

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



**VARIACIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL, EN
TÉRMINOS DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD
INTERNACIONAL (IRI), EN LA CONSTRUCCIÓN DE LAS
DISTINTAS CAPAS BITUMINOSAS PARA EL PROYECTO
CA - 14 TRAMO: EL RANCHO - LA CUMBRE**

Julio César Arriola

Guatemala

2007

**VARIACIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL, EN
TÉRMINOS DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD
INTERNACIONAL (IRI), EN LA CONSTRUCCIÓN DE LAS
DISTINTAS CAPAS BITUMINOSAS PARA EL PROYECTO
CA – 14 TRAMO: EL RANCHO – LA CUMBRE**

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería

**VARIACIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL, EN
TERMINOS DEL ÍNDICE DE RUGOSIDAD
INTERNACIONAL (IRI), EN LA CONSTRUCCIÓN DE LAS
DISTINTAS CAPAS BITUMINOSAS PARA EL PROYECTO
CA – 14 TRAMO: EL RANCHO – LA CUMBRE**

Trabajo de investigación presentado por Julio César
Arriola para optar al grado académico de Ingeniero

Civil

GUATEMALA

2007

Vo.Bo. :

(f) _____
MSc Carlos Gramajo

Tribunal:

(f) _____
Ing. Alejandro Maldonado

(f) _____
Ing. Manuel Fernández

(f) _____
MSc Carlos Gramajo

Fecha de aprobación:

PREFACIO

Este trabajo de graduación tuvo como principal limitación la no obtención de todos los valores IRI de todas las capas de la carretera. Sin embargo se considera que este trabajo representa fielmente el estado de la carretera, y puede ser utilizado en el estudio a continuación.

Los datos de las mediciones de la carretera son propiedad de Constructora Nacional, S.A. – CONASA -, por lo que se le agradece haber permitido su uso en esta investigación.

La información fue obtenida de la colección privada de CM Ingenieros, S.A.; por lo que se agradece al ingeniero Carlos Córdón y al ingeniero Carlos Gramajo, quien asesoro esta tesis.

El autor también quiere agradecer al ingeniero Danilo Midence por su orientación.

ÍNDICE GENERAL

PREFACIO	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS	IX
RESUMEN	X

CAPITULOS

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
3. ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL	3
4. EQUIPO UTILIZADO EN LA MEDICIÓN DEL IRI	9
5. ESPERANZA DE VIDA DEL PAVIMENTO DEPENDIENDO DEL IRI	14
6. APLICACIÓN PRÁCTICA	18
7. PROYECTO CA 14 EL RANCHO – LA CUMBRE	21
8. FACTORES CONSTRUCTIVOS QUE AFECTAN EL IRI	35
9. CONCLUSIONES	42
10. RECOMENDACIONES	43
11. BIBLIOGRAFÍA	44
12. APÉNDICES	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Escala valores evaluación	4
2. Niveles aumento de vida esperada con reducción IRI	15
3. Relación IRI vida esperada	15
4. Valores subtramo 1, carril derecho	23
5. Valores subtramo 1, carril izquierdo	23
6. Valores subtramo 2, carril derecho	23
7. Valores subtramo 2, carril izquierdo	24
8. IRI, subtramo 2, base granular imprimada	29
9. IRI, subtramo 1, base negra	30
10. IRI, subtramo 2, base negra	30
11. IRI, subtramo 1, carpeta de rodadura	32
12. IRI, subtramo 2, carpeta de rodadura	32
13. IRI promedio, carpeta rodadura	33
14. Incremento V.E. teórico	34

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración	Página
1. AASHO Road Test	3
2. Valores típicos para distintos tipos de estructuras de pavimentos	7
3. Colocación de sensores	10
4. Sensor láser	11
5. Acelerómetro	12
6. Conexión del medidor de distancia en la rueda delantera	13
7. Secciones homogéneas	19
8. Pavimentadora	37

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHO:	American Association of State Highway Officials
AASHTO:	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM:	American Society of Testing and Materials
CBR:	California Bearing Rate
DMI:	Distance Measuring Instrument
DOT:	Department of Transportation
FHWA:	Federal Highway Administration
IRI:	International Roughness Index
IRRE:	International Road Roughness Experiment
PSI:	Present Serviceability Index
PSR:	Present Serviceability Rating
RARS₈₀:	Reference Average Rectified Slope
RN:	Ride Number
RQCS:	Reference Quarter Car Simulation
RSP:	Road Surface Profiler
RTRRMS:	Response Type Road Roughness Measuring System

RESUMEN

Este trabajo de graduación consiste, en una breve descripción de uno de los tipos de equipo utilizados para la medición de la regularidad superficial (rugosidad) de pavimentos, y su aplicación en la medición de las tres capas superiores de una carretera de pavimento de concreto asfáltico de mezcla caliente. Se describe el procedimiento para la medición de la rugosidad del pavimento, en términos del IRI (Internacional Roughness Index) – IRI-, por medio de un perfilómetro tipo RSP (Road Surface Profiler). Primeramente se explica el origen y descripción del IRI y los ensayos que se llevaron a cabo para determinarlo. En este proyecto se midieron diferentes capas de una carretera a partir de la base imprimada, base negra y carpeta de rodadura.

Al final se discuten los resultados obtenidos, además de los resultados que se obtienen al graficar dichos parámetros contra la longitud del tramo ensayado.

El Perfilómetro Inercial con Sensores Láser -RSP- es el equipo utilizado para la medición de la rugosidad, este equipo mide el perfil longitudinal y transversal de la superficie de la carretera para calcular su rugosidad y despliega automáticamente parámetros como el IRI, *Ride Number* y Ahuellamiento. El RSP mide la rugosidad acumulada en términos de IRI en mm/m, m/km o pulg/mi, dependiendo el sistema a utilizar.

La importancia de la medición de la rugosidad de una carretera no se limita a la comodidad del usuario, la rugosidad también influye directamente en los costos de operación de los vehículos y efectos sobre las mercancías transportadas y cargas dinámicas aplicadas al pavimento. Los parámetros medidos con el RSP son utilizados para recepción de obra, control de calidad, estudios de factibilidad técnica-económica y para gerencia de pavimentos.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo, básicamente, se realiza la medición y obtención del Índice de Rugosidad Internacional IRI del PROYECTO CA – 14 TRAMO: EL RANCHO – LA CUMBRE. Se midieron las tres últimas capas de la carretera (base imprimada, base negra y carpeta de rodadura) con el fin de encontrar una relación que indique qué tanto mejora cada capa respecto a la previamente construida.

El IRI es la medida estándar internacional de la rugosidad¹ del perfil de una carretera.

Al controlar la adecuada construcción de cada capa de la carretera se puede llegar a un mejor resultado final, y uno de los objetivos de este trabajo es intentar comprobar que cada capa el IRI obtenido en subyacente tiene una gran influencia en el IRI final.

Si se llega a comprobar esto se puede mejorar el IRI de las carreteras. Esto llevará a una conducción más cómoda para el usuario. Sin embargo no será el único beneficio debido a que con esto se mejorará la seguridad en las carreteras, y se alargará la vida de las mismas.

¹ El término rugosidad proviene de la traducción del inglés al español de la palabra roughness. Aunque la traducción literal de esta palabra sea “rugosidad”, este término no se refiere a la textura propia del pavimento o de las capas medidas, sino que se refiere a la regularidad en el perfil longitudinal de la carretera. Aunque en alguna literatura en español se traduce Internacional Roughness Index como Índice de Regularidad Internacional, el término utilizado en Guatemala es Índice de Rugosidad Internacional, por lo que se decidió utilizar este término en este trabajo de investigación. Adicionalmente, debido a la connotación “negativa” que las palabras roughness o rugosidad tienen, en los últimos años se ha tratado de cambiar este término por “smoothness” o “suavidad”, que significa ausencia de rugosidad.

2. OBJETIVOS

2.1. General

Analizar cuánto mejora el perfil longitudinal de la carretera al ir colocando las capas superiores que conforman la estructura del pavimento. Obteniendo un parámetro de mejora de las carreteras para poder beneficiar al usuario a la vez que al constructor.

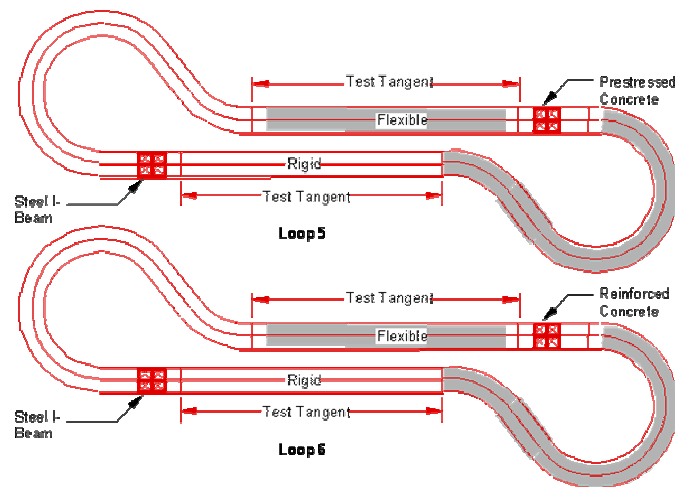
2.2. Específicos

- Establecer la mejora relativa del IRI entre capa y capa de la carretera de concreto asfáltico de mezcla caliente.
- Establecer los puntos críticos durante la construcción de una carretera de concreto asfáltico de mezcla caliente para la rugosidad de la misma.
- Demostrar que un IRI bajo es beneficioso tanto para el conductor, el cual obtiene una mayor comodidad y seguridad al manejar, como para el gobierno, ya que la vida esperada del pavimento puede prolongarse.

