 mm)

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv Est	Prom + Desv Est	Percentil 85
8.500	15.150	6.650	559.63	323.74	883.37	925.00
8.500	10.000	1.500	985.13	183.82	1168.95	1224.00
10.000	10.790	0.790	148.29	43.64	191.93	196.00
10.790	12.100	1.310	574.86	306.84	881.70	669.00
12.100	15.150	3.050	428.94	139.34	568.28	561.00

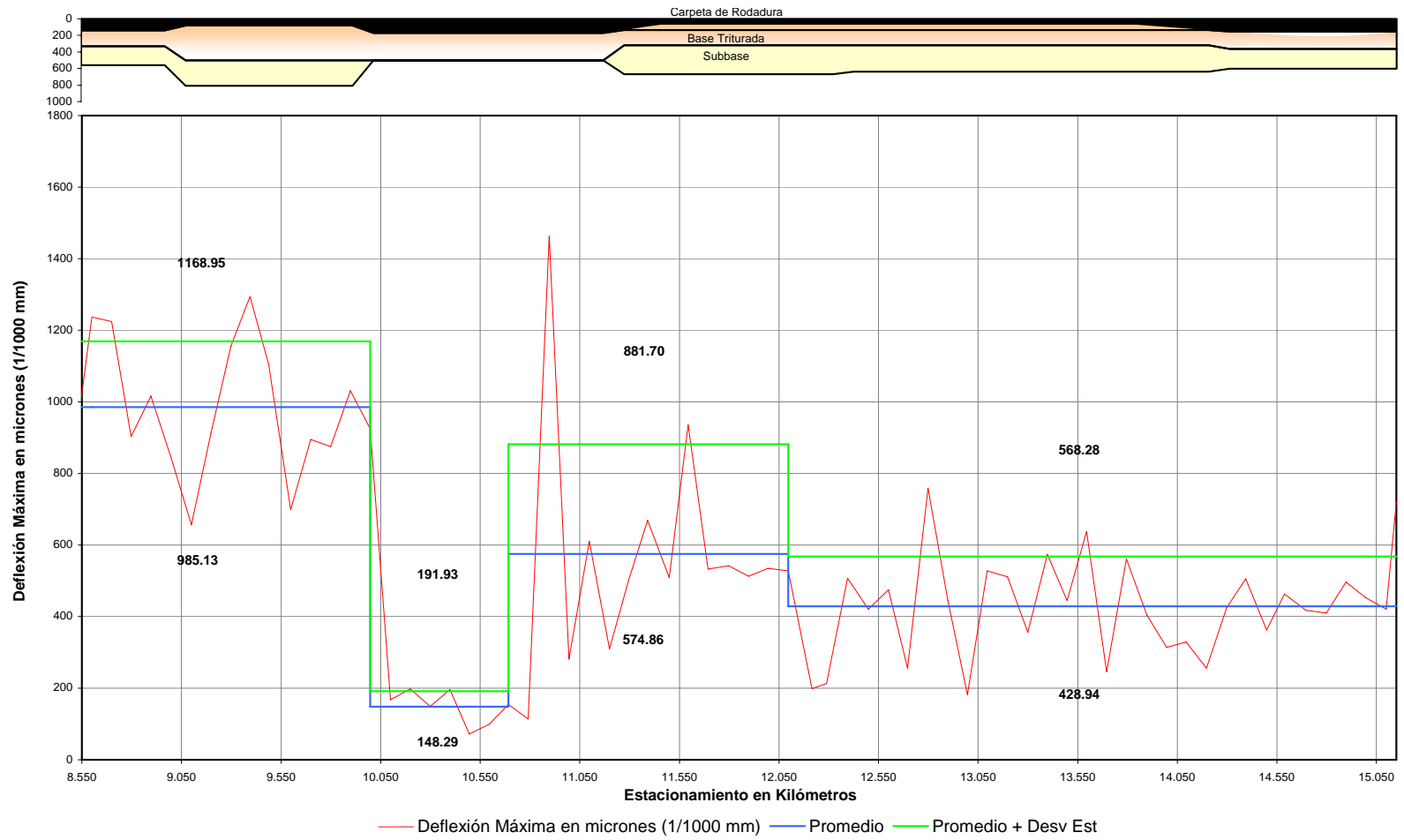
Cuadro No. 16
NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO DEL PAVIMENTO

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv Est	Prom - Desv Est	Percentil 15
8.500	15.150	6.650	5.16	1.35	3.81	4.01
8.500	10.100	1.600	4.02	0.90	3.12	3.17
10.100	10.790	0.690	6.76	0.92	5.84	5.74
10.790	11.900	1.110	4.63	1.11	3.52	3.61
11.900	15.150	3.250	5.24	0.64	4.60	4.68

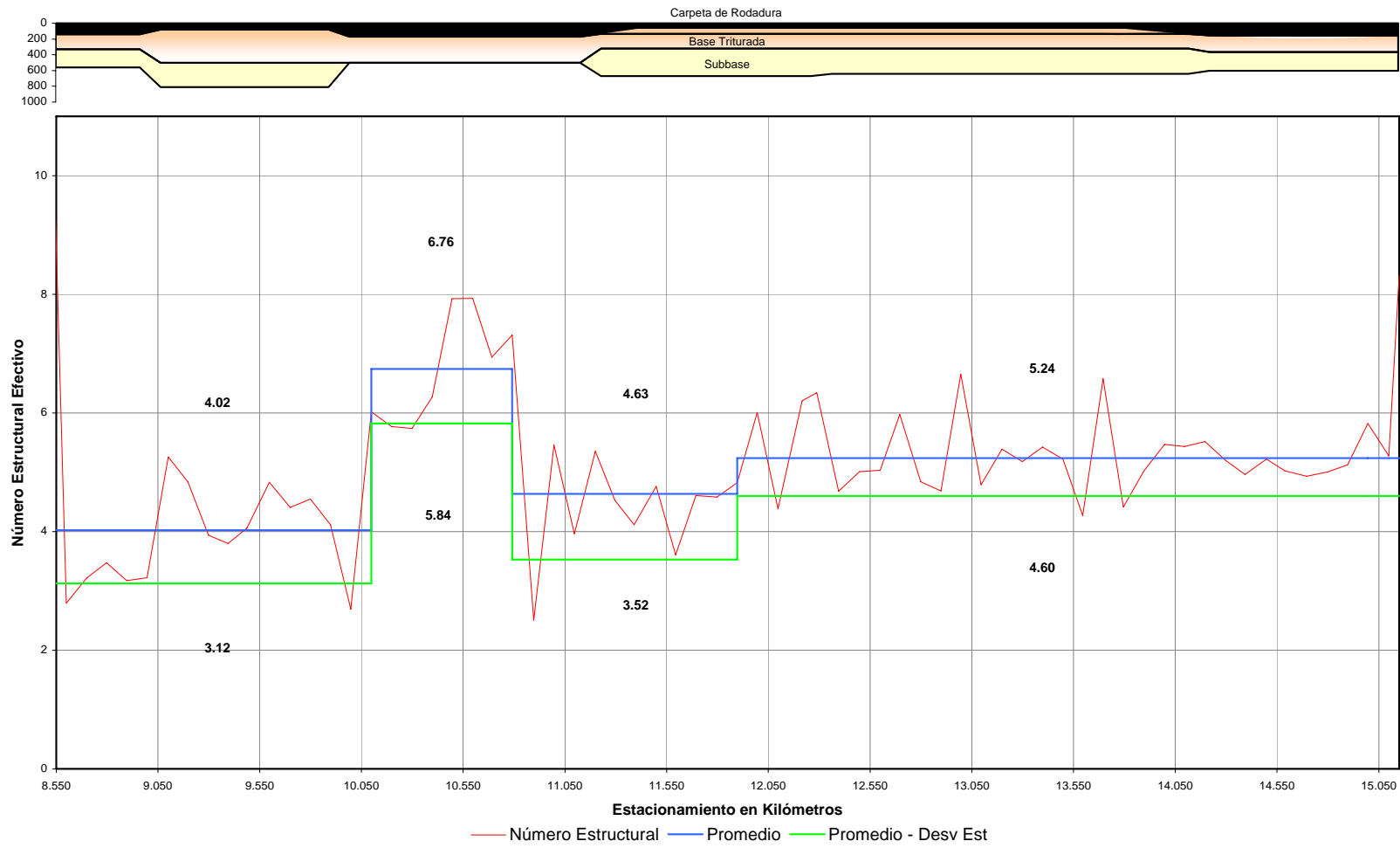
Cuadro No. 17
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (kg/cm²)

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv Est	Prom - Desv Est	Percentil 15
8.500	15.150	6.650	8590.51	10106.16	-1515.65	2110.92
8.500	10.000	1.500	2188.08	596.30	1591.78	1570.30
10.000	10.900	0.900	29077.02	15140.49	13936.53	19140.52
10.900	12.100	1.200	4613.10	1912.64	2700.46	2614.44
12.100	15.150	3.050	7867.12	2682.04	5185.08	4968.61

Gráfica No. 14
DEFLEXIÓN MÁXIMA (d_0)
Pista izquierda segundo carril

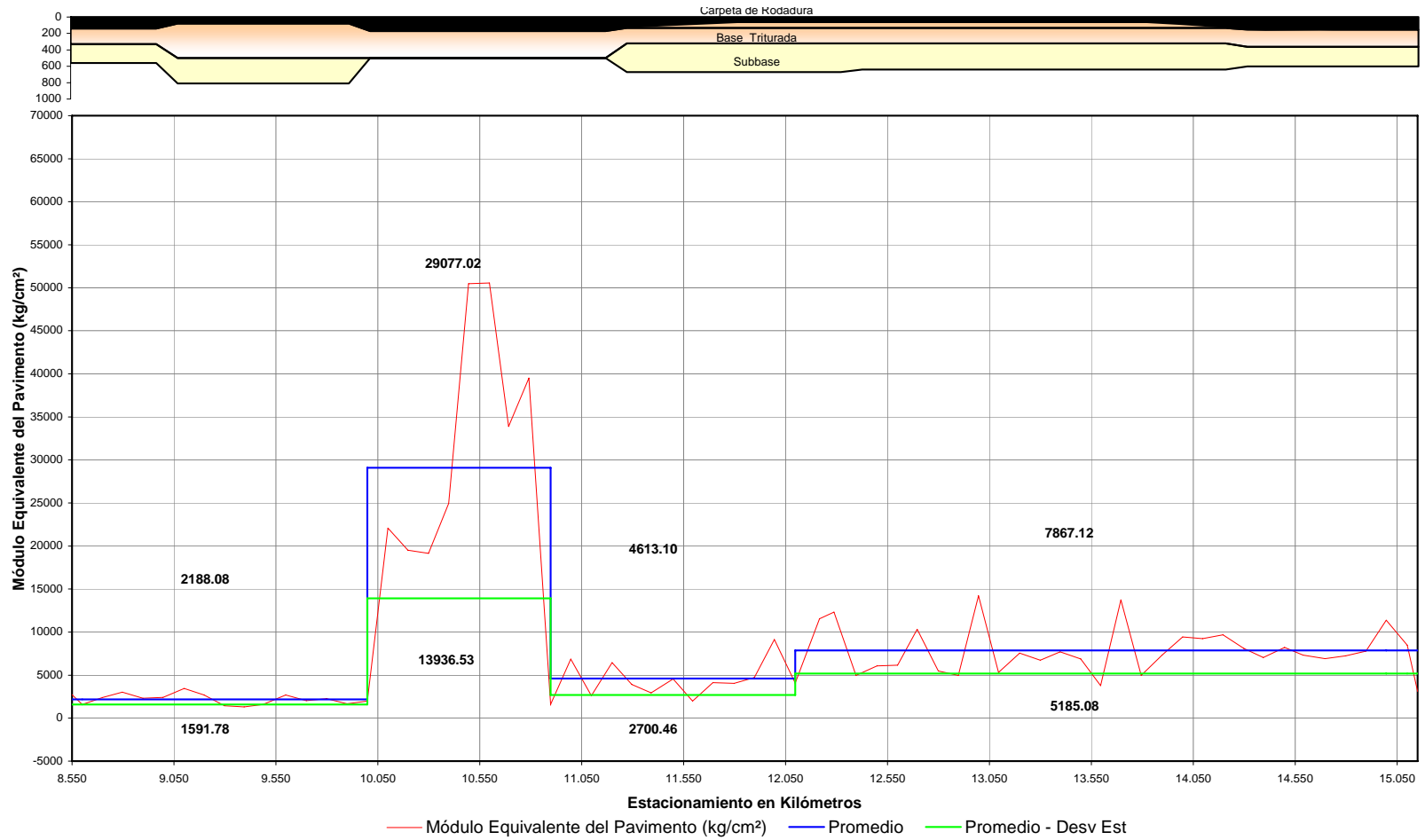


Gráfica No. 15
NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (SN_{ef})
Pista izquierda segundo carril



Gráfica No. 16
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (E_p)

Pista izquierda segundo carril



**IV. EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO DEL
PROYECTO CA-9 SUR, TRAMO: MONUMENTO AL CAMINERO –
ENTRADA PUENTE VILLA NUEVA DESPUÉS DE SU
REHABILITACIÓN**

El tramo evaluado inicia en el Monumento al Caminero (estación 8+500) y finaliza en la entrada al paso elevado del primer ingreso a Villanueva (estación 11+050) y consiste en un pavimento con superficie de rodadura rehabilitada bajo las siguientes características:

Cuadro No. 18

ESPEORES DE FRESADO Y DE RECAPEO

PISTA	TRAMO	ESTACIÓN		FRESADO (cm)	RECAPEO (cm)
		DE	A		
DERECHA	1A	8+500	10+040	5.0	27.0
	1B	10+040	10+825	5.0	14.0
	1C	10+825	11+100	5.0	24.0
IZQUIERDA	1A	8+500	9+100	5.0	30.0
		9+100	10+000	5.0	27.0
	1B	10+040	10+300	5.0	14.0
		10+300	10+600	Trabajo especial por puentes CENMA 1 y CENMA 2	
	1C	10+825	11+100	5.0	18.0

Las características para esta evaluación fueron las mismas que para la medición antes de la rehabilitación y se describen en los incisos A. al E. de la sección anterior. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

1. Resumen estadístico para la pista derecha

a. Primer carril

Cuadro No. 19

DEFLEXIÓN MÁXIMA, D_0 , en micrones (1/1000 mm)

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv. Est.	Prom + Desv. Est.	Percentil 85
8.500	11.050	2.550	237.7	71.3	309.0	316.20
8.500	9.000	0.500	305.0	28.2	333.2	350.30
9.000	9.400	0.400	208.3	16.4	224.7	228.00
9.400	9.900	0.500	314.8	22.5	337.3	351.00
9.900	10.410	0.510	214.6	31.2	245.9	259.20
10.410	10.910	0.500	155.6	74.4	229.9	291.00
10.910	11.050	0.140	210.1	32.1	242.1	242.10