3. ÍNDICE DE RUGOSIDAD INTERNACIONAL

En los años 50 la AASHO (*American Association of State Highway Officials*) empezó a interesarse en la cuantificación de la capacidad que tiene un pavimento para cumplir su función principal que es servir al público que circula sobre él. Realizando ensayos de la condición de la superficie de pavimentos de prueba en el AASHO Road Test

Ilustración 1² – AASHO Road Test



surgió el término PSR (*Present Serviceability Index*, Grado de Serviabilidad Presente), el cual se realizó por medio de una evaluación subjetiva, realizada por un grupo de expertos en pavimentos.

La evaluación fue realizada conforme a la siguiente escala de calidad/comodidad al conducir sobre la superficie del pavimento:

²http://training.ce.washington.edu/WSDOT/Modules/06_structural_design/aasho_road_test_files/image002.gif

Tabla 1 - Escala valores evaluación

0-1	Muy malo
1-2	Malo
2-3	Regular
3-4	Bueno
4-5	Muy bueno

Este informe fue simplificado y se estableció el Índice de Serviciabilidad Presente (PSI, *Present Serviceability Index*), el cual está en función de la rugosidad y los daños o fallas del pavimento.

El PSI fue originalmente definido tanto para pavimentos flexibles como para pavimentos rígidos, como se indica a continuación:

Para pavimentos flexibles

$$PSI = 5.03 - 1.91 * \log(1 + SV) - 1.38RD^2 - 0.01\sqrt{C + P} \quad (1)$$

Para pavimentos rígidos

$$PSI = 5.41 - 1.78 * \log(1 + SV) - 0.09\sqrt{C + P} \quad (2)$$

Donde:

- PSI = Índice de serviciabilidad presente
- SV = Promedio de la variación de la pendiente
- RD = Profundidad media del ahuellamiento
- C = Área con agrietamientos del tipo cuero de lagarto
- P = Baches

A partir de este concepto surgió una gran cantidad de aparatos y equipos para la medición del PSI que actualmente se pueden agrupar, según su forma de operación, en dos tipos de sistemas:

- Sistemas inerciales para medir el perfil de la carretera (perfilómetros).
- Sistemas que miden la respuesta de un vehículo a la rugosidad del pavimento.

Con el tiempo también surgieron varias escalas de medición, lo cual hizo muy difícil la comparación entre ellas. Esto hacía muy difícil que se pudieran compartir experiencias entre diferentes países.

En virtud de esta situación, a nivel internacional se vio la necesidad de desarrollar un índice que no dependiera del equipo o técnica elegida para la obtención de la geometría del perfil y que, al mismo tiempo, representara las percepciones de los usuarios cuando circulan en un vehículo. Estas necesidades dieron lugar a la realización del experimento internacional denominado IRRE (*International Road Roughness Experiment*), uno de cuyos frutos fue el desarrollo del concepto, definición y método de cálculo del IRI (*International Roughness Index*)

El Índice de Rugosidad Internacional a grandes rasgos es la acumulación del movimiento vertical que sufre la suspensión de una rueda (un cuarto de carro) cuando éste recorre la superficie a una velocidad de referencia de 80 km/h.

El interés para la medición de este parámetro (rugosidad) se debe, a que, éste es mucho más valorado por el usuario que la capacidad estructural, ya que esta última tan sólo la percibe en forma indirecta cuando hay deterioros en el pavimento, que interfieren con la comodidad del usuario cuando maneja.

3.1. Definición de rugosidad

La rugosidad es definida como la cantidad de desviaciones entre la superficie real de pavimento y una superficie plana teórica. Estas desviaciones poseen dimensiones características que afectan la dinámica del vehículo así como la calidad en el desplazamiento y cargas dinámicas, en el perfil longitudinal y transversal³. Otra definición es la distorsión de la superficie de pavimento que por medio de aceleraciones verticales afecta el desplazamiento del vehículo.

Algunos de los factores que afectan la rugosidad del pavimento son: las cargas de tráfico, efectos ambientales, materiales usados en la construcción y prácticas de construcción.

La rugosidad del pavimento ha sido identificada como el factor más relevante en los análisis comparativos entre la calidad del manejo en la carretera y los costos de usuarios; en efecto, tiene directa influencia en la comodidad del usuario; costos de operación de los vehículos (consumo de combustible, desgaste); efectos sobre las mercancías transportadas y en las cargas dinámicas transmitidas por los vehículos pesados.

En algunos países el cálculo del IRI afecta las concesiones de licitaciones. Es parte de ellas y el no cumplimiento del IRI especificado puede ser causa de multa o incluso puede ser causa de reconstrucción de un tramo.

3.2 Definición de IRI

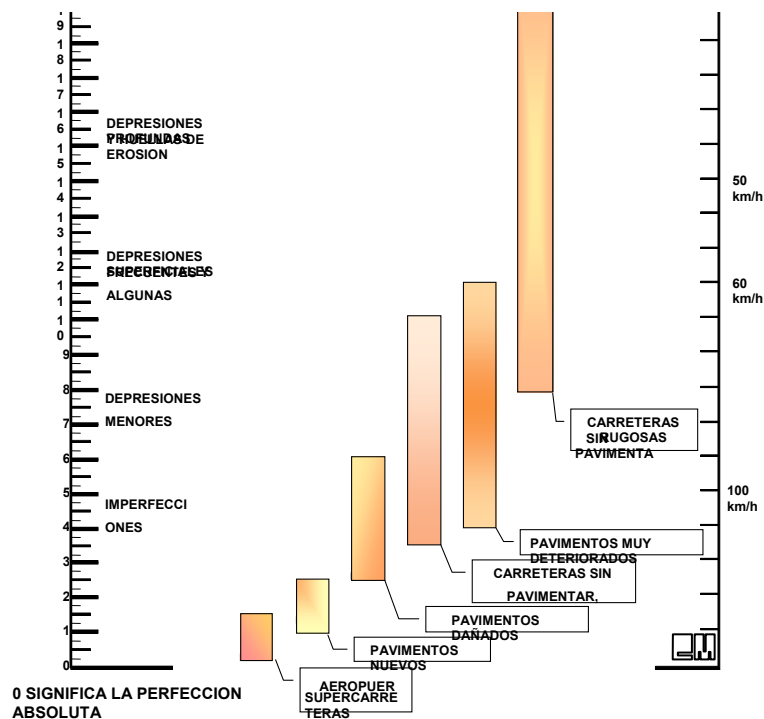
El IRI está definido como la propiedad del perfil real, y por lo tanto puede ser medido con cualquier perfilómetro válido.

³ American Society of Testing and Materials, norma E 867

<<El IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie del camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino en un auto de pasajeros típico. Está definido por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas ($RARS_{80}$, *Reference Average Rectified Slope*, razón entre el movimiento acumulado de la suspensión y la distancia recorrida) producto de la simulación del modelo del Cuarto de Carro, (RQCS, *Reference Quarter Car Simulation*), para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h. Es calculado a partir de las elevaciones de la superficie medidas mediante un levantamiento topográfico o perfilometría⁴>>.

Los valores de IRI se expresan como la variación acumulada del movimiento por unidad de longitud, es decir en mm/m (milímetros por metro), m/km (metros por kilómetro) o pulg/mi (pulgada por milla). La Figura 1 muestra los valores típicos de IRI para distintos tipos de estructuras de pavimento.

Ilustración 2 - Valores típicos para distintos tipos de estructuras de pavimentos



⁴ Paterson en 1986

El IRI, nombre técnico $RARS_{80}$, definido en forma más completa por Sayers en 1995, debe cumplir con las siguientes cinco condiciones:

- El IRI es calculado a partir de un solo perfil. El intervalo de muestreo del perfil deberá ser menor a 300 mm para cálculos precisos. La resolución requerida depende del nivel de rugosidad, necesitándose resoluciones más finas para pavimentos más lisos. Una resolución de 0.5 mm en la obtención del perfil es apropiada para todas las condiciones.
- Se asume que el perfil tiene una pendiente constante entre puntos contiguos de elevación.
- El perfil es primero suavizado mediante el uso de medias móviles cuyo largo base es de 250 mm. Esto es realizado por dos motivos: la idea es simular el comportamiento de la envolvente de los neumáticos y reducir la sensibilidad de la simulación del cuarto de carro al espaciamiento de muestreo del perfil longitudinal.
- El perfil suavizado es filtrado utilizando la simulación del cuarto de carro, RQCS, con sus parámetros específicos, a una velocidad de 80 km/h.
- El movimiento de la suspensión simulada es acumulado y dividido por el largo del perfil para así obtener el valor de IRI; es de esta forma que el IRI es expresado, generalmente en unidades m/km, mm/m o pulg/mi.