Cuadro No. 20

NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO DEL PAVIMENTO, SN_{eff}

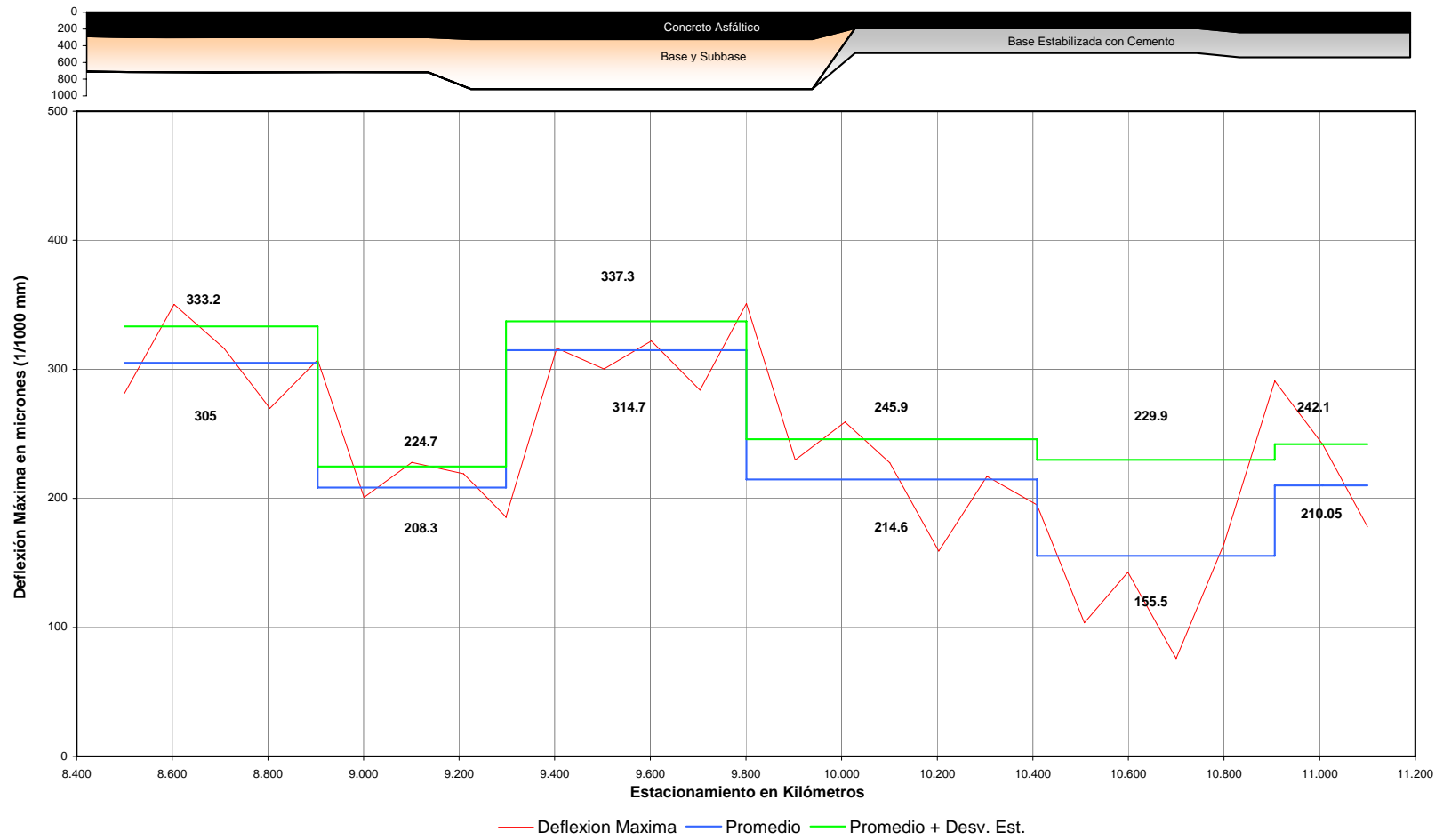
de	a	Longitud	Promedio	Desv. Est.	Prom - Desv. Est.	Percentil 15
8.500	11.050	2.550	6.6	1.2	5.5	5.07
8.500	8.710	0.210	6.6	0.5	6.1	5.97
8.710	9.210	0.500	7.1	0.4	6.8	6.63
9.210	10.010	0.800	7.5	1.1	6.4	7.13
10.010	10.410	0.400	5.1	0.2	4.9	4.87
10.410	10.800	0.390	6.4	0.5	5.9	5.55
10.800	11.050	0.250	5.8	0.8	5.0	4.89

Cuadro No. 21

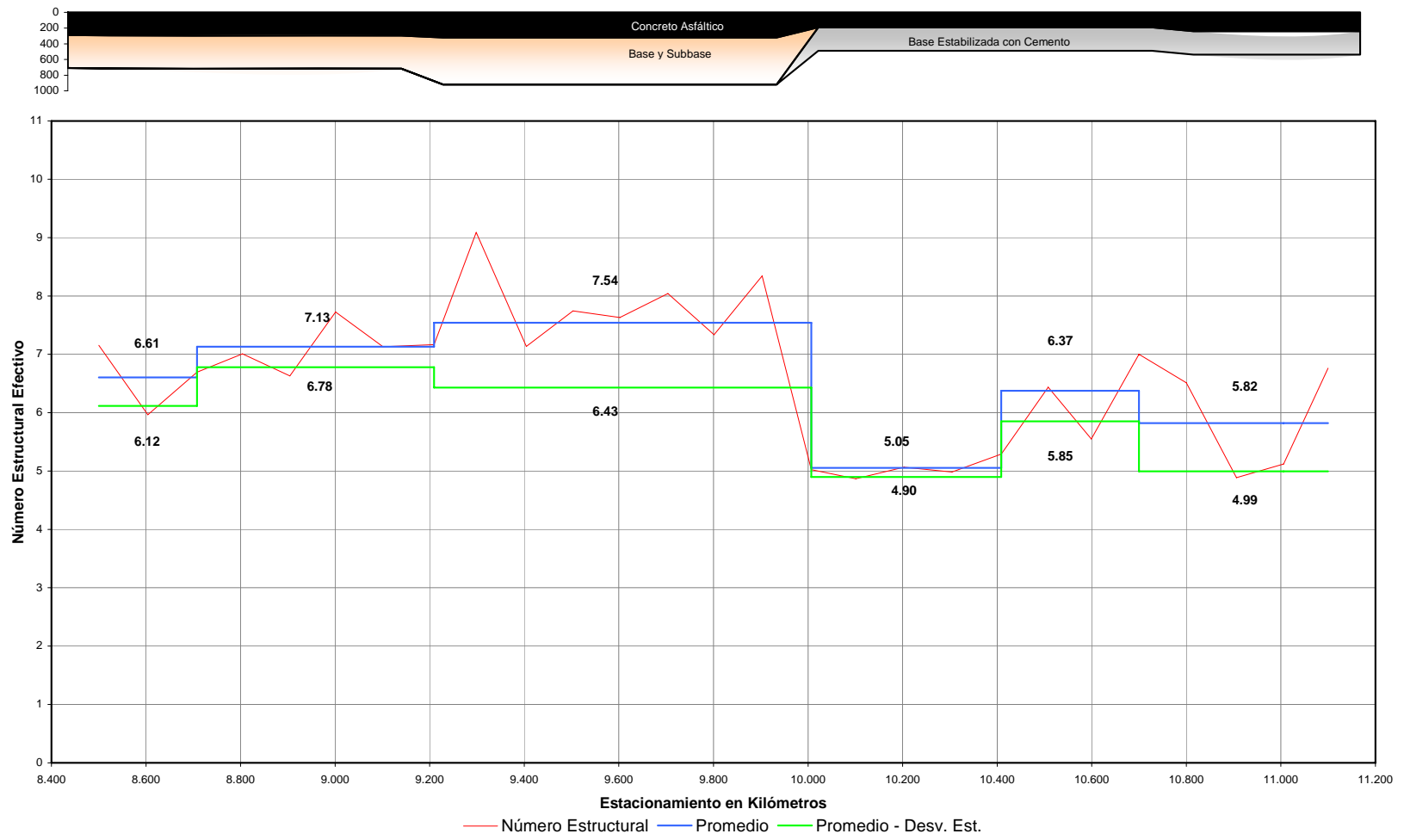
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO, E_p (kg/cm²)

de	a	Longitud	Promedio	Desv. Est.	Prom - Desv. Est.	Percentil 15
8.500	11.050	2.550	13145.2	6713.3	6431.8	7271.78
8.500	9.000	0.500	10369.2	1815.5	8553.7	7271.78
9.000	9.300	0.300	13254.5	1457.2	11797.3	12224.35
9.300	9.900	0.600	7115.6	890.0	6225.6	5907.49
9.900	10.410	0.510	13137.2	1959.4	11177.8	9449.78
10.410	10.910	0.500	21656.9	10228.7	11428.2	7202.91
10.910	11.050	0.140	13684.9	5411.5	8273.4	8273.41

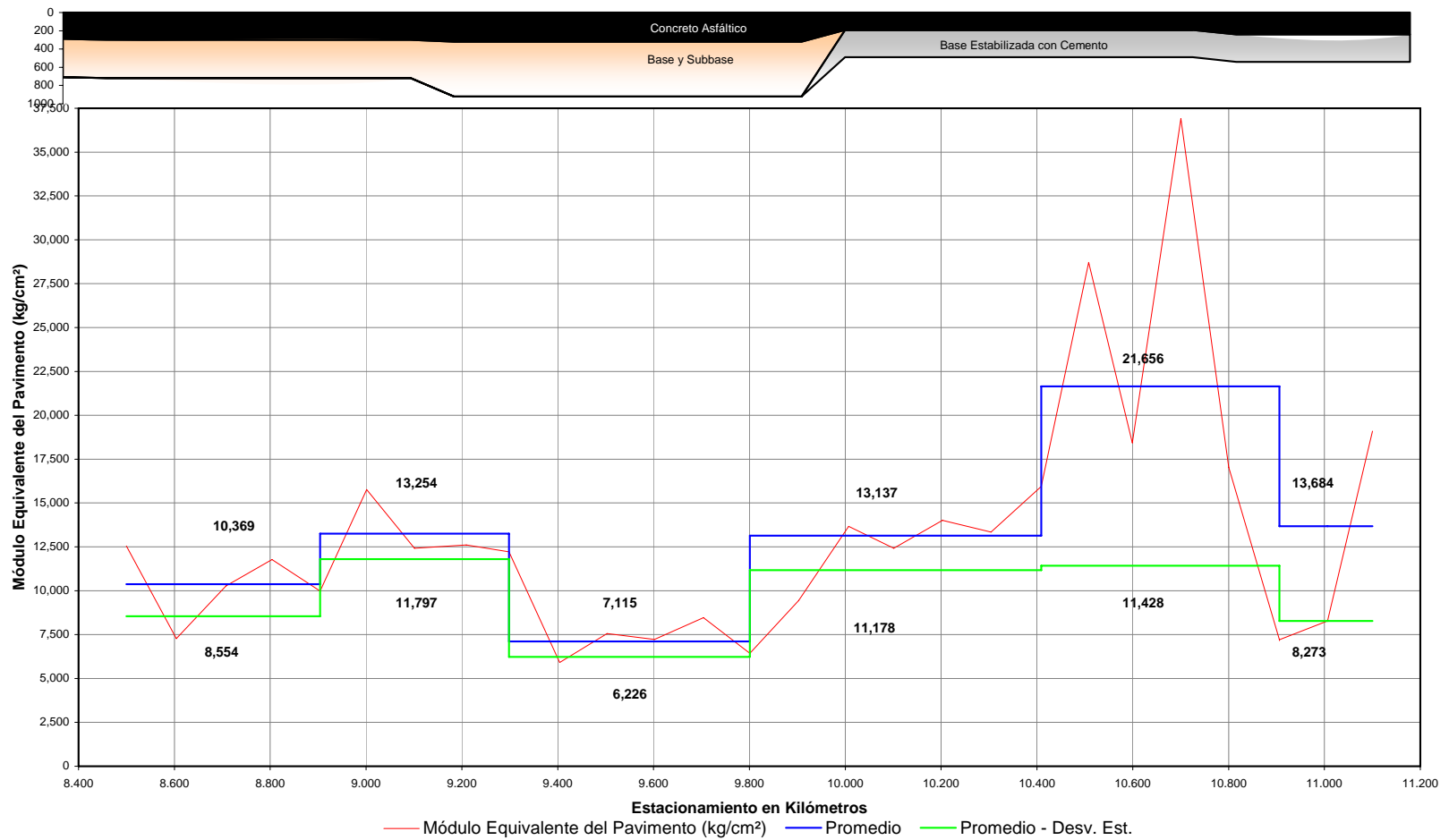
Gráfica No. 17
DEFLEXIÓN MÁXIMA (d_0)
Pista derecha primer carril



Gráfica No. 18
NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (SN_{ef})
Pista derecha primer carril



Gráfica No. 19
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (E_p)
Pista derecha primer carril



b. Segundo carril

Cuadro No. 22

DEFLEXIÓN MÁXIMA, D_0 , en micrones (1/1000 mm)

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv. Est.	Prom + Desv. Est.	Percentil 85
8.550	11.050	2.500	264.4	81.0	345.4	367.00
8.550	8.750	0.200	335.1	39.5	374.5	374.50
8.750	9.350	0.600	269.3	26.7	296.0	320.20
9.350	9.860	0.510	341.6	39.7	381.3	400.50
9.860	10.150	0.290	252.0	9.2	261.2	261.20
10.150	10.950	0.800	167.5	32.6	200.1	204.50
10.950	11.050	0.100	319.9	83.7	403.7	384.60

Cuadro No. 23

NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO DEL PAVIMENTO, SN_{eff}

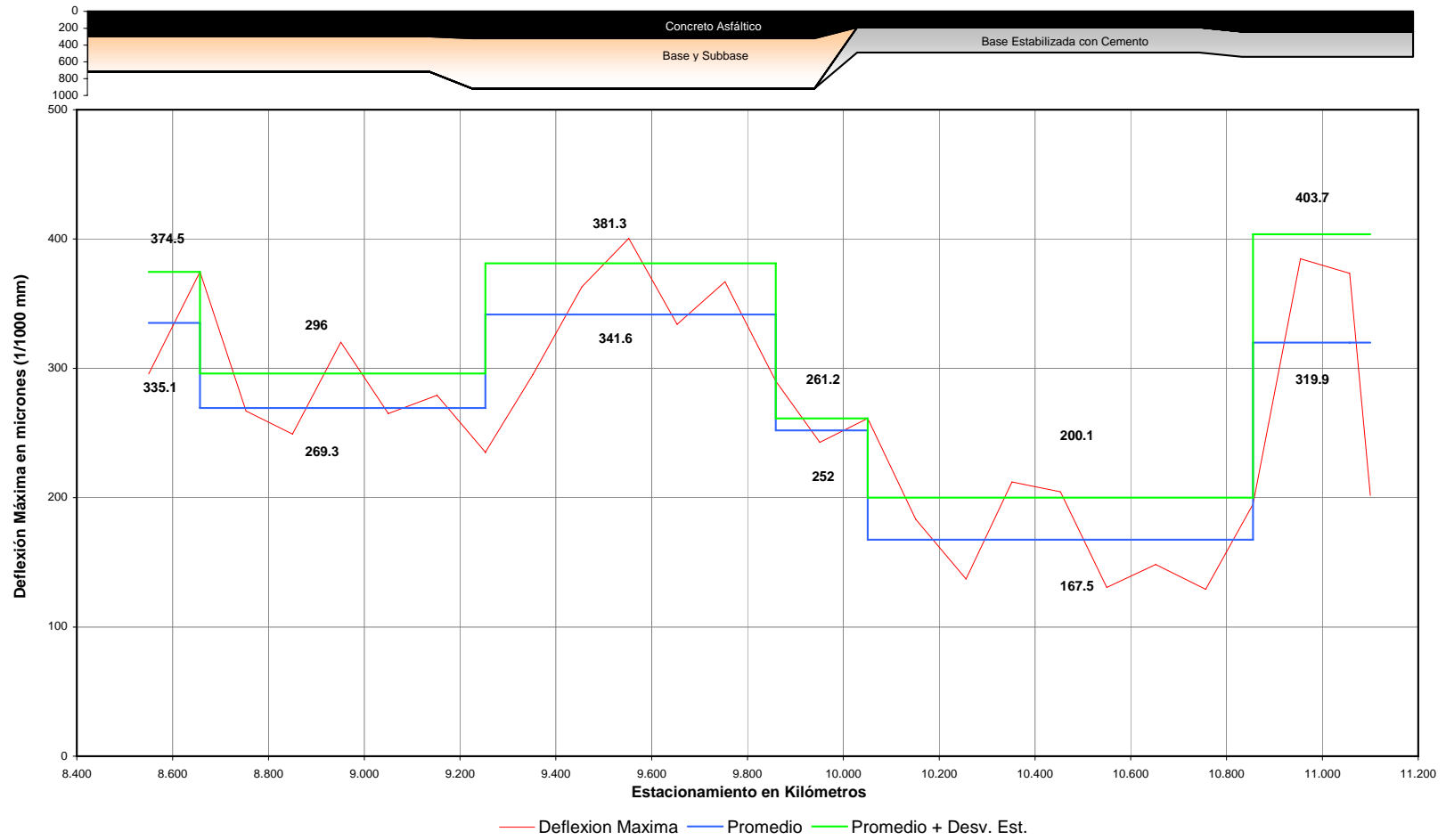
Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv. Est.	Prom - Desv. Est.	Percentil 15
8.550	11.050	2.500	6.3	1.0	5.3	5.17
8.550	9.250	0.700	6.6	0.4	6.2	6.35
9.250	10.050	0.800	7.5	0.4	7.1	7.05
10.050	10.550	0.500	5.3	0.4	4.9	4.53
10.550	10.860	0.310	5.9	0.3	5.6	5.42
10.860	11.050	0.190	5.0	0.8	4.2	4.47

Cuadro No. 24

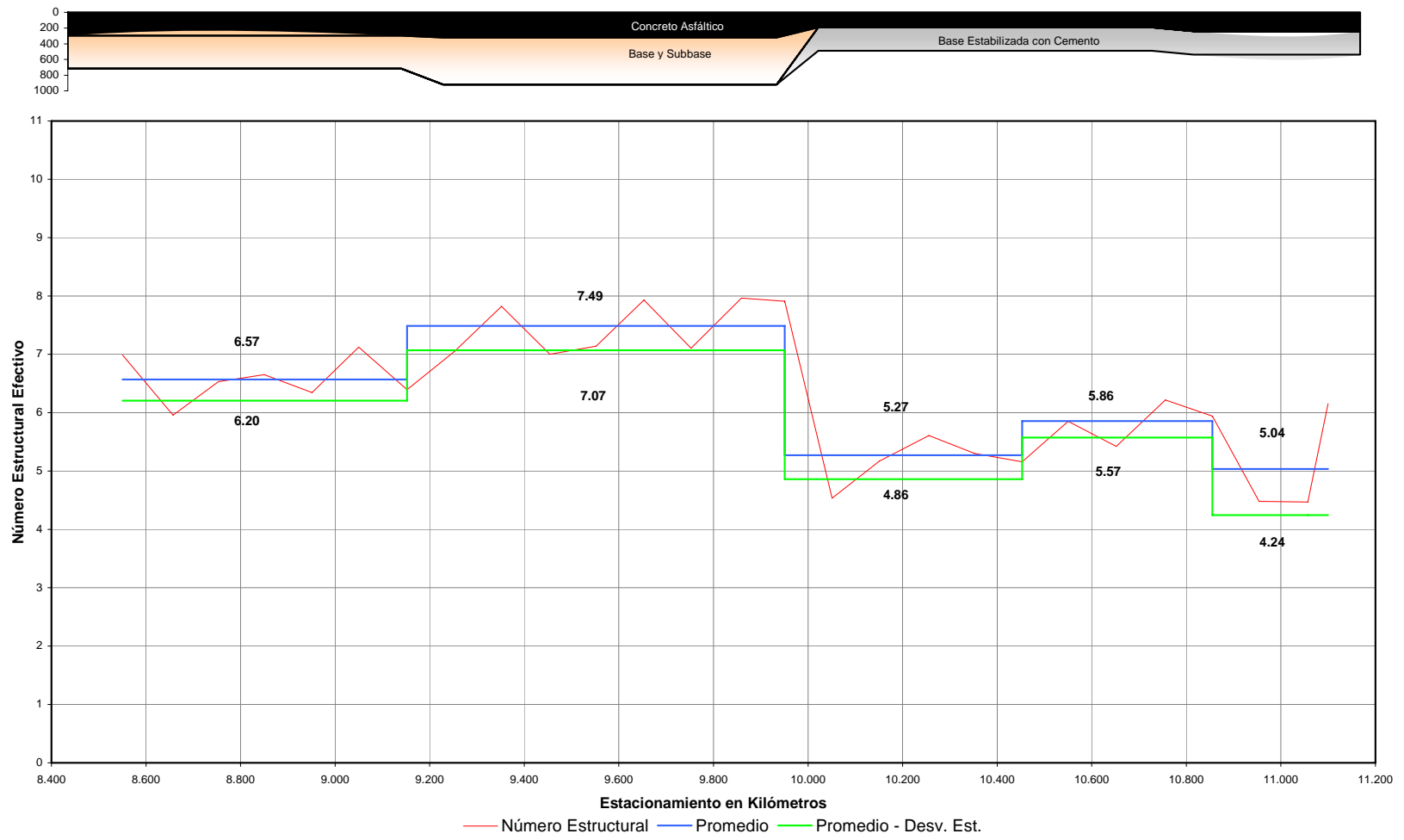
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO, E_p (kg/cm²)

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv. Est.	Prom - Desv. Est.	Percentil 15
8.550	11.050	2.500	11403.3	5121.1	6282.3	5918.53
8.550	9.350	0.800	10079.1	1694.4	8384.7	8747.25
9.350	10.150	0.800	7443.3	1444.8	5998.6	5830.34
10.150	10.450	0.300	16645.8	1721.3	14924.6	14892.94
10.450	10.950	0.500	18464.2	4699.0	13765.1	12932.19
10.950	11.050	0.100	8484.0	4177.2	4306.8	5510.50

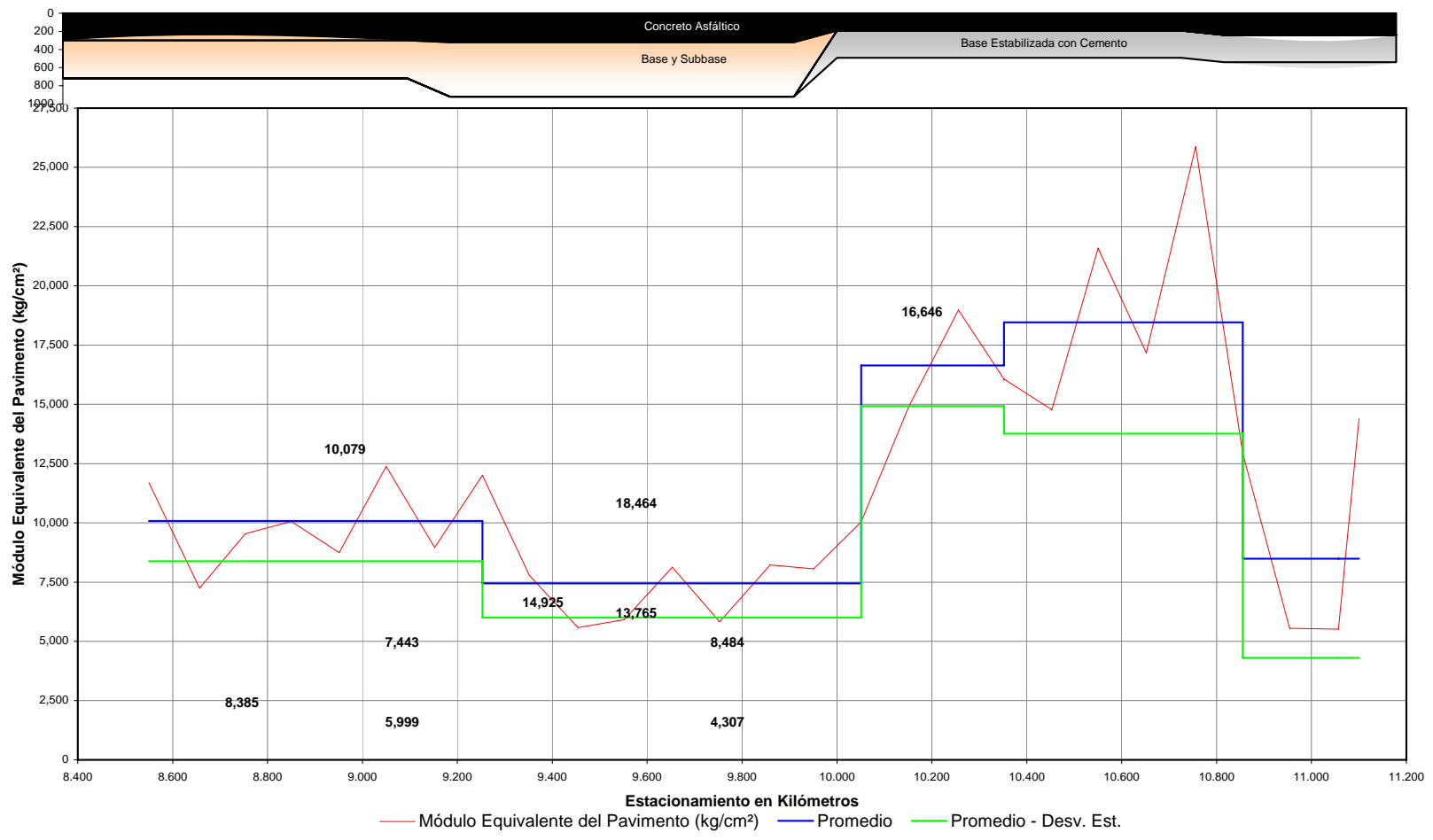
Gráfica No. 20
DEFLEXIÓN MÁXIMA (d_0)
Pista derecha segundo carril



Gráfica No. 21
NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (SN_{ef})
Pista derecha segundo carril



Grafica No. 22
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (E_p)
Pista derecha segundo carril



2. Resumen estadístico para la pista izquierda

a. Primer carril

Cuadro No. 25

DEFLEXIÓN MÁXIMA, D_0 , en micrones (1/1000 mm)

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv. Est.	Prom + Desv. Est.	Percentil 85
8.500	11.050	2.550	223.8	71.6	295.5	299
8.500	9.581	1.081	272.2	46.4	318.6	302
9.581	10.001	0.420	231.6	47.3	278.9	312
10.001	10.251	0.250	136.6	30.7	167.3	162
10.790	11.050	0.260	146.5	43.1	189.6	216

Cuadro No. 26

NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO DEL PAVIMENTO, SN_{eff}

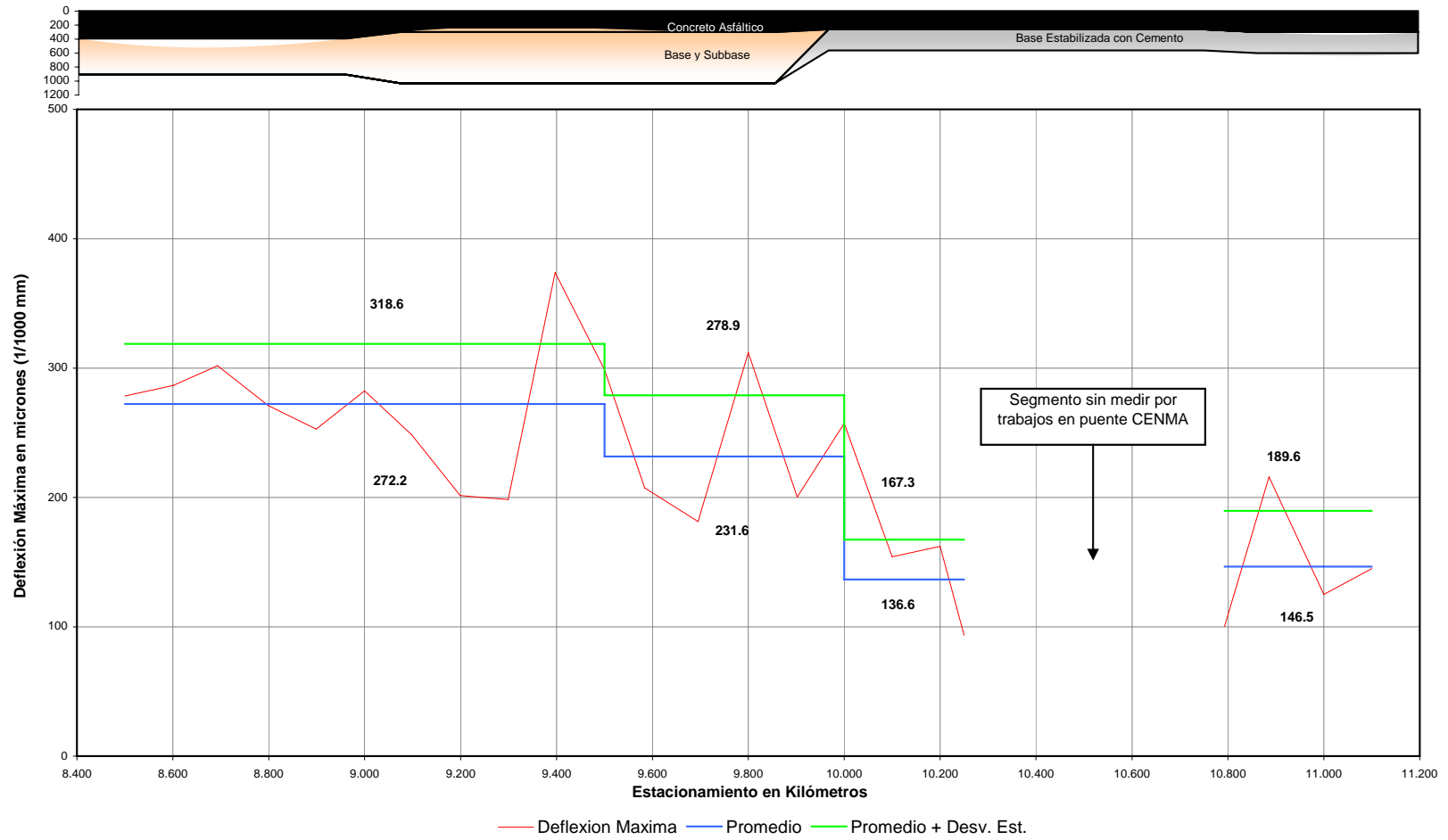
Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv. Est.	Prom - Desv. Est.	Percentil 15
8.500	11.050	2.550	8.0	1.3	6.7	7
8.500	8.801	0.301	7.9	0.3	7.6	7
8.801	9.501	0.700	8.7	0.8	7.9	8
9.501	10.001	0.500	8.6	1.7	6.9	5
10.001	10.251	0.250	6.7	0.4	6.4	6
10.790	11.050	0.260	6.8	0.8	6.1	6