4. EQUIPO UTILIZADO EN LA MEDICIÓN DEL IRI

Uno de los equipos más modernos, utilizados para la medición de la rugosidad del pavimento es el perfilómetro inercial con sensores láser (*RSP, Road Surface Profiler*) modelo 5051 Mark IV L5.2+ fabricado por Dynatest, compuesto de 5 sensores y dos acelerómetros. De acuerdo con los certificados emitidos por la fábrica, este perfilómetro se clasifica como Clase 1 de acuerdo a la norma ASTM E 950.

Un Perfilómetro Clase 1 debe:

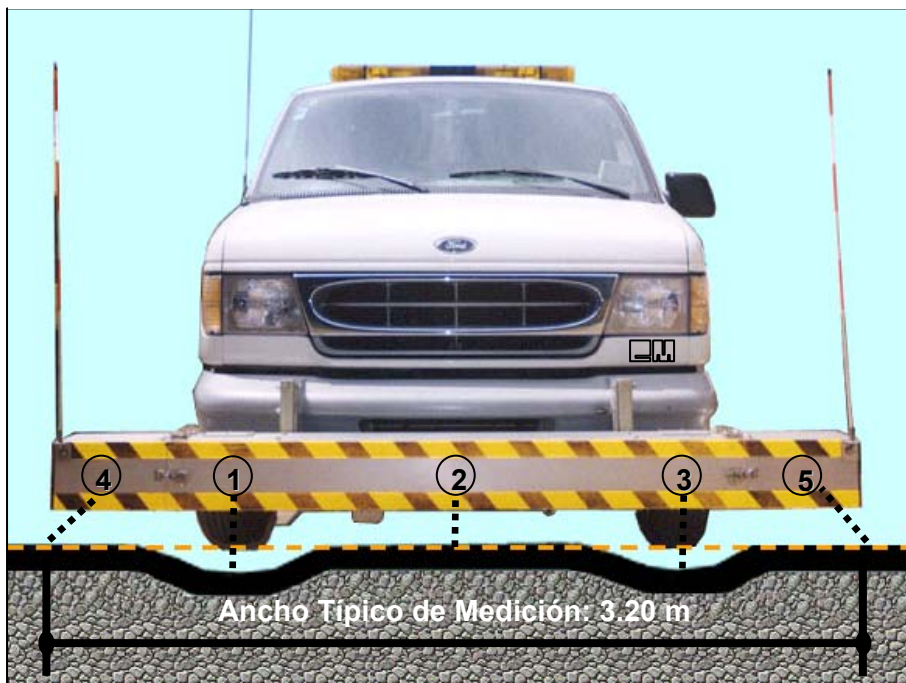
- Lograr recrear con una precisión tal que la desviación estándar sea menor de 2.5 mm (0.1 pulgadas) al realizar dos mediciones del mismo tramo.
- Lograr una medición tan exacta que al comparar el perfil obtenido por el equipo con el obtenido por nivelación topográfica, se obtenga una desviación menor a 2.5 mm (0.1 pulgadas).

4.1 Descripción del Perfilómetro inercial con sensores láser

Con el Perfilómetro Inercial con sensores láser –RSP- se puede medir con exactitud tanto el perfil longitudinal como transversal de una carretera. Esta información la recolecta para analizar el estado de la carretera. Con los datos obtenidos la computadora del RSP calcula y almacena parámetros tales como el IRI, Ride Number – RN- y el Ahuellamiento. Todos estos parámetros son calculados en tiempo real, es decir, conforme van siendo medidos a la velocidad de circulación.

Dentro de la viga del RSP se tienen instalados 5 sensores láser y 2 acelerómetros colocados estratégicamente para medir todo el ancho de la pista. Estos dispositivos miden, por triangulación, la distancia entre la viga del RSP y la superficie de la carretera.

Ilustración 3 - Colocación de sensores



Los sensores colocados en las posiciones 1, 2 y 3, son utilizados para la medición del IRI. Los sensores restantes, posiciones 4 y 5, son utilizados para la medición del ahuellamiento. Por lo que para obtener un perfil completo, longitudinal como transversal, del pavimento se deben utilizar las 5 posiciones en la viga.

Los dos acelerómetros se encuentran ubicados en la posición de los sensores láser 1 y 3, los cuales se encargan de convertir la aceleración vertical en una medida de referencia inercial. El RSP posee además un medidor de distancia DMI (*Distance Measurement Instrument*).

4.1.1 Componentes Perfilómetro inercial con sensores láser (RSP).

Cinco sensores, tal como el que se muestra en la Ilustración 3, componen el perfilómetro inercial. Estos sensores son de tipo láser. Dos acelerómetros forman parte del equipo del RSP, estos tienen la función de realizar una medición continua de las variaciones de la superficie, las cuales pueden ser procesadas en tiempo real. Estas son convertidas en valores de rugosidad expresados en términos del Índice de Rugosidad Internacional, IRI, ya sea en mm/m o m/km, así como en valores de la variación del perfil transversal, ahuellamiento, en milímetros.

4.1.1.1 **Sensores Láser.** Los sensores láser están colocados de tal manera que se tenga un sensor al centro de la pista, uno bajo la huella de cada una de las llantas y dos inclinados en cada extremo. De esta forma se puede cubrir todo el ancho de la pista.

Ilustración 4 – Sensor láser



Fuente: Dynatest 5051 Mark III/IV Road Surface Profiler Test Systems-Owner's Manual. Version 1.08. Dynatest International 2005

Se requiere de 3 sensores, debido a que las distancias al suelo por medio de triangulación. Este tipo de sensor mide la distancia vertical del vehículo a la carretera por medio de un punto de luz invisible que es proyectado sobre la superficie de la carretera, este punto es reflejado a través de un lente a un sensor de desplazamiento sensible a la luz. El punto de luz láser o marca del sensor, mide normalmente de 1 a 5 mm (0.04 a 0.20 pulgadas) de diámetro.

Las investigaciones han mostrado que es necesario que los sensores tengan una resolución, unidad de distancia más pequeña que puede ser medida con precisión, de por lo menos 0.5 mm (0.02 pulgadas) para obtener perfiles que sean lo suficientemente exactos para ser usados en el cálculo del IRI y del *Ride Number*.

4.1.1.2 **Acelerómetro.** El acelerómetro, como el mostrado en la Figura 4, tiene la función en un Perfilómetro de establecer una referencia inercial, de la cual se puedan lograr medidas de la altura. La aceleración vertical medida por el acelerómetro es integrada dos veces para establecer su posición vertical. Los acelerómetros deben ser orientados verticalmente.

Ilustración 5 - Acelerómetro



Fuente: Dynatest 5051 Mark III/IV Road Surface Profiler Test Systems-Owner's Manual. Version 1.08. Dynatest International 2005

4.1.1.3 **Medidor de distancia (DMI).** El medidor de distancia, ver figura 5, debe ser capaz de medir exactamente la distancia longitudinal de la medición.

La ubicación de los lugares para acciones correctivas es determinada a partir de los datos del perfil. Por lo tanto, la medida exacta de la distancia longitudinal relativa a marcas fijas es muy importante.

Ilustración 6 – Conexión del medidor de distancia en la rueda delantera



5. ESPERANZA DE VIDA DEL PAVIMENTO DEPENDIENDO DEL IRI

Los esfuerzos actuales están dirigidos a convertir el IRI en una verdadera medida de las especificaciones del comportamiento del pavimento. Para relacionar el índice con aspectos cuantitativos medibles. Obviamente para lograr esto se deben formular ecuaciones para predecir el comportamiento. Una característica muy importante es la vida esperada o remanente del pavimento.

Para desarrollar un modelo matemático para obtener la esperanza de vida como función del IRI, primero se deben obtener datos sobre la esperanza de vida de diferentes pavimentos con diferentes IRI. Para esto se usaron datos del New Jersey Department of Transportation (NJDOT).

Basándose en el PSI y que éste tiene un comportamiento, se tomó la forma⁶

$$y = Ae^{-Bx^C}$$

Ecuación 3

En donde

Y = Valor IRI (m/km)

A = Vida máxima esperada

B y C = Constantes

⁶ Richard M. Leed, New Jersey Department of Transportation, October 23, 2001

Basándose en que, si una carpeta tuviera una rugosidad cero, su vida esperada se extendería de 10 años a 15 años. Debido a que este caso es imposible de alcanzar, los proyectos con las carpetas con menores rugosidades tendrán una extensión en vida de entre 2 y 3 años. Usando la Ecuación 3 para este modelo, se asume que $A = 15$. Para determinar B y C se necesitan dos puntos más.

La tabla a continuación fue publicada por la FHWA⁷.

Tabla 2 - Niveles aumento de vida esperada con reducción IRI según FHWA

Niveles de reducción de IRI			
	10%	25%	50%
Estado 1	8	20	39
Estado 2	3	9	18
Estado 3	5	11	23
Promedio	5.3	13.3	26.7

Para comprender y usar esta tabla se necesita conocer valores típicos tanto para el valor inicial del IRI como para la esperanza de vida. Basándose en que en New Jersey el valor IRI satisfactorio es de 1.18 m/km, y que los revestimientos o recapeos duran aproximadamente 10 años se puede construir esta tabla.