Cuadro No. 27

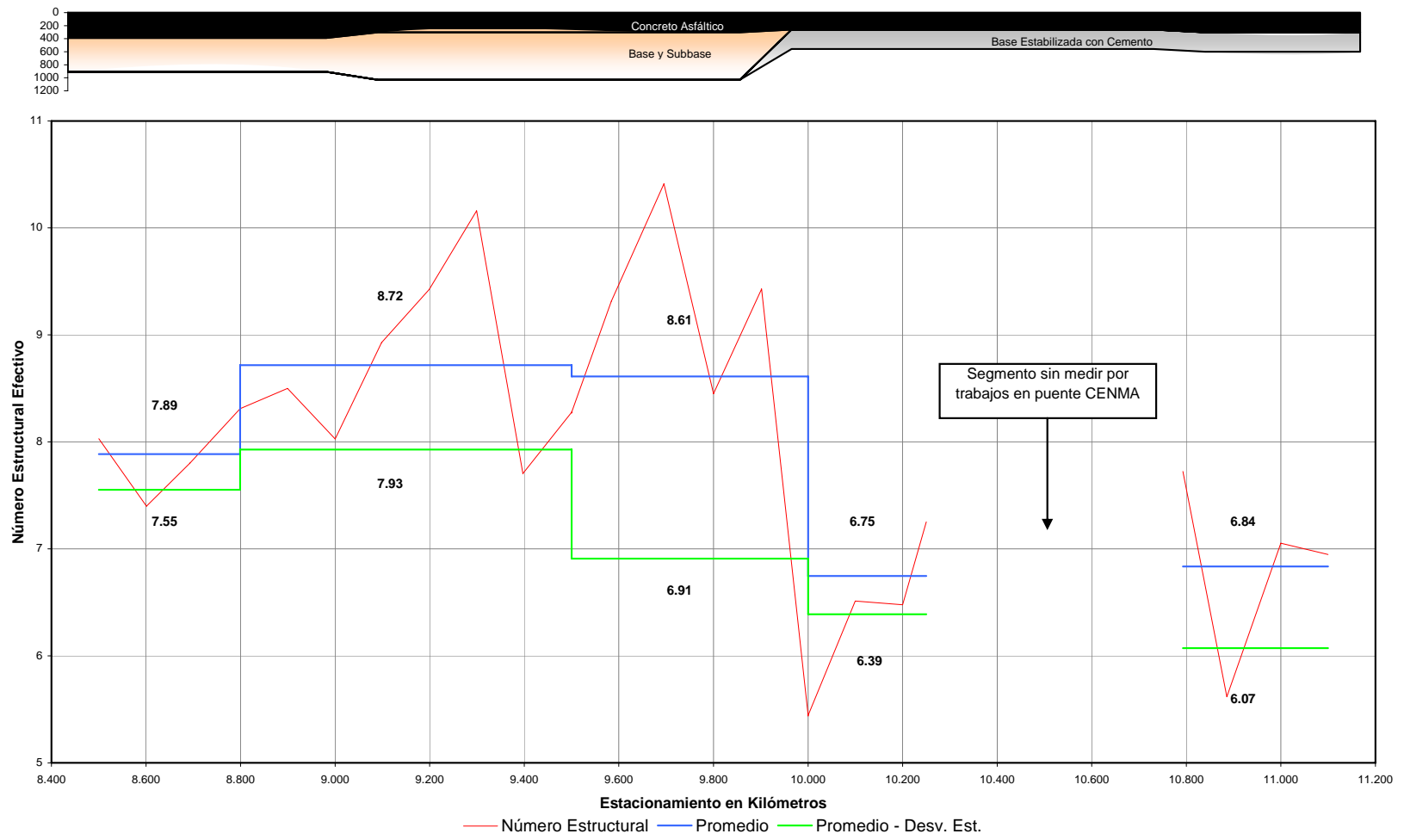
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO, E_p (kg/cm²)

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv. Est.	Prom - Desv. Est.	Percentil 15
8.500	11.050	2.550	11,640.0	5,034.8	6,605.2	6,996
8.500	9.201	0.701	8,767.0	1,047.9	7,719.1	7,984
9.201	10.001	0.800	9,145.9	2,540.8	6,605.1	6,575
10.001	10.251	0.250	19,106.3	3,122.0	15,984.3	16,775
10.790	11.050	0.260	16,774.2	5,120.4	11,653.7	8,986

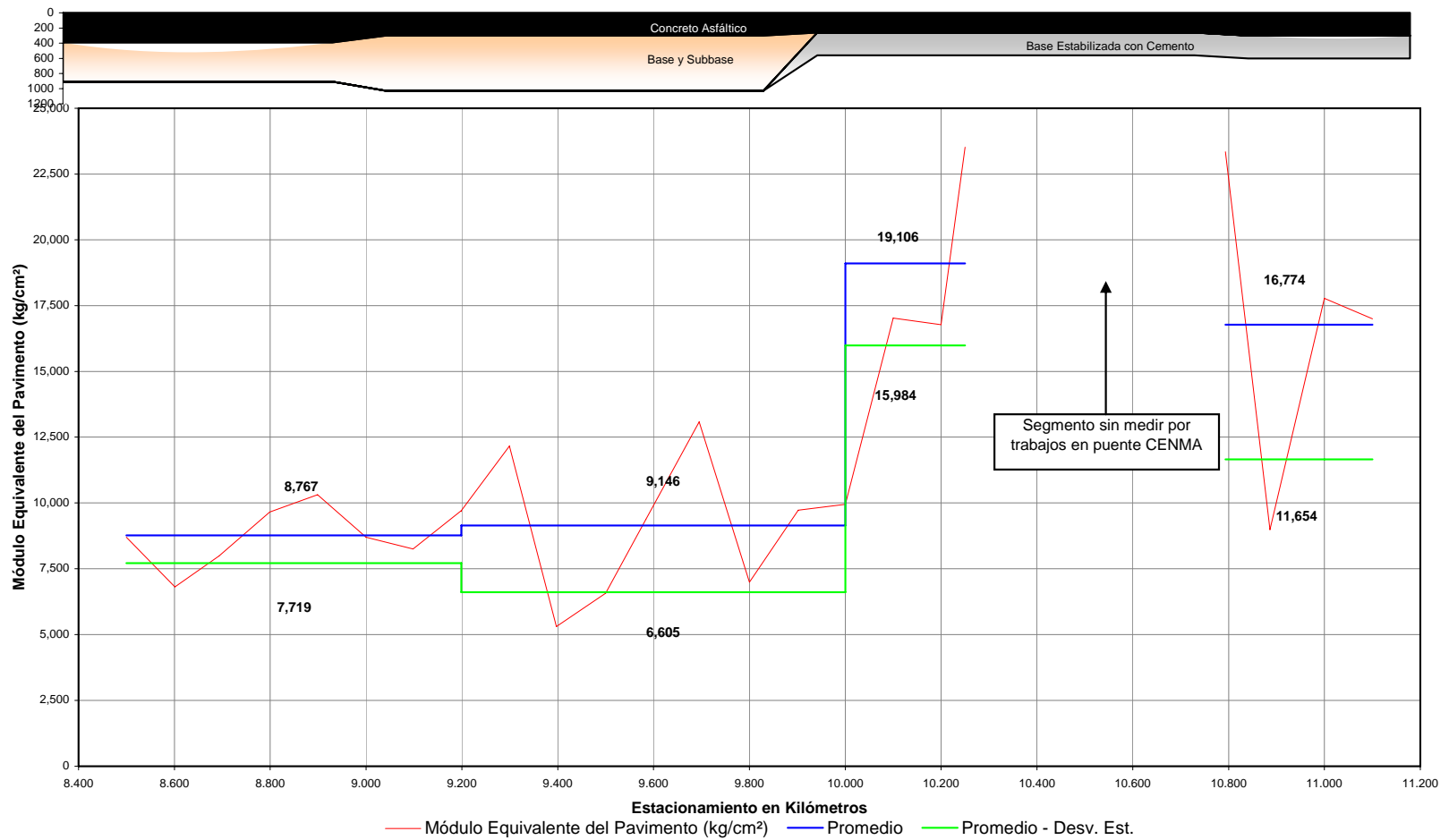
Gráfica No. 23
DEFLEXIÓN MÁXIMA (d_0)
Pista izquierda primer carril



Grafica No. 24
NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (SN_{ef})
Pista izquierda primer carril



Gráfica No. 25
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (E_p)
Pista izquierda primer carril



b. Segundo carril

Cuadro No. 28

DEFLEXIÓN MÁXIMA, D_0 , en micrones (1/1000 mm)

Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv. Est.	Prom + Desv. Est.	Percentil 85
8.500	11.050	2.550	293.8	108.1	401.9	402
8.500	9.261	0.761	327.6	73.5	401.1	373
9.261	10.151	0.890	352.4	99.5	451.9	442
10.151	10.310	0.159	150.8	10.3	161.1	161
10.750	11.050	0.300	171.9	25.7	197.7	210

Cuadro No. 29

NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO DEL PAVIMENTO, SN_{eff}

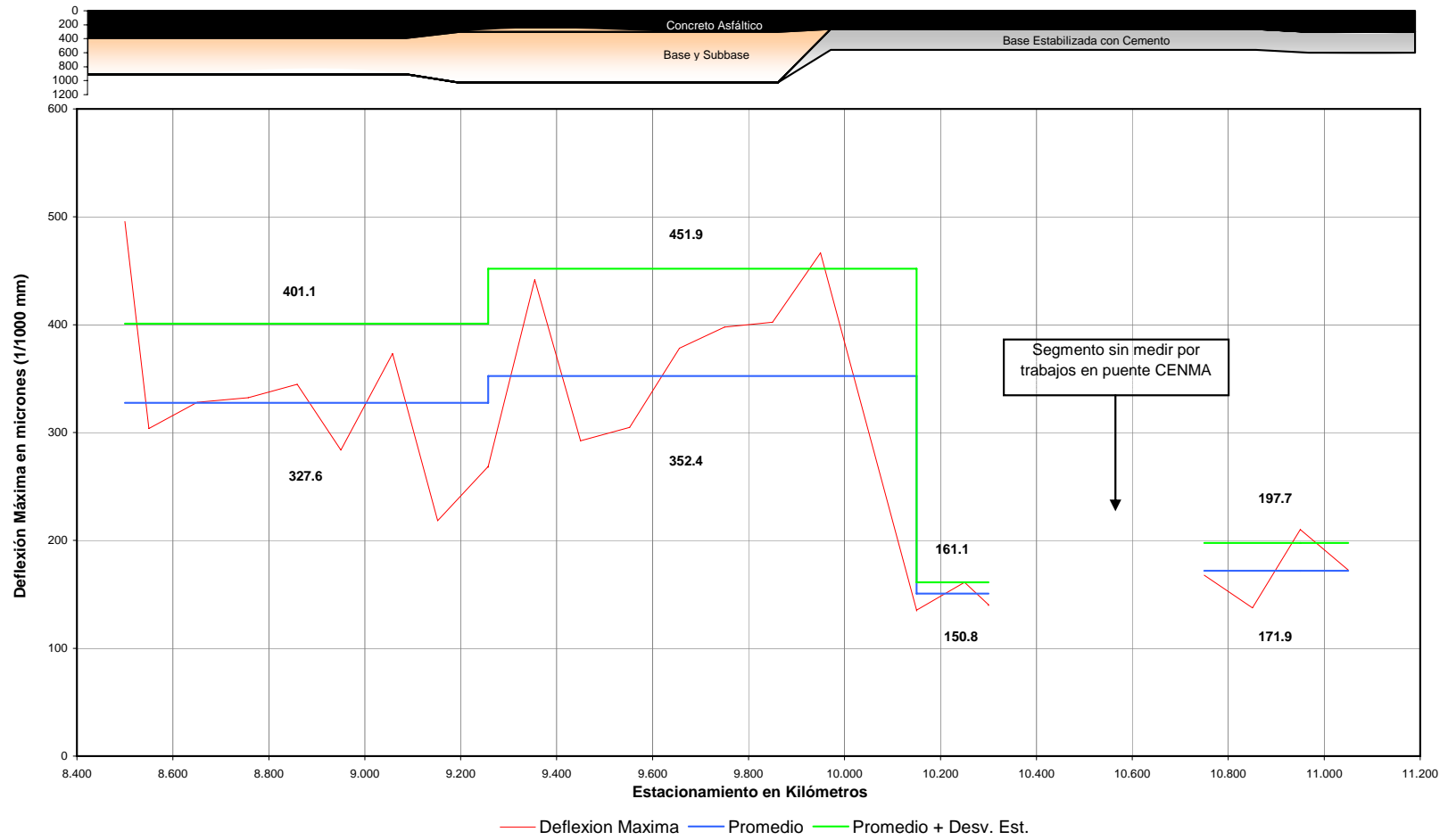
Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv. Est.	Prom - Desv. Est.	Percentil 15
8.500	11.050	2.550	7.2	0.9	6.3	6
8.500	9.151	0.651	7.1	0.5	6.6	7
9.151	9.851	0.700	8.0	0.5	7.5	8
9.851	10.301	0.450	6.2	0.7	5.4	5
10.750	11.050	0.300	6.5	0.3	6.2	6

Cuadro No. 30

MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO, E_p (kg/cm²)

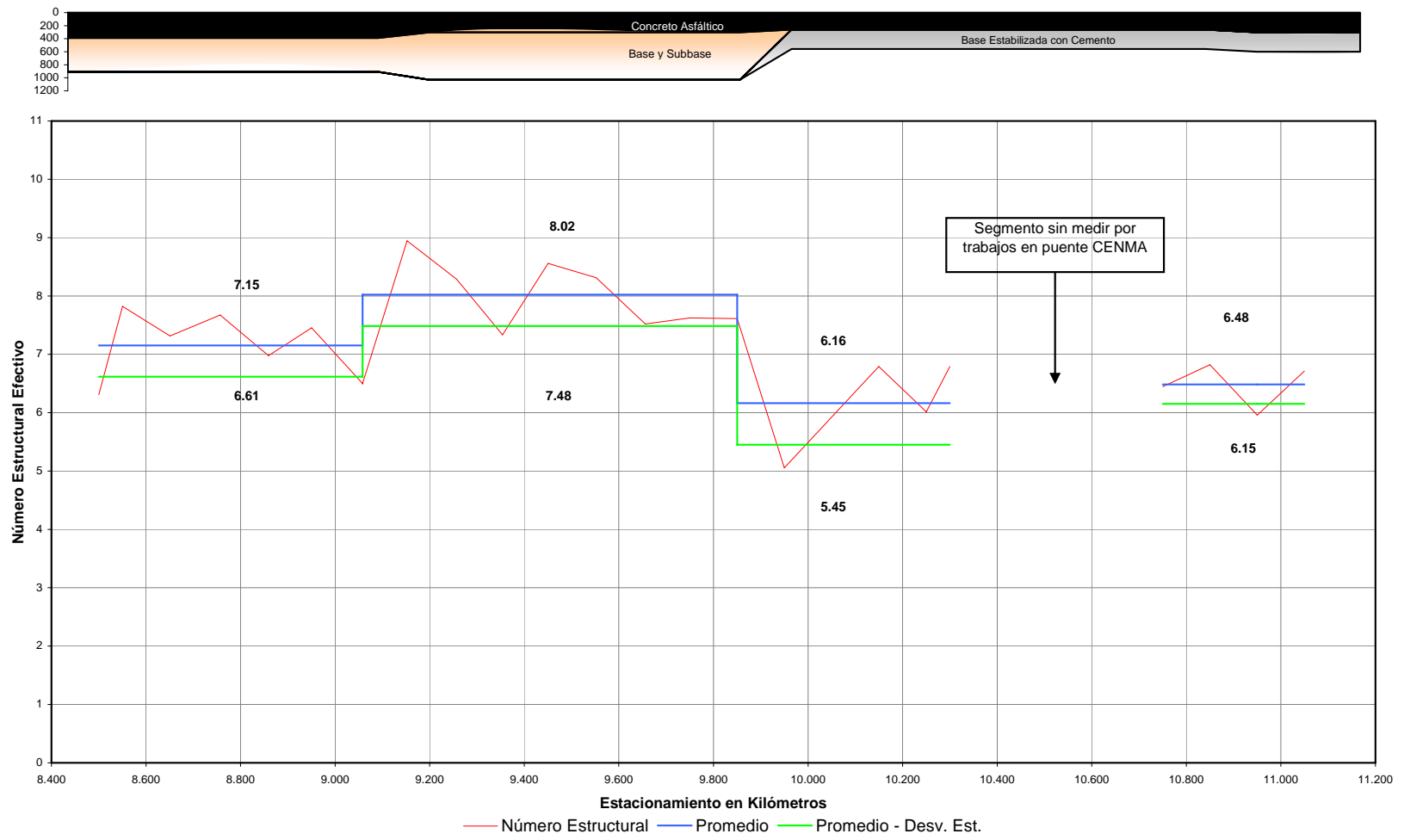
Inicio	Final	Longitud	Promedio	Desv. Est.	Prom - Desv. Est.	Percentil 15
8.500	11.050	2.550	9,045.8	4,634.4	4,411.4	4,930
8.500	9.951	1.451	6,268.6	1,330.3	4,938.2	4,618
9.951	10.301	0.350	17,351.1	2,768.7	14,582.5	13,436
10.750	11.050	0.300	13,925.5	2,065.8	11,859.7	10,711

Gráfica No. 26
DEFLEXIÓN MÁXIMA (d_0)
Pista izquierda segundo carril

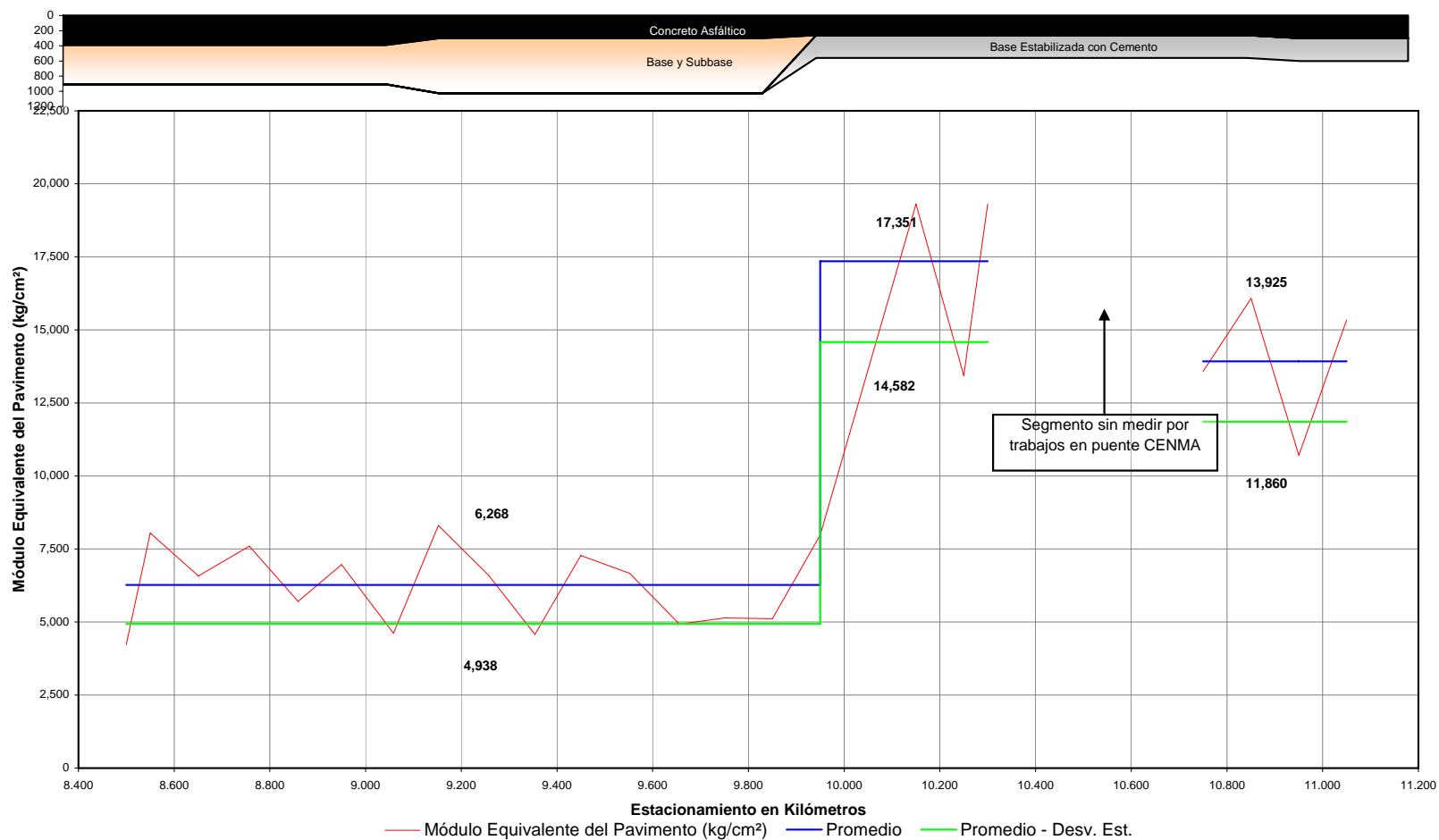


Gráfica No. 26
NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (SN_{ef})

Pista izquierda segundo carril



Gráfica No. 27
MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (E_p)
Pista izquierda segundo carril



V. COMPARACIÓN ENTRE LA EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO ANTES Y DESPUES DE LA REHABILITACIÓN

La medición de deflexiones de un pavimento sujeto a carga y un posterior cálculo del número estructural y el módulo equivalente del pavimento, son parámetros utilizados para determinar la condición estructural del mismo. Para establecer de alguna manera el aporte estructural luego de haber realizado trabajos de rehabilitación durante el año 2005 bajo las características de fresado y recapeo mostrados en el cuadro No. 18, a continuación se presentan las comparaciones para los parámetros antes mencionados.

A. DEFLEXIONES²³

En general, la disminución de las deflexiones máximas reflejado en las gráficas de comparación muestran el aporte estructural de los trabajos de rehabilitación realizados en 2005. Las deflexiones medidas en noviembre de 2004 disminuyeron en comparación a las de septiembre de 2006, obteniéndose reducciones promedio entre 57% y 65% para la pista derecha y entre 53% y 60% para la pista izquierda.

Sin embargo, en el tramo comprendido de la estación 10+ 100 y 10+800 el rango de mejoría se ve reducido en gran parte. Se considera que esto se pudo deber a que en este tramo se contaba con una base estabilizada con cemento. Esta base, bajo estas características, se comporta como una capa rígida y no flexible.

B. NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO DEL PAVIMENTO (SN_{eff})²⁴

Al igual que las deflexiones, las gráficas de número estructural efectivo del pavimento (SN_{eff}) presentan un 40% aproximado de incremento en este valor en la gran parte de la estructura excepto en algunos puntos. Estos puntos son los comprendidos en el tramo con base estabilizada con cemento. En este tramo se pueden observar fluctuaciones en los valores que son, en algunos casos mayores que antes del recapeo y otros menores. Sin embargo, las fluctuaciones no son significativas como para decir que hubo un aumento o disminución de la capacidad de la estructura en este tramo.

La confusión anterior se le atribuye al programa de retrocálculo. Este programa causa este tipo de resultados cuando se modelan capas cuyo módulo de elasticidad no disminuye conforme la profundidad como en este caso que existe la combinación de una capa flexible con una base estabilizada. Esto se puede controlar conociendo las propiedades de la base estabilizada ya que el programa permite ingresar estos valores.

²³ Gráficas No. 29 a la 32

²⁴ Gráficas No. 33 a la 36

C. MÓDULO EQUIVALENTE DEL PAVIMENTO (E_p)²⁵

Por último, el módulo equivalente del pavimento es un reflejo del comportamiento de las graficas anteriores por ser un valor obtenido a partir de las deflexiones, espesores de capas y módulo de resiliencia de la subrasante.

En este caso, el tramo de estructura con base estabilizada con cemento también presenta discrepancias. Acá, cabe resaltar dos cosas la fecha en que se realizaron las medidas, noviembre de 2004 y septiembre de 2006, y que el módulo equivalente del pavimento está dado en función del módulo de resiliencia de la subrasante y este módulo representa el estado en el que están encuentra.

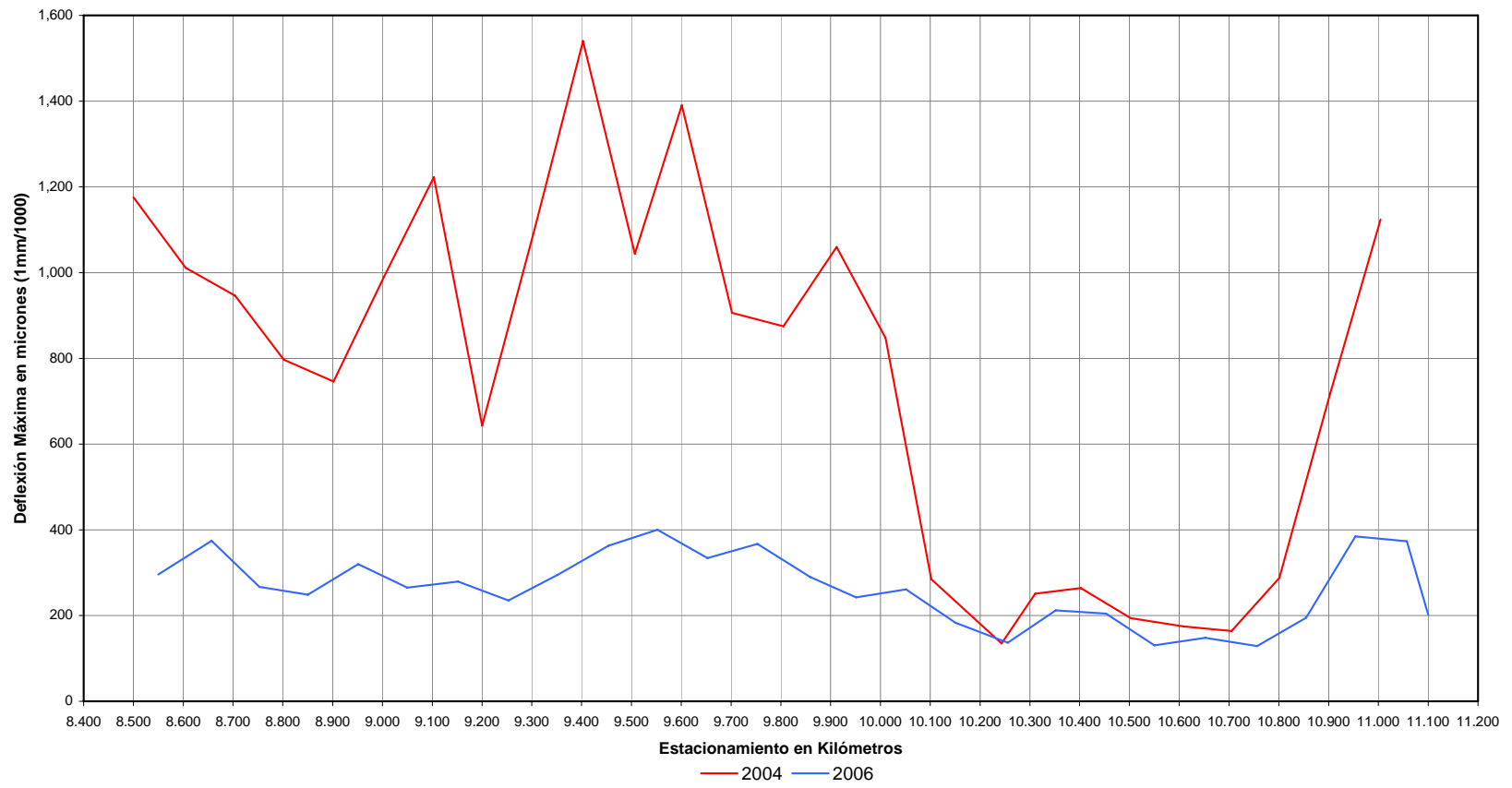
Por lo tanto, los valores obtenidos para el 2004 se deben al alto grado de saturación que presentaba la subrasante luego de la absorción de las aguas subterranes producidas por el invierno. Mientras que, para los valores obtenidos para el 2006 se deben a que la subrasante no se encontraba saturada todavía.