Tabla 3 - Relación IRI vida esperada

Cambio en IRI		IRI inicial	Cambio en vida	Vida esperada
%	m/km	m/km	%	Años
0	0	1.18	0	10
-10	-0.12	1.06	+5.3	10.5
-25	-0.3	0.88	+13.3	11.3
-50	-0.59	0.59	+26.7	12.7

⁷ M. Swanlund. Enhancing Pavement Smoothness. Public Roads, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Septiembre/ October, 2000. Paginas 20-22.

Realizando logaritmos y reorganizando la Ecuación se obtiene

$$\ln\left(-\ln\left(\frac{y}{15}\right)\right) = \ln B + \ln x$$

Ecuación 4

En donde

y = Vida esperada

B = Coeficiente

x = IRI (m/km)

Introduciendo puntos y cambiando x por IRI y por vida esperada (años) se obtiene.

$$V.E. = 15e^{-0.3278IRI^{1.284}}$$

Ecuación 5

En donde

V.E. = Vida esperada (años)

IRI = Índice Internacional de Rugosidad Inicial (m/km)

5.1 Disminución del IRI con el tiempo

Se utilizará esta ecuación⁸, basándose en el mismo concepto, que con una rugosidad cero se extenderán la vida durante 5 años.

⁸ Richard M. Leed, New Jersey Department of Transportation, October 23, 2001

$$IRI = A(t + B)^C$$

Ecuación 6

En donde

IRI = Índice Internacional de Rugosidad

A, C = Constantes

B = Vida esperada con valor IRI = 0

t = Tiempo en años desde construcción

B será 5. Para obtener los otros dos puntos se utilizarán los valores típicos inicial y final de un periodo de 10 años, IRI = 1.18 m/km en t=0 e IRI = 4.78 m/km en t = 10 años. Se obtiene

$$IRI = 0.1544(t + 5)^{1.264}$$

Ecuación 7

En donde

IRI = Índice Internacional de Rugosidad

t = Tiempo en años desde construcción

La base de este modelo es que, a menor IRI inicial, mayor vida esperada. Si por ejemplo se creara una carpeta con un IRI inicial de 4 tendría una vida esperada de 2.5 años sin embargo si se construyera con 2 tendría 7.5 años de vida.

6. APLICACIÓN PRÁCTICA

6.1. Generación de resultados

6.1.1. Conceptos básicos del IRI utilizados

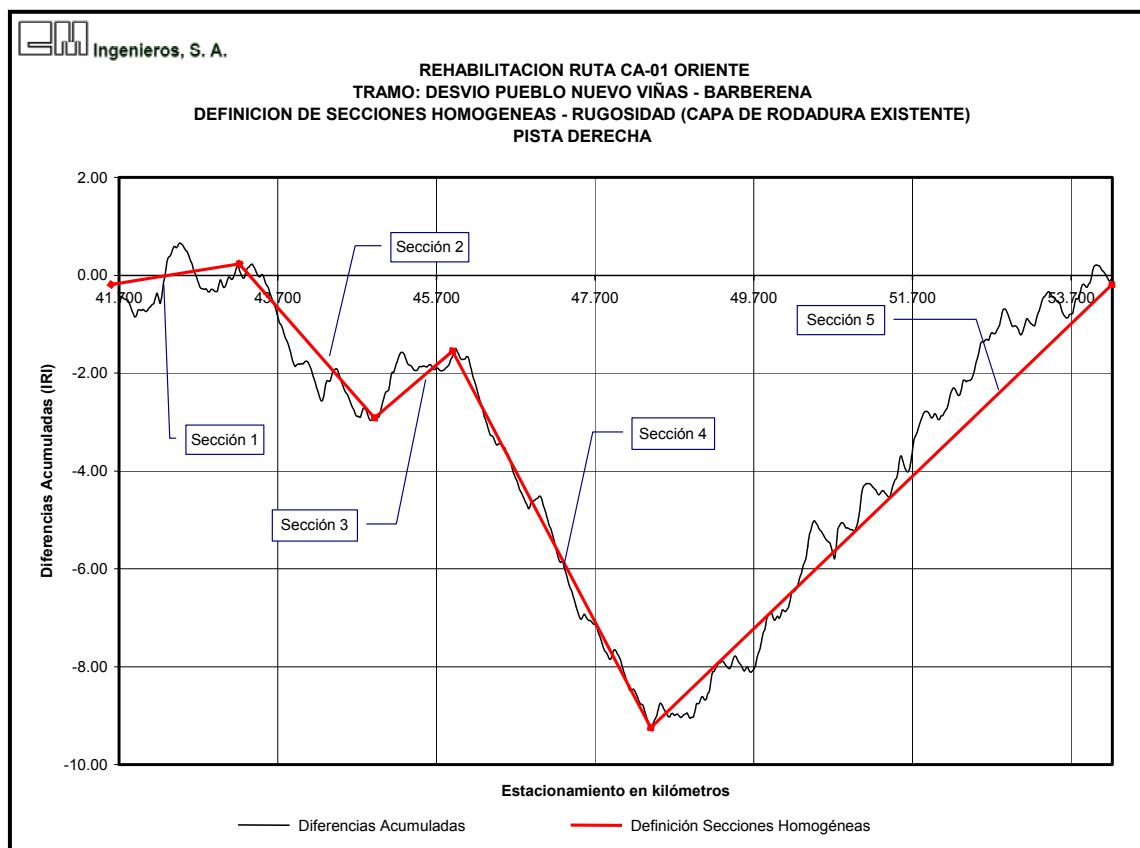
- Se debe comenzar la evaluación del perfil, 200m antes del inicio de este. De esta forma se evita afectar la respuesta del cuarto de carro, en el tramo de aceleración.
- Si las elevaciones del perfil aumentan al doble, el resultado del cálculo del IRI también aumentará al doble. Esto se debe a la proporción directa entre el calculo IRI y las elevaciones del perfil.
- El IRI calculado de dos secciones contiguas, es simplemente el promedio de los IRI de cada sección.

6.1.2. Definición de secciones homogéneas Para calcular algunas características del pavimento, que varían a lo largo de la longitud de la carretera, se utiliza las secciones homogéneas. Estas son secciones de pavimento de comportamiento similar.

En la Ilustración se muestra un ejemplo de secciones homogéneas, obtenidas por el método de sumas acumuladas.

Una de las aplicaciones de las secciones homogéneas es subdividir una longitud de pavimento en subsecciones razonablemente uniformes, cada una de las cuales puedan ser tratadas como un proyecto de rehabilitación independiente el uno del otro, esta decisión debe estar basada en el criterio ingenieril.

Ilustración 7 - Secciones homogéneas



El procedimiento estadístico utilizado para el análisis actual, es el de diferencias acumuladas AASHTO, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, contenido en el apéndice J de la AASHTO, *Guide for Design of Pavement Structures*, edición 1993.

Este análisis estadístico permite definir secciones homogéneas o de similar comportamiento. El parámetro a ser analizado es graficado contra la longitud de la carretera, y el total del área bajo la curva es calculado. La diferencia acumulada es calculada para cada punto, como la diferencia entre el área bajo la curva hasta el punto considerado, y el área promedio hasta el mismo punto.

$$A = \sum_{j=1}^n x_j (l_j - l_{j-1})$$

Ecuación 8

$$CD = \sum_{j=1}^n x_j (l_j - l_{j-1}) - \frac{A}{L} l_j$$

Ecuación 9

Donde:

A = es el área total bajo la curva

n = es el número de puntos

x_j = es el valor del parámetro al punto j

l_j = es la distancia al punto j

CD = es la distancia acumulada

L = es la distancia total

Una sección homogénea se define entre los puntos donde la pendiente de la diferencia acumulada cambia de signo. Puede hacerse una subdivisión en el límite basada en las consideraciones prácticas de construcción y en los límites para otros parámetros, tal como espesor de las capas de la carretera.

7. PROYECTO CA 14 EL RANCHO – LA CUMBRE

El proyecto CA 14, Tramo “El Rancho – La Cumbre” consistió en la rehabilitación de un tramo 47 km, con un carril en cada dirección, en los cuales se removió la carpeta de rodadura al nivel de la base granular, para luego colocar una capa de base negra y una capa de concreto asfáltico en caliente. Cuando se empezó a construir se decidió medir cada una de las capas bituminosas del pavimento colocadas sobre la base granular, con el fin de poder corregir a tiempo cualquier imperfección que hubiera en cada una de ellas. Como se mencionó anteriormente, estas imperfecciones pueden verse reflejadas en la carpeta de rodadura.

Aunque no es una práctica usual, a solicitud del contratista, se midió primero la capa de base granular imprimada, luego la capa de base negra y carpeta de rodadura. Debido a que se decidió medir la base granular imprimada, después de que casi toda la longitud de la base negra estuviera colocada, únicamente se midieron 2.11 y 2.12 km del lado derecho e izquierdo, respectivamente. La capa de base negra se pudo medir una longitud más larga, fueron 28 y 35 km para lado derecho e izquierdo respectivamente. Otra vez la razón de no poder medir todo el proyecto fue debido a razones constructivas. Afortunadamente la carpeta asfáltica sí se pudo medir en toda la longitud.

7.1. Resultados obtenidos

Como se mencionó anteriormente, no se pudo medir toda la longitud del proyecto en todas las capas. Debido a razones constructivas la capa de base negra carril derecho e izquierdo se midió en tres subtramos diferentes, la carpeta asfáltica se midió en cuatro subtramos en días diferentes (conforme se

terminaba la construcción). Para fines de cálculos de secciones homogéneas, se tomo cada segmento como un proyecto por separado, debido a que no necesariamente iban a dar resultados similares.

Los valores y las gráficas de las secciones homogéneas, son presentados en los anexos A y B respectivamente.

7.1.1. Metodología. Debido a razones constructivas no se pudo medir toda la longitud del proyecto en las tres capas. Para poder realizar un análisis comparativo se decidió, dividir el proyecto en dos subtramos. El subtramo 1, el cual inicia en la estación 96+500 y finaliza en la estación 110+020, con una longitud de 13.52 km, se comparan datos de la carpeta de rodadura y de la base negra, en ambos carriles.

El subtramo 2 empieza en la estación 110+020 y termina en la estación 112+829, con una longitud de 2.8 km. En este carril se midieron las tres capas (base granular imprimada, base negra y carpeta de rodadura) para ambos carriles.

7.1.2. Tablas de resultados obtenidos. En esta sección se incluye un resumen de los resultados obtenidos para la medición de cada subtramo, de las distintas capas en cada carril.

7.1.2.1. Tablas de resultados obtenidos Subtramo 1. Resultados obtenidos de la carpeta de rodadura y base negra, carril derecho.

Tabla 4 - Valores subtramo 1, carril derecho

Capa	Estación inicio	Estación fin	Longitud (km)	IRI Promedio (m/km)	Desviación Estándar (m/km)	Promedio + Desv Estan (m/km)
Carpeta Asfáltica	96.500	110.020	13.520	1.02	0.29	1.31
Base Negra	96.500	110.020	13.520	1.30	0.47	1.77

Resultados obtenidos de la carpeta de rodadura y base negra, carril izquierdo

Tabla 5 - Valores subtramo 1, carril izquierdo

Capa	Estación inicio	Estación fin	Longitud (km)	IRI Promedio (m/km)	Desviación Estándar (m/km)	Promedio + Desv Estan (m/km)
Carpeta Asfáltica	96.500	110.020	13.520	0.99	0.30	1.30
Base Negra	96.500	110.020	13.520	1.23	0.44	1.66

7.1.2.2. Tablas de resultados obtenidos Subtramo 2

Resultados obtenidos de la carpeta de rodadura, base negra y base granular imprimada; carril derecho.

Tabla 6 - Valores subtramo 2, carril derecho.

Capa	Estación inicio	Estación fin	Longitud (km)	IRI Promedio (m/km)	Desviación Estándar (m/km)	Promedio + Desv Estan (m/km)
Carpeta Asfáltica	110.020	112.820	2.800	1.09	0.20	1.29
Base Negra	110.020	112.820	2.800	1.42	0.44	1.86
Base Imprimada	110.020	112.820	2.800	2.00	0.56	2.56

Resultados obtenidos de la carpeta de rodadura, base negra y base granular imprimada; carril izquierdo.

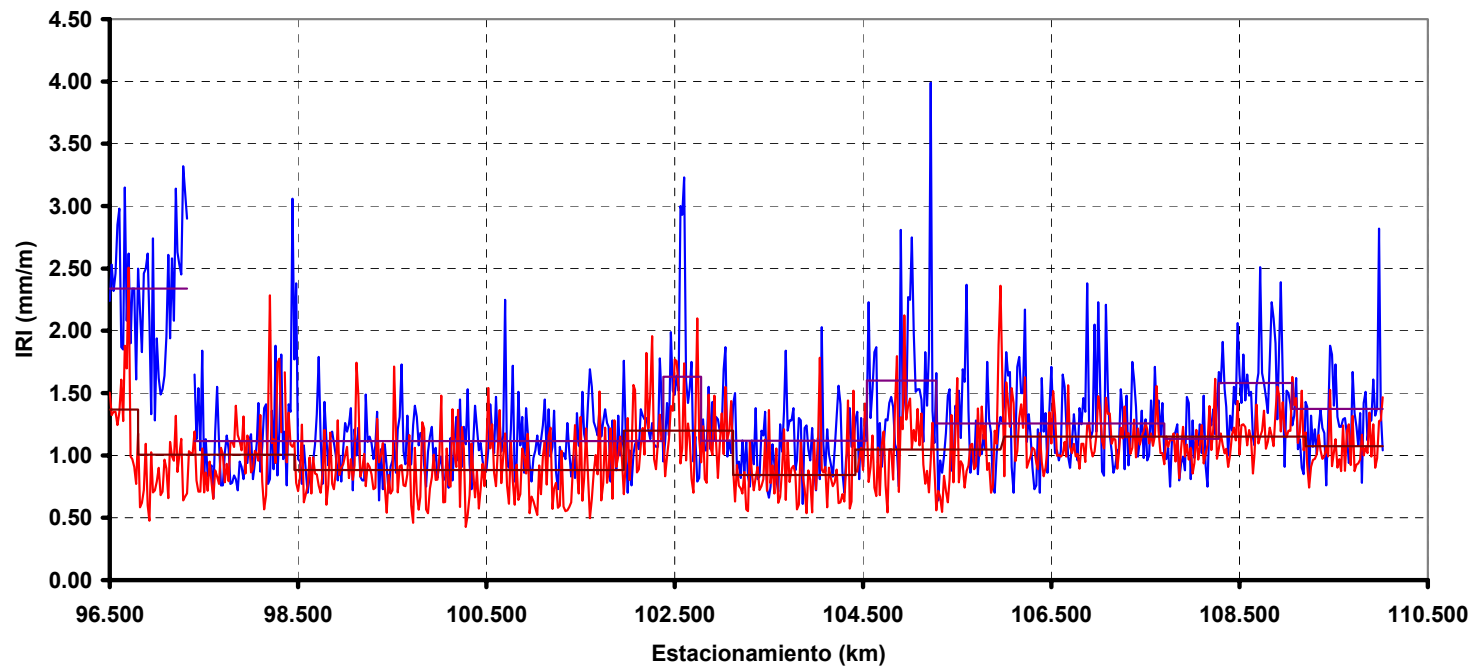
Tabla 7 - Valores subtramo 2, carril izquierdo

Capa	Estación inicio	Estación fin	Longitud (km)	IRI Promedio (m/km)	Desviación Estándar (m/km)	Promedio + Desv Estan (m/km)
Carpeta Asfáltica	110.020	112.820	2.800	1.01	0.26	1.27
Base Negra	110.020	112.820	2.800	1.44	0.41	1.85
Base Imprimada	110.020	112.820	2.800	2.11	0.60	2.71