²⁵ Gráficas No. 37 a la 40

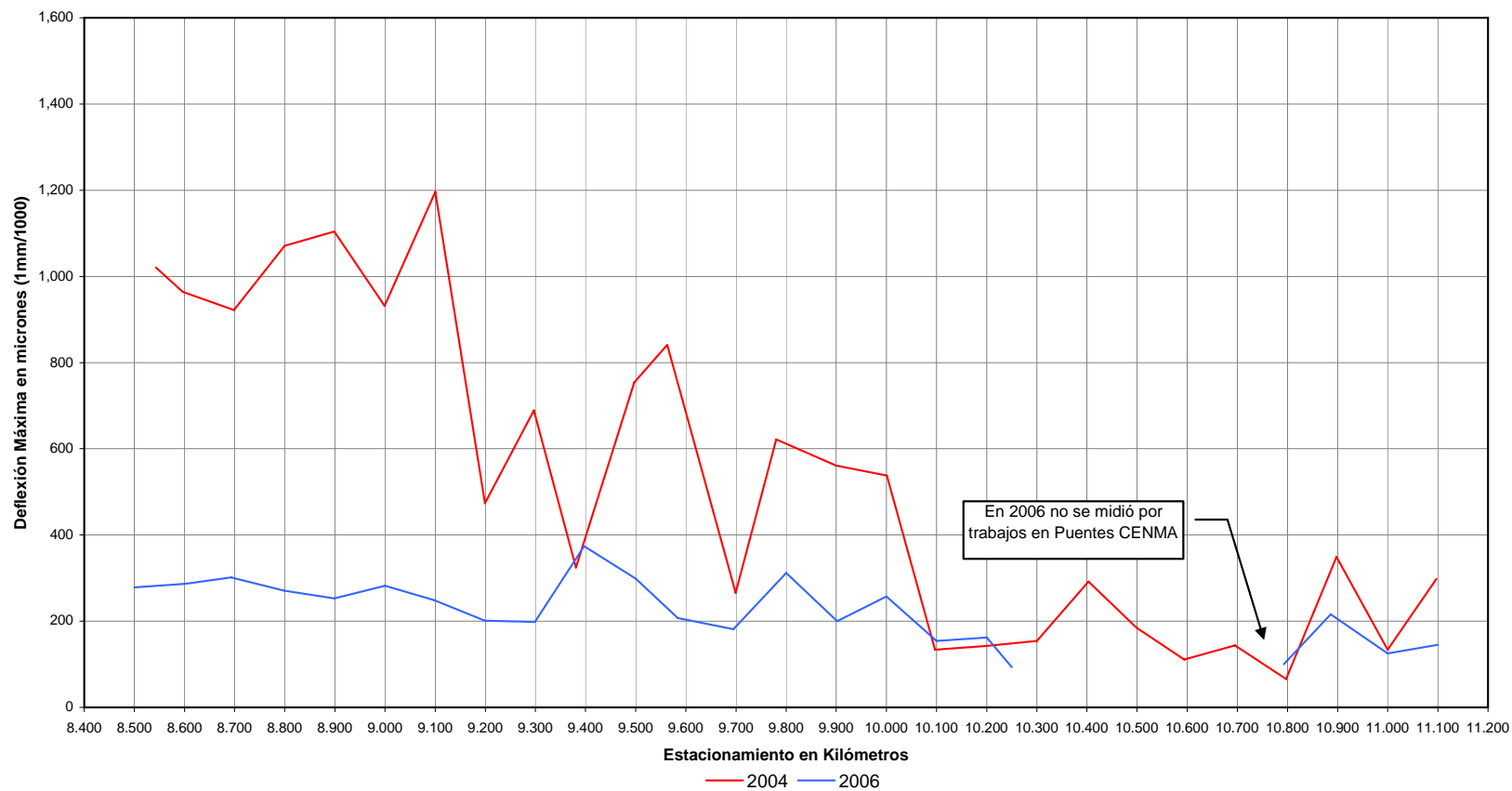
Gráfica No. 29
COMPARACIÓN DEFLEXIÓN MÁXIMA (d₀)
Pista derecha primer carril



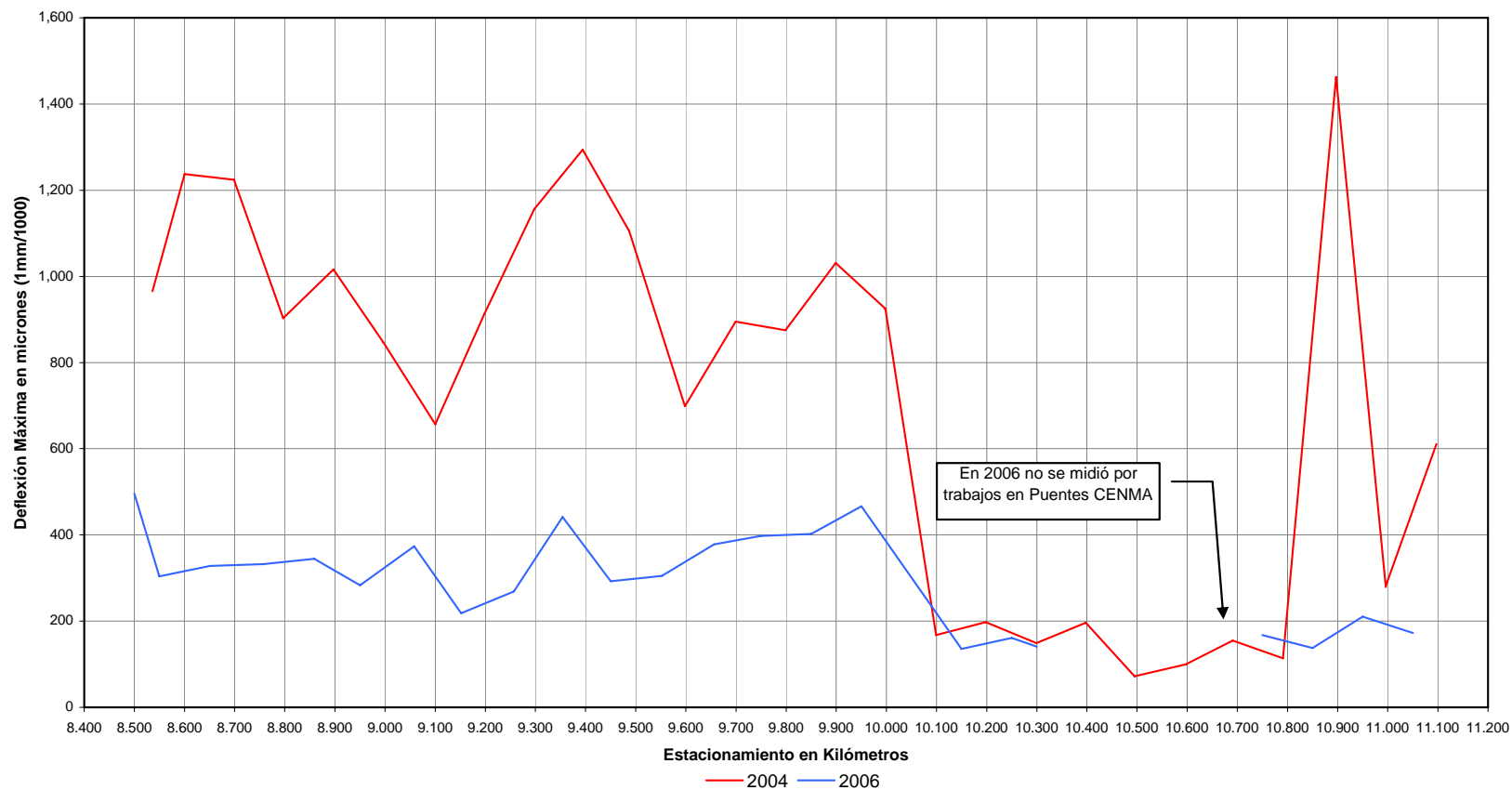
Gráfica No. 30
COMPARACIÓN DEFLEXIÓN MÁXIMA (d_0)
Pista derecha segundo carril



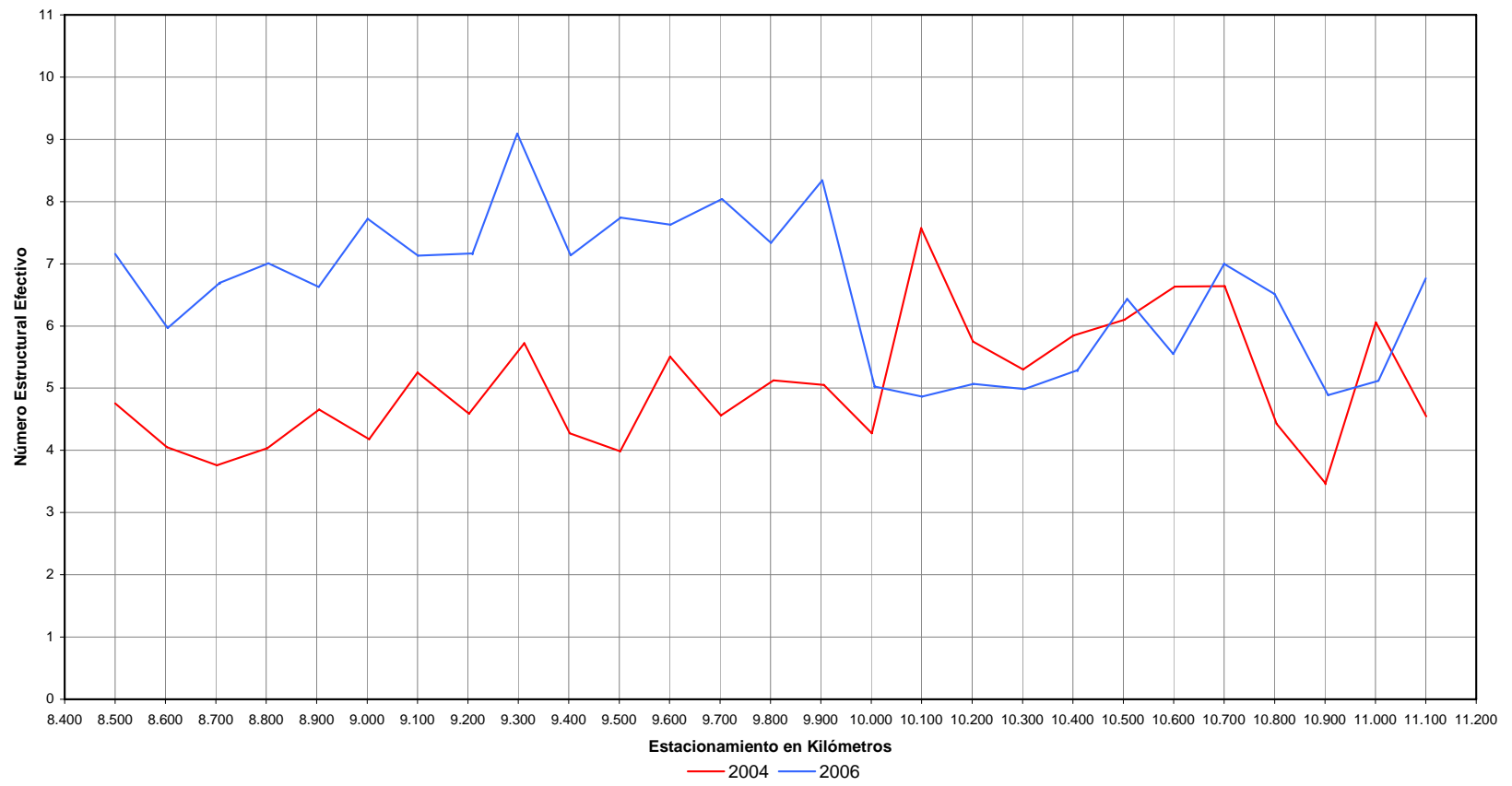
Gráfica No. 31
COMPARACIÓN DEFLEXIÓN MÁXIMA (d₀)
Pista izquierda primer carril