7.1.3. Gráficas de resultados obtenidos

7.1.3.1 Gráficas de resultados obtenidos Subtramo 1

Grafica 1, IRI – subtramo 1 – carril derecho



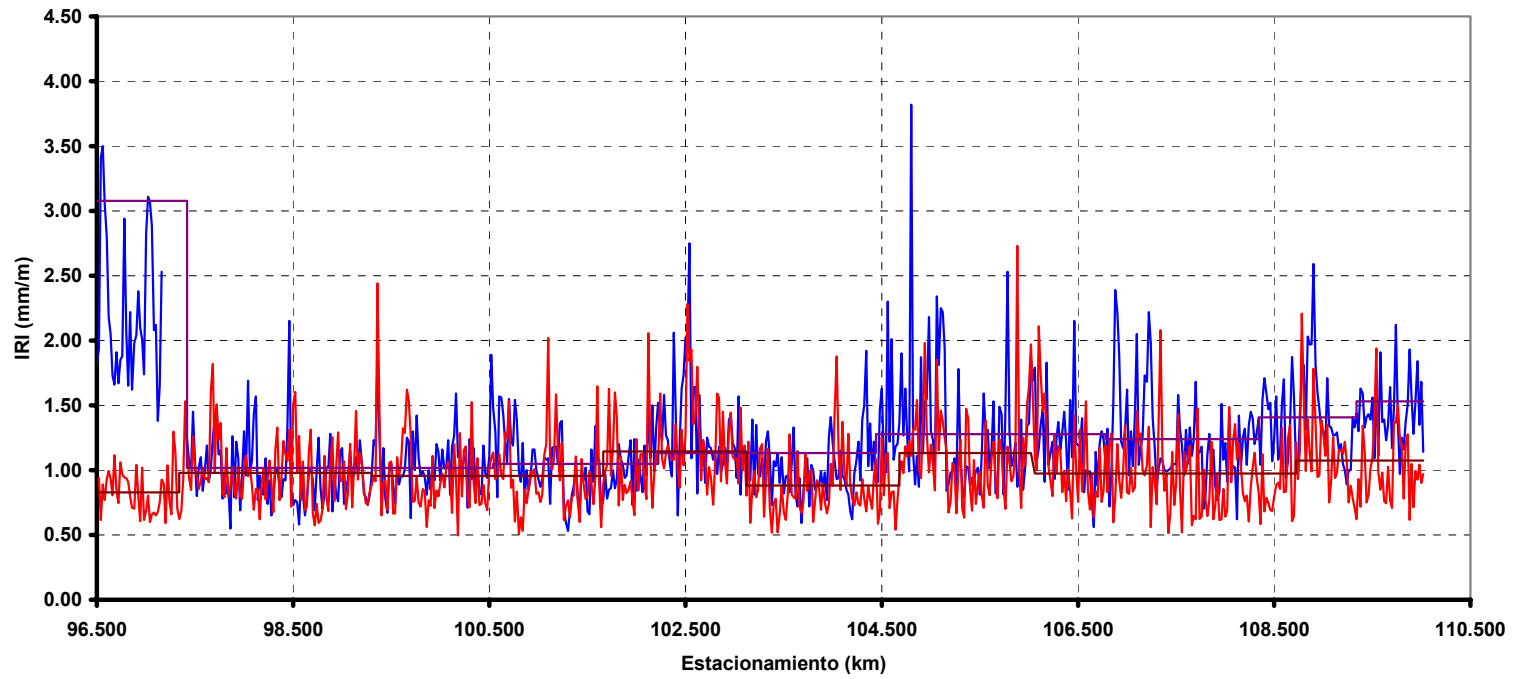
— Base negra

— Carpeta rodadura

— Prom base negra

— Prom CA

Grafica 2, IRI – subtramo 1 – carril izquierdo



— Base negra

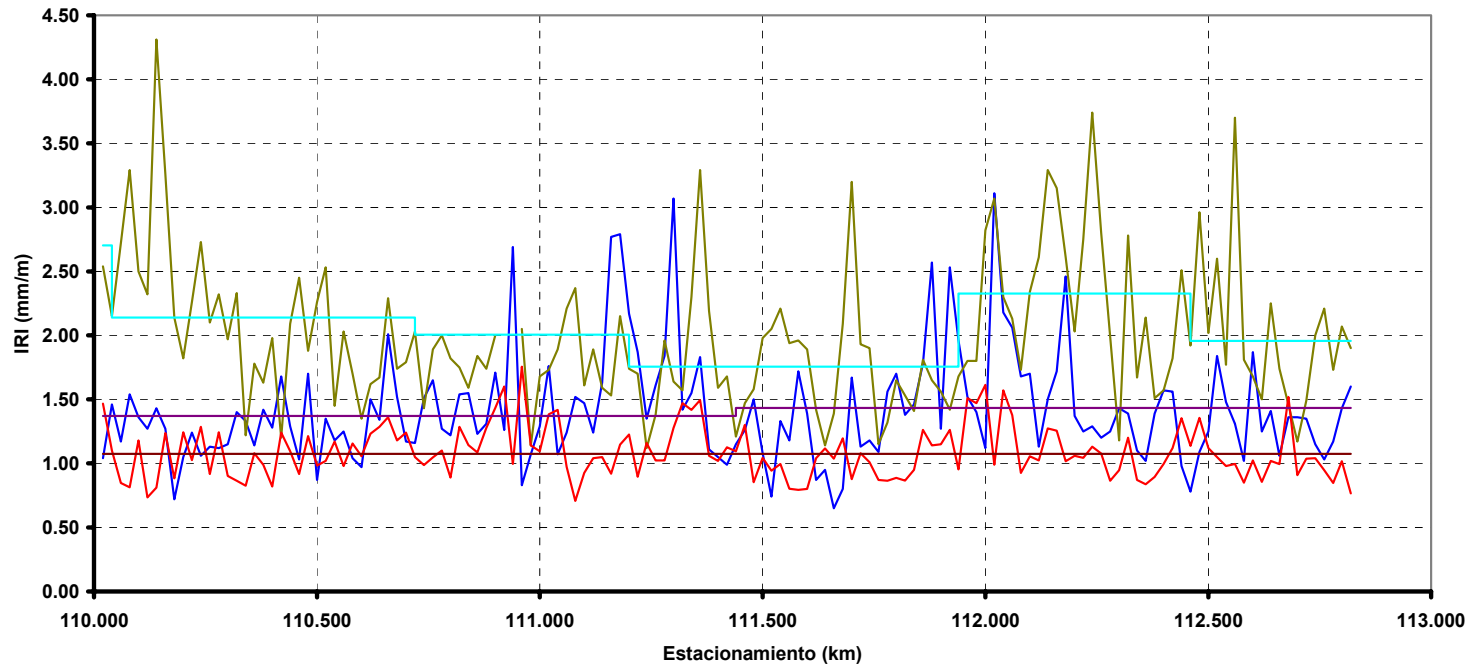
— Carpeta rodadura

— Prom base negra

— Prom CA

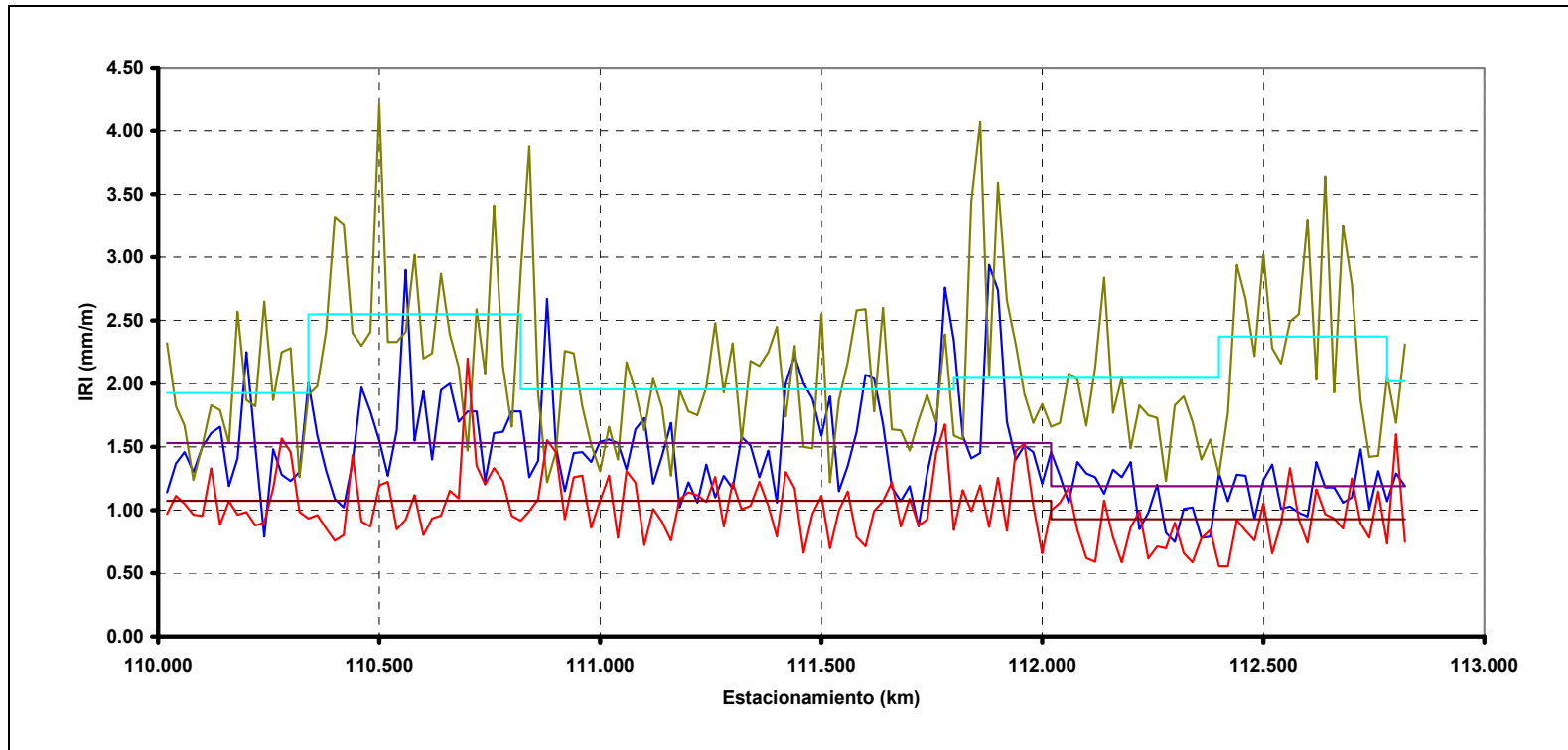
7.1.3.2 Gráficas de resultados obtenidos Subtramo 2

Grafica 3, IRI – subtramo 2 – carril derecho



— Base negra — Base imprimada — Carpeta rodadura
— Prom base negra — Prom base imp. — Prom CA

Grafica 4, IRI – subtramo 2 – carril izquierdo



Prom base negra

Prom base imp.

Prom CA

7.2. Análisis resultados obtenidos

Para obtener un indicador de la variabilidad de los resultados obtenidos en la medición de una misma capa, la AASHTO⁹, recomienda utilizar el Coeficiente de Variación (CV) como se indica a continuación:

$$CV = \frac{\text{desv.est.}}{\text{prom}} * 100$$

Ecuación 10

7.2.1. Base imprimada

Tabla 8 - IRI , subtramo 2, base granular imprimada

Carril	Estación inicio	Estación fin	Longitud (km)	IRI Promedio (m/km)	Desviación Estándar (m/km)	CV
Derecho	110.020	112.820	2.800	2.00	0.56	28
Izquierdo	110.020	112.820	2.800	2.11	0.60	29

Analizando los datos obtenidos se puede ver que en ambos carriles la base imprimada muestra los valores IRI más altos, como es de esperarse. En el carril derecho los valores van desde 1.12 m/km hasta 4.31 m/km con un promedio de 2.00 m/km. Estos datos tienen una desviación estándar de 0.56 m/km.

El valor de CV obtenido para el carril derecho es de 28, lo cual, según la guía AASHTO, indica que la variabilidad está en un valor aceptable (<30).

⁹ AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, edición 1993

El carril izquierdo muestra resultados similares a los del carril derecho. En este caso los valores varían entre 1.22 m/km y 4.21 m/km, y existe un promedio de 2.11 m/km una desviación estándar de 0.60 m/km. Al dividir el valor de la desviación estándar se encuentra un valor de 29, el cual es menor de 30.

7.2.2. Base negra

Tabla 9 - IRI, subtramo 1, base negra

Carril	Estación inicio	Estación fin	Longitud (km)	IRI Promedio (m/km)	Desviación Estándar (m/km)	CV
Derecho	96.500	110.020	13.520	1.30	0.47	37
Izquierdo	96.500	110.020	13.520	1.23	0.44	36

Tabla 10 - IRI, subtramo 2, base negra

Carril	Estación inicio	Estación fin	Longitud (km)	IRI Promedio (m/km)	Desviación Estándar (m/km)	CV	% Mejora Capa subyacente
Derecho	110.020	112.820	2.800	1.42	0.44	31	41%
Izquierdo	110.020	112.820	2.800	1.44	0.41	29	46%

La base negra es una capa compuesta generalmente con un material cuya consistencia facilita la obtención de un IRI más bajo. En esta capa se pudo medir una longitud más representativa del valor IRI del proyecto, así como de su relación o influencia en la capa de rodadura.

En el subtramo 1 se observaron valores entre 0.78 m/km y 3.99 m/km. El valor promedio fue de 1.30 m/km y la desviación estándar de 0.47 m/km. El valor CV = 37. El valor de CV para esto es más alto de lo recomendado por la AASHTO. En el caso del subtramo 1 carril izquierdo, la base negra tiene un promedio de 1.23 m/km lo cual es más bajo que el carril derecho. Se obtuvieron valores entre 1.01 m/km y 3.82 m/km. Este tramo tiene una desviación estándar

de 0.44 m/km. Cuando se analiza la variación de los datos se tiene un valor de 36.

El subtramo 2 presenta valores IRI de 1.42 y 1.44, para los carriles derecho e izquierdo respectivamente, con desviaciones estándar de 0.44 m/km y 0.42 m/km. El rango de valores para el carril derecho estuvo entre 0.65 m/km y 3.07 m/km, mientras que en el carril izquierdo los valores máximo y mínimo fueron de 0.79 m/km y 2.90 m/km. Al analizar los valores promedios de la capa de base negra contra los de la base granular imprimada, se puede observar una considerable disminución en los valores obtenidos. En este tramo se observó una mejora. A pesar de las dificultades constructivas, se obtuvo una mejora del 45% y 46 % para los carriles derecho e izquierdo entre esta capa y la base imprimada. El 50% es la mejora máxima teórica¹⁰.

Los valores de CV, al igual que en el subtramo 1, fueron altos. El carril derecho tuvo 31, y el izquierdo de 29. Estos todavía están dentro del rango recomendado por la AASHTO.

Aunque se podría intuir que los valores IRI de la capa de base negra serían más homogéneos, que los de la base granular imprimada, ya que se ejerce un mayor control sobre la construcción, así como los materiales de esta capa, este no fue el caso. Esto se puede deber al método constructivo que depende del suministro de la mezcla. Esta capa no es colocada de forma continua, no como la base granular, en donde se coloca todo el material y luego se compacta toda la longitud colocada.

El objetivo de medir capa por capa es analizar los valores IRI altos y bajos. La ubicación de estos puntos debe ser revisada, para encontrar la causa, y corregirla, en el caso de los valores altos. Los valores especialmente bajos pueden servir de guía para la construcción, por medio de la imitación.

¹⁰ Leed, 2001

7.2.3. Carpeta de rodadura de concreto asfáltico

Tabla 11 - IRI, subtramo 1, carpeta de rodadura

Carril	Estación inicio	Estación fin	Longitud (km)	IRI Promedio (m/km)	Desviación Estándar (m/km)	CV	% Mejora Capa subyacente
Derecho	96.500	110.020	13.520	1.02	0.29	29	27%
Izquierdo	96.500	110.020	13.520	0.99	0.30	30	23%

Tabla 12 – IRI. subtramo 2, carpeta de rodadura

Carril	Estación inicio	Estación fin	Longitud (km)	IRI Promedio (m/km)	Desviación Estándar (m/km)	CV	% Mejora Capa subyacente
Derecho	110.020	112.820	2.800	1.09	0.20	19	31%
Izquierdo	110.020	112.820	2.800	1.01	0.26	25	42%

El subtramo 1 carril derecho tuvo un valor promedio 1.02 m/km, el cual es un valor muy aceptable. El valor requerido, para la aceptación de carreteras en Guatemala es de 2.20¹¹ m/km. Los valores oscilan entre 0.48 m/km y 2.28 m/km, con un CV de 29. Nuevamente el contratista podría analizar donde se midieron valores altos, y la causa de estos. En el carril izquierdo se obtuvo un promedio de 0.99 m/km, similar al obtenido en el carril derecho. El valor mínimo medido es de 0.51 m/km, y el valor máximo es de 2.73 m/km. La desviación de 0.30 m/km y el calor de CV de 30, son similares al del carril derecho.

Se puede ver una mejora del 27% y 23% para ambos carriles entre esta capa y la capa de base negra. Esta mejora es notable, tomando en cuenta los valores promedio IRI obtenidos en la capa de base negra, los cuales son bajos.

¹¹ *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes*, de la Dirección General de Caminos, edición 2001

El subtramo 2 carril derecho tuvo un valor promedio 1.09 m/km, muy por debajo del requerido en Guatemala, para la aceptación de proyectos. Los valores oscilan entre 0.71 m/km y 1.51 m/km, con un CV de 19. En el carril izquierdo se obtuvo un promedio de 1.01 m/km. El valor máximo medido es de 2.20 m/km, y el menor de 0.55 m/km. La desviación estándar obtenida es de 0.26 m/km, y el valor CV 25. En este subtramo se obtuvieron mejoras del 31% y 42%, para ambos carriles respectivamente. Estas mejoras se acercan a las calculadas entre las capas subyacentes.

El CV de ambos subtramos no es representativo del mayor control de material que debe existir en la carpeta de rodadura, a la vez que el mayor cuidado en la construcción. La variación puede deberse, a que no se logra un ritmo continuo en la fundición de la carpeta de rodadura.

7.3. Esperanza de vida teórica obtenida

Para calcular la cantidad de años en los que probablemente se vera extendida la vida esperada de ambos tramos se utilizaran las fórmulas indicadas en la sección 5, de este trabajo.

Tabla 13 - IRI promedio, carpeta rodadura

Subtramo	Capa	Carril	IRI _{prom} (m/km)
1	Carpeta rodadura	Derecho	1.02
1	Carpeta rodadura	Izquierdo	0.99
2	Carpeta rodadura	Derecho	1.09
2	Carpeta rodadura	Izquierdo	1.01

Utilizando los valores IRI de la carpeta de rodadura, ver Tabla 13, se calculará con la Ecuación 5.

$$V.E. = 15e^{-0.3278IRI} IRI^{1.284}$$

En donde

V.E. = Vida esperada (años)

IRI = Índice Internacional de Rugosidad Inicial (m/km)

Al introducir los valores IRI promedios, en la ecuación se obtienen estos valores.

Tabla 14 - Incremento V.E. teórico

Subtramo	Carril	V.E. teórica (años)	Incremento V.E.	
			Años	%
1	Derecho	10.71	0.71	7%
1	Izquierdo	10.84	0.84	8%
2	Derecho	10.42	0.42	4%
2	Izquierdo	10.75	0.75	8%

La Tabla muestra el incremento probable en la vida esperada del pavimento. Se tomó en cuenta que la carretera haya sido diseñada para un periodo de vida de 10 años.

8. FACTORES CONSTRUCTIVOS QUE AFECTAN EL IRI

El IRI es un parámetro muy importante en una carretera, para el usuario es el más importante. Si se quiere obtener un valor IRI bajo, se deben seguir ciertos parámetros en la construcción.

Existe una gran cantidad de información sobre el tema, por lo que la Federal Highway Administration se dio a la tarea de recopilar la información y crear una guía de buenas prácticas, donde se resaltarán los puntos críticos y recomendaciones.

8.1. Planeación

El primer paso hacia un pavimento liso ocurre incluso antes de que empiece el proceso de construcción. Una buena planeación es base para conseguir el resultado deseado. Todos los involucrados en el proyecto contribuyen a la rugosidad del pavimento, desde el operador de la pavimentadora hasta el operador de la compactadora.

Antes de la construcción, todo el personal involucrado debe de ser educado en la importancia de la rugosidad del pavimento y del rol que toman en el logro de un pavimento lo menos rugoso posible. Con el conocimiento, la gente involucrada puede ayudar a reconocer puntos críticos en la construcción. Se recomienda una reunión pre- pavimentación para poder discutir responsabilidades así como posibles mejoras.