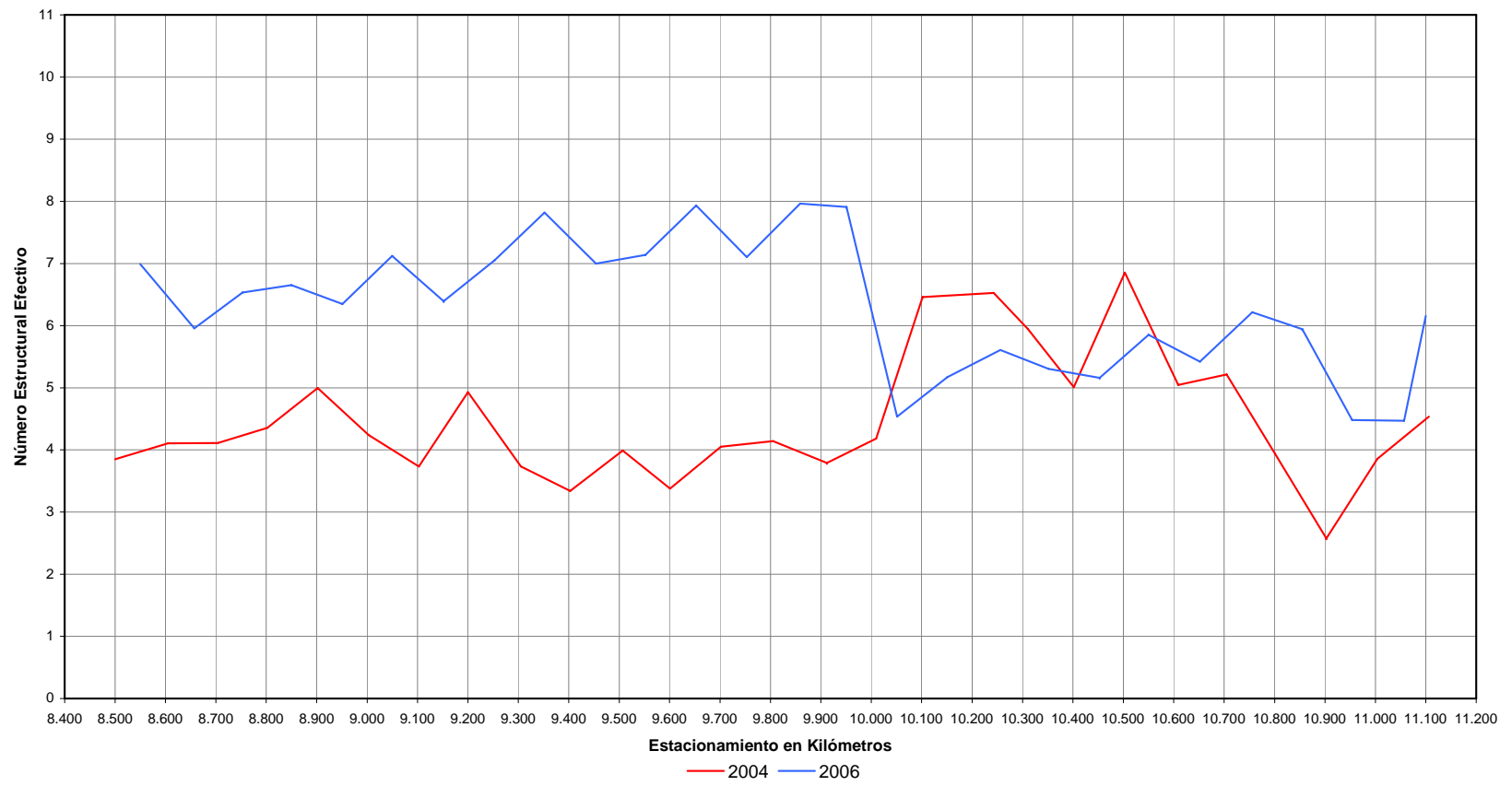
Gráfica No. 32
COMPARACIÓN DEFLEXIÓN MÁXIMA (d_0)
Pista izquierda segundo carril



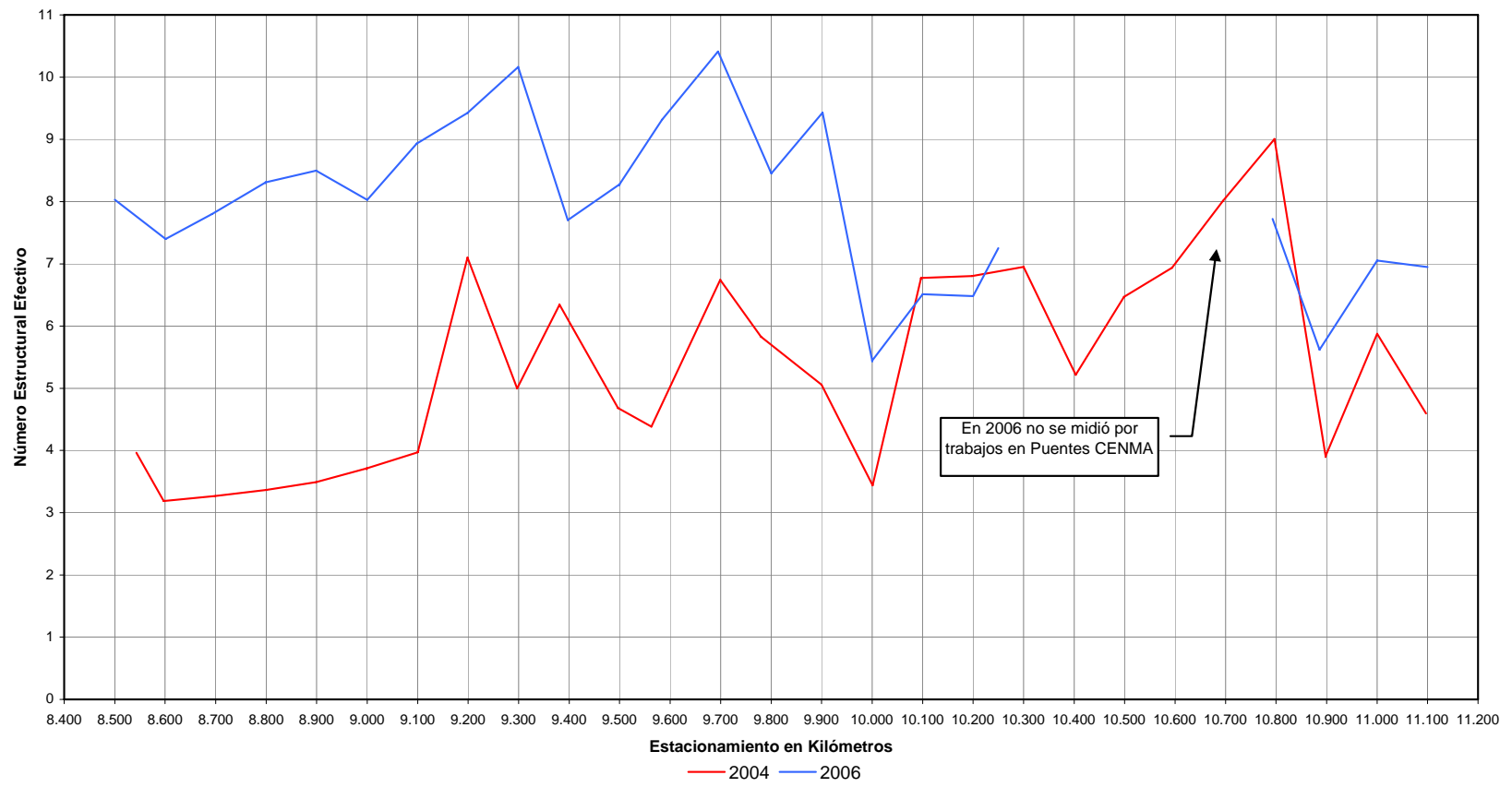
Gráfica No. 33
COMPARACIÓN NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (SN_{eff})
Pista derecha primer carril



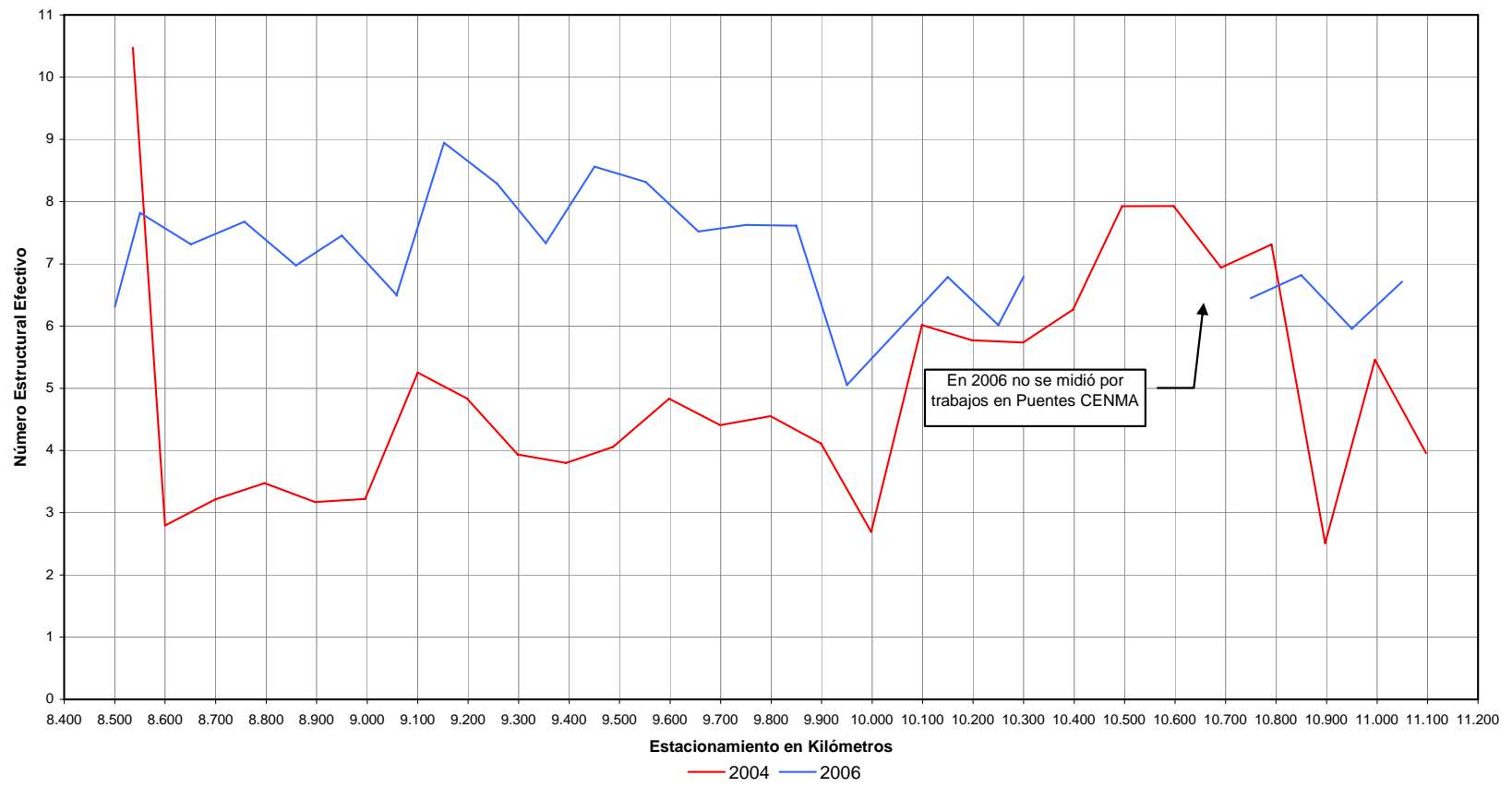
Gráfica No. 34
COMPARACIÓN NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (SN_{eff})
Pista derecha segundo carril



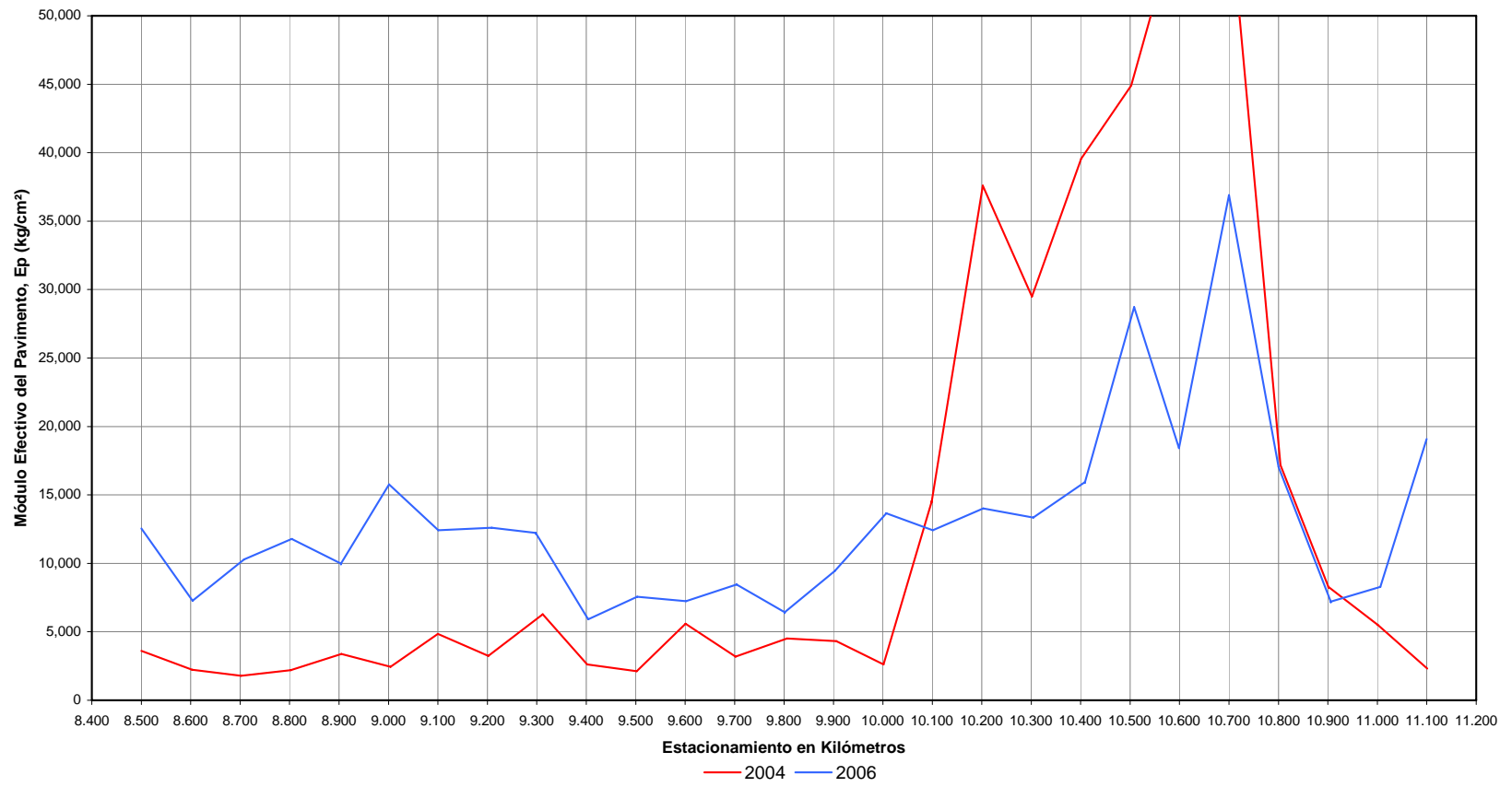
Gráfica No. 35
COMPARACIÓN NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (SN_{eff})
Pista izquierda primer carril



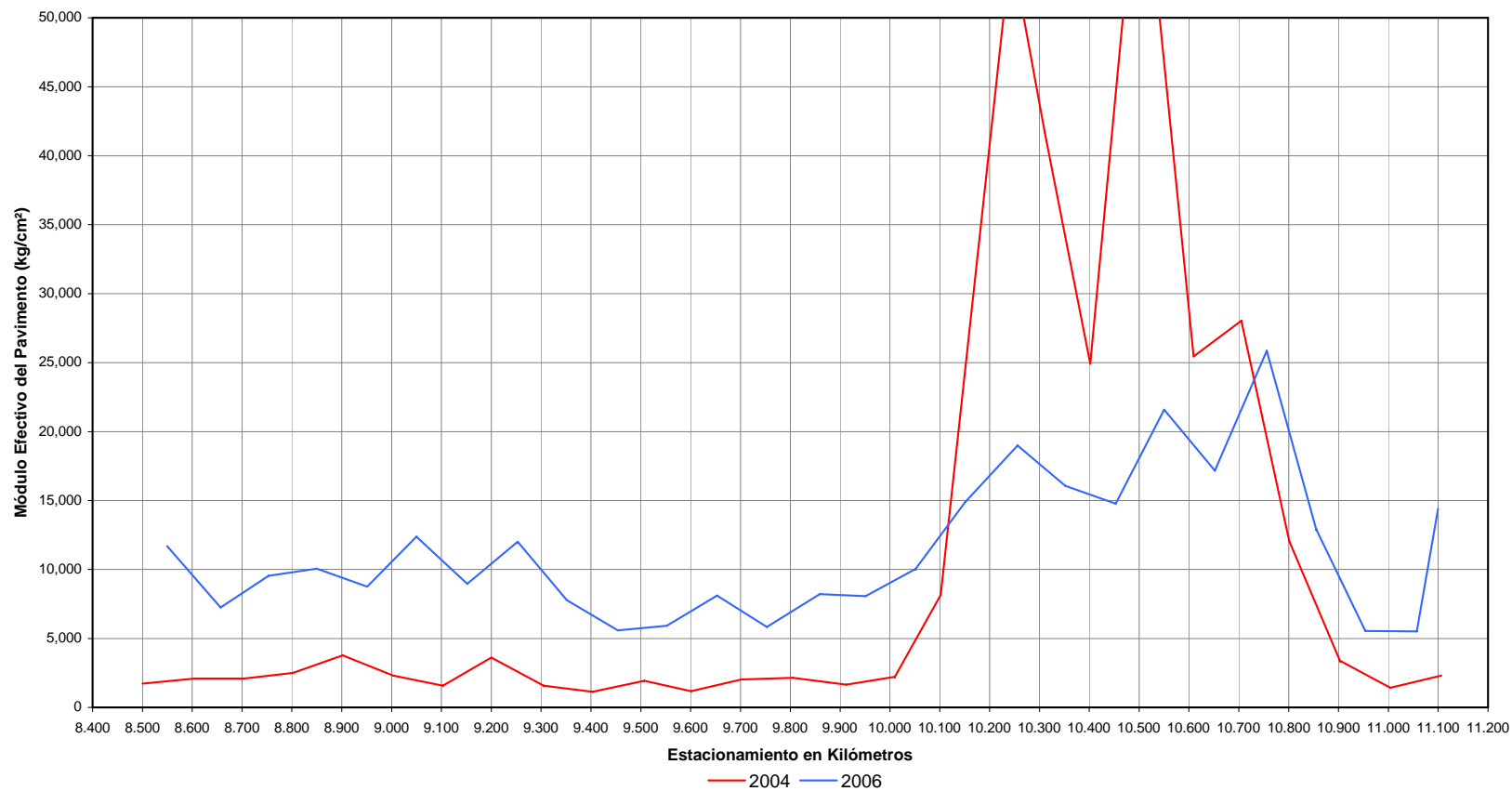
Gráfica No. 36
COMPARACIÓN NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO (SN_{eff})
Pista izquierda segundo carril



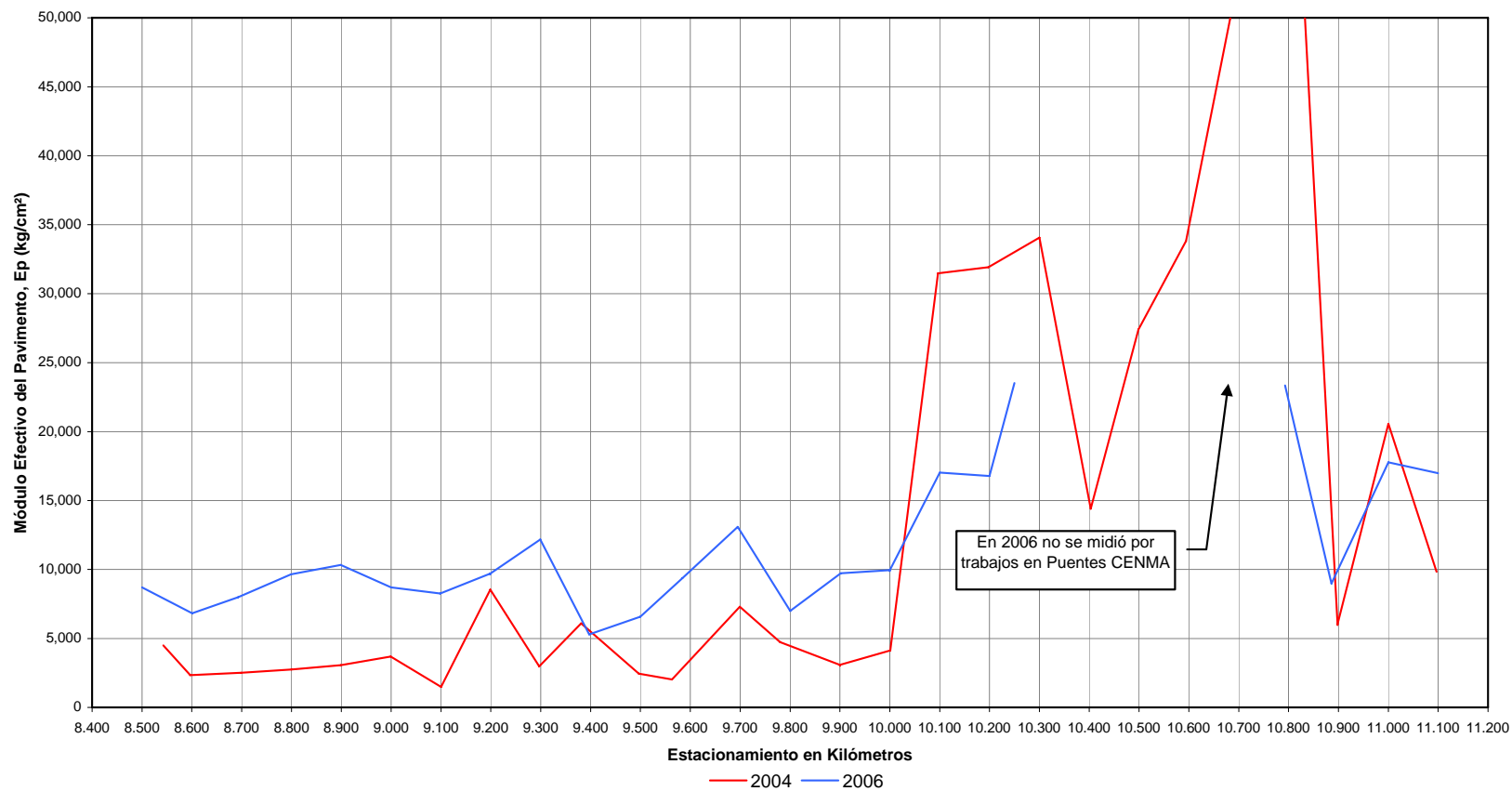
Gráfica No. 37
COMPARACIÓN MÓDULO EFECTIVO DEL PAVIMENTO (E_p)
Pista derecha primer carril



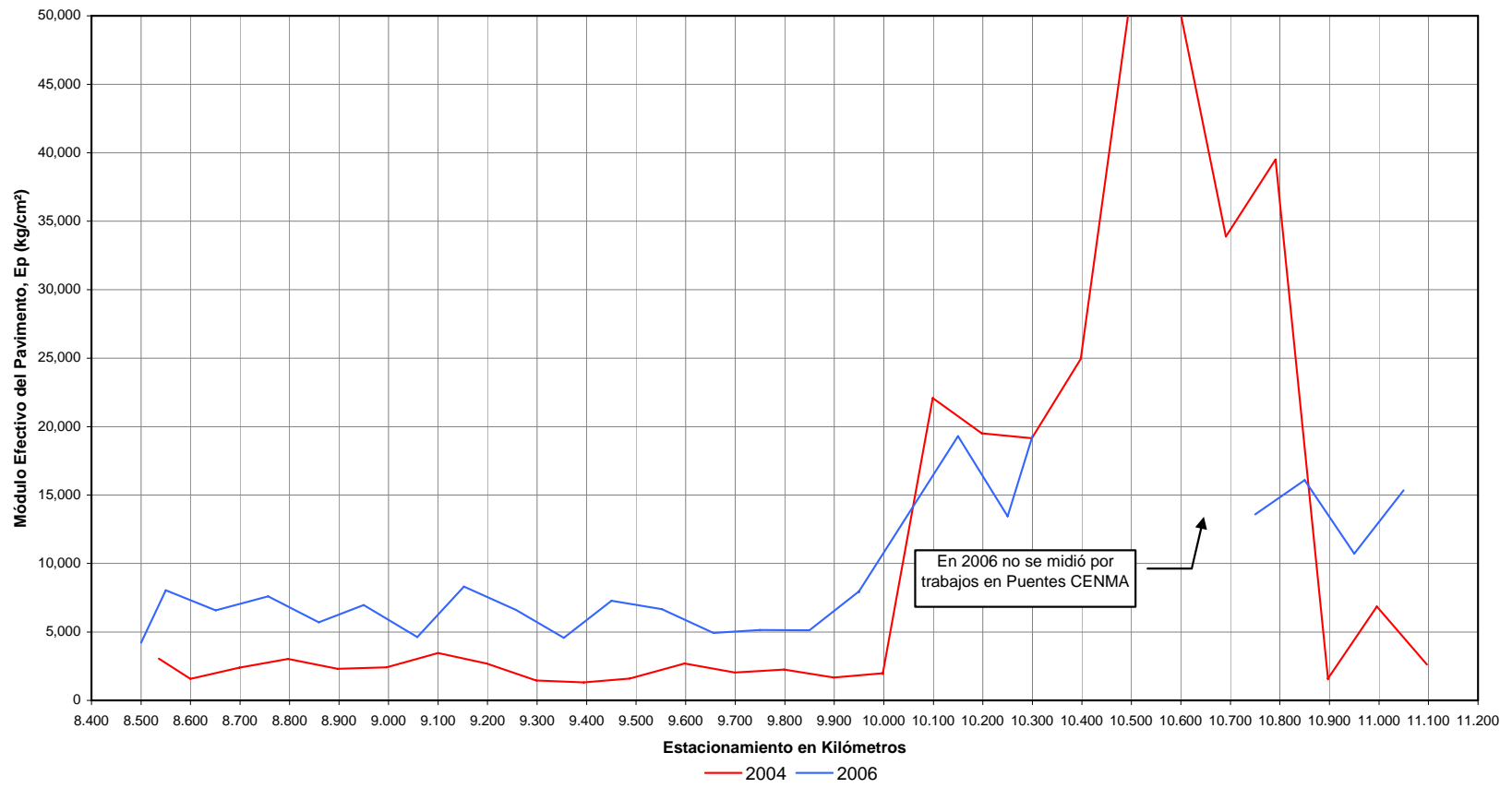
Gráfica No. 38
COMPARACIÓN MÓDULO EFECTIVO DEL PAVIMENTO (E_p)
Pista derecha segundo carril



Gráfica No. 39
COMPARACIÓN MÓDULO EFECTIVO DEL PAVIMENTO (E_p)
Pista izquierda primer carril



Gráfica No. 40
COMPARACIÓN MÓDULO EFECTIVO DEL PAVIMENTO (E_p)
Pista izquierda segundo carril



VI. CONCLUSIONES

- Los ensayos no destructivos (NDT), junto con la investigación de fallas, un reducido muestreo y ensayos de materiales y la determinación de los espesores de los componentes del pavimento permiten realizar una evaluación estructural confiable.
- El aporte estructural de los trabajos de rehabilitación realizados en 2005 se ve reflejado en la disminución de las deflexiones máximas. Las deflexiones medidas en noviembre de 2004 disminuyeron en comparación a las de septiembre de 2006, obteniéndose reducciones promedio entre 57% y 65% para la pista derecha y entre 53% y 60% para la pista izquierda.
- El número estructural efectivo presentó un incremento del 40% luego de la rehabilitación en los tramos sin base estabilizada con cemento
- Las diferencias tan reducidas en los valores de los parámetros de comparación entre la estación 10+100 y 10+800 pueden atribuirse a que, debido a que la medición del 2006 fue a finales de agosto y la capa de subrasante se encontraba en un nivel de saturación alto, y en ambos caso (mediciones des 2005 y 2006) los valores de deflexiones fueron bajos. Sin embargo, se estima que sí hubo aporte aunque no significativo del recapeo.
- Se deben conocer las propiedades de las capas subyacentes para evitar el error de compensación que hace el programa cuando el módulo de las capas no disminuye conforme su profundidad.
- Para poder tener datos comparativos las mediciones deben hacerse bajo las mismas características. Principalmente, el mismo mes ya que problemas de saturación en la subrasante se ven reflejados en los datos.

VII. Recomendaciones

- Realizar las mediciones bajo las mismas características y en la misma época del año para evitar discrepancias y presentar resultados confiables.
- Complementar las mediciones del FWD con extracción de núcleos para obtener propiedades como resistencia a la compresión no confinada que permitan comparar los valores asignados por el programa de retrocálculo.
- Realizar un estudio completo de las propiedades y estado de la subrasante para conocer características como porcentaje de humedad, porcentaje de compactación, densidades, entre otras, durante la medición.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

AASHTO Guide for design of pavement structures 1993. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D. C.

ELMOD 4.5 User Manual. 1998. Dynatest Consulting Inc. Florida, Starke. 29 págs.

Flintsch, Gerard, *et al* 2003. *Backcalculation Validation Through Field Instrumentation Response at the Virginia Smart Road*. Virginia Tech Transportation Institute. Auburn, Alabama 35 págs

Hoffman, Michael. 2003. *A direct method for evaluating the Structural Needs of Flexible Pavements Based on Fwd*. Transportation Research Board. North Carolina State University. 17 págs.

Huang, Yang. 2004. *Pavement Analysis and Design*. 2^a ed. E.E.U.U., NJ. Prentice Hall. 775 pags.

Hudson, Red; R. Haas y W. Uddin. 1997 *Infrastructure Management: Integrating Design, Construction, Maintenance, Rehabilitation, Renovation*. McGraw Hill, E.E.U.U. 343 págs.

Pologruto, Mario. 2001. *A procedure for using a FWD to determine the structural layer coefficients for flexible pavements*. Vermont Agency of transportation. 26 págs.

Zou, Yunyi. 2001. *Determination of test spacing in pavement evaluation*. University of Toledo, Ohio. 20 págs.