8.2. Comunicación

Después del inicio de la construcción es importante una comunicación

continua. La reunión pre – pavimentación es el inicio de la comunicación entre el contratista, la supervisora y la entidad contratante. Durante el proyecto, el intercambio de ideas y la discusión de problemas encontrados es vital. Es importante que cualquier problema sea comunicado lo más rápido posible al supervisor. Esto posibilitará una respuesta más rápida al problema y a la prevención de ocurrencias futuras.

8.3. Dinámicas de pavimentación

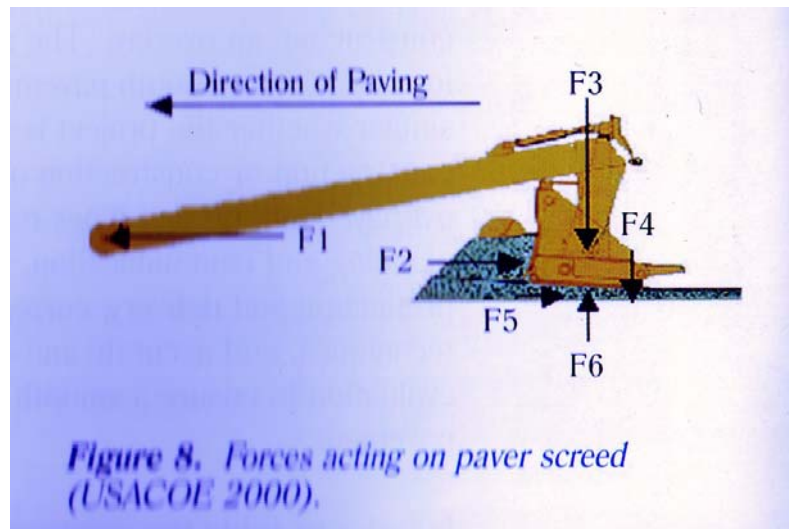
La dinámica de la pavimentadora de asfalto tiene un gran efecto en la rugosidad del pavimento de mezcla de concreto asfáltico en caliente. Por lo que es crítico entender las dinámicas básicas de ésta para entender el método apropiado de construcción.

Una pavimentadora consiste en dos componentes primarios: La unidad tractor y la unidad de agregados. La unidad tractor provee la energía para que los sistemas pavimentadores funcionen y provee la propulsión de la pavimentadora. La unidad del agregado está adjuntada al tractor por medio de pines, lo que permite un movimiento vertical libre. La faja de agregado provee la textura y compactación inicial del material.

Como se muestra en la figura, las siguientes fuerzas actúan sobre la pavimentadora:

- La fuerza remolcadora que se ejerce (F1).
- La resistencia de la mezcla asfáltica (F2).
- El peso de la faja de agregados (F3).
- La fuerza compactante aplicada por la faja de agregados (F4)
- Fricción entre el riel y los materiales debajo de este (F5).
- Resistencia vertical del material compactado (F6).

Ilustración 8 - Pavimentadora



Estas fuerzas buscan un equilibrio el cual controla el ángulo de la faja del agregado. Por lo que cuando las fuerzas se ven alteradas esto alterará el ángulo de la faja y la suavidad del pavimento se ve afectada.

La pavimentadora flotante fue desarrollada en 1930. Esta permite que las fuerzas sean equilibradas mientras que la pavimentadora encuentra cambios en el pavimento. El problema con esto es que la máquina flota en la mezcla fresca de asfalto. Cuando la pavimentadora va de una posición de parada hacia su velocidad de operación, la faja sube en un plano. Un cambio en la velocidad de la misma causará que el tren se eleve o descienda, mientras que la fuerza de la mezcla enfrente de la máquina cambie.

Esto quiere decir que una de las formas de asegurarse que el pavimento sea liso es asegurarse que las fuerzas que afectan a la pavimentadora se mantengan en equilibrio. Un manejo adecuado de la pavimentadora tiene un impacto inmenso en el acabado de la carpeta de rodadura.

8.4. Adecuada producción y suministro de la mezcla asfáltica

El requerimiento de la consistencia en la temperatura y graduación de la mezcla asfáltica en caliente es esencial para la rugosidad del pavimento. La mezcla debe ser producida bajo una temperatura constante para evitar efectos negativos en las fuerzas de la pavimentadora debido a variaciones en la viscosidad de la mezcla ocasionado por cambios de temperatura de la misma. Se debe producir y suministrar la mezcla asfáltica adecuada para minimizar la segregación (mezcla no uniforme caracterizada por la separación de agregado grueso y agregado fino). Un espesor uniforme del material detrás de la pavimentadora es requerido para la correcta construcción. Debido a que un esfuerzo de compactación uniforme es aplicado por la compactadora, diferencias en el espesor resultarán en elevación y baches en el perfil terminado del pavimento.

Se debe evitar largas demoras entre camiones suministradores de mezcla de concreto asfáltico y prevenir que la pavimentadora funcione con poco material y que se llegue al extremo de detenerla por falta del mismo. Cuando la pavimentadora se detiene completamente, la plancha se asienta y crea una deformación en la superficie colocada. Además, si la pavimentadora es detenida por suficiente tiempo, el material adelante de la plancha se puede enfriar haciendo que éste sea difícil de compactar, afectando de esta manera la rugosidad de la capa colocada.

Se debe tener cuidado para asegurar que el camión de volteo no golpee la pavimentadora cuando la mezcla sea transferida del camión a la tolva de alimentación, este contacto puede cambiar momentáneamente la velocidad de la pavimentadora y crear una deformación en la capa colocada.

8.5. Preparación y colocación de la mezcla asfáltica en caliente

Las capas subyacentes del pavimento de mezcla caliente afectan directamente el comportamiento y la rugosidad final de la carpeta de rodadura.

8.5.1. **Subrasante.** La subrasante provee una plataforma estable para que la base sea colocada sin deformidad alguna. Un CBR de 6 es aceptable para una subrasante. A veces se necesita de trituración o estabilización del material para proveer la graduación y estabilidad necesaria para la colocación de la base.

8.5.2. **Base.** El material de la base debe satisfacer los requerimientos de densidad, contenido de humedad y rugosidad. De lo contrario esta debe de ser re-trabajada o en caso necesario estabilizada para proveer una base correcta.

Se debe operar la pavimentadora a una velocidad continua que sea compatible con la producción y suministro de la mezcla para proveer la cantidad de material adecuada para el correcto funcionamiento de la pavimentadora. La superficie sobre la que se coloque la mezcla de concreto asfáltico deberá estar nivelada, limpia y estable.

8.6. Compactación

Se debe alcanzar la densidad especificada y mantener una superficie nivelada y regular. Es importante que el espesor colocado por la pavimentadora sea constante debido a que el esfuerzo de compactación aplicado por los rodos es uniforme y la diferencia en el espesor de las capas resultará en deformaciones o depresiones en el perfil después de compactar.

Al principio de cada proyecto se debe construir una pista de prueba para determinar el tipo y la cantidad de compactadoras apropiado para realizar dicha carpeta de concreto asfáltico. De esta forma se eliminarán cambios abruptos en la dirección de la compactadora y se evitará que ésta ruede entre material nuevo y ya compactado. Únicamente si la compactadora debe parar se debe colocar ésta sobre material ya compactado.

8.7. Construcción de juntas

Los puntos más débiles de un pavimento son las juntas de mezcla caliente. Existen dos tipos de juntas las transversales y las longitudinales. Las primeras se usan al final del día cuando se termina el trabajo, mientras que las longitudinales se usan cuando se construye al lado de una carpeta ya existente de pavimento.

Es práctica común crear la junta con material sobrante en la tolva. Esto es incorrecto debido a que el material enfrente de la tolva será reducido, causando que éste caiga y el espesor del material se vea reducido. Esto debilitará y aumentará la rugosidad del pavimento. Pavimentos débiles son propensos a deteriorarse prematuramente. Los dos tipos de juntas transversales son simples y estrechas.

8.7.1. **Junta simple.** Una junta simple puede ser usada cuando esta se verá expuesta a tráfico. Se requiere una gran cantidad de mano de obra en la construcción de la cara vertical de esta junta. El material adyacente a la junta es compactado colocando residuos en el borde. Este residuo es necesario para prevenir un borde redondeado que cause problemas al volver a pavimentar.

Debido a limitaciones constructivas de este tipo de junta la fuerza compactante ejercida en el material localizado en la junta es insuficiente para brindar una compactación adecuada. Este problema puede ser resuelto

removiendo el material poco compactado. Este método provee una junta suave y durable.

8.7.2. Junta estrecha. Una junta estrecha es construida pavimentando con un sobrante constante hasta el lugar de la junta. En la junta, la mezcla asfáltica que formará el sobrante es removido hacia el lado de tal forma que una orilla vertical sea formada. Después el sobrante es removido usando un rastrillo. Si la junta es temporal un forro de papel puede ser usado debajo de la porción de rampa con el fin de removerlo más fácilmente. Una junta estrecha puede ser construida también operando la pavimentadora hasta que no quede mezcla asfáltica en la tolva. Después se construye una rampa en el punto que la mezcla se vuelva no uniforme.

La mayor desventaja de este método es que la junta debe ser removida antes de reiniciar la pavimentación. Sin embargo esta junta está, por lo general, mejor compactada que la simple debido a que la compactadora puede compactar el material de la junta y después descender por el papel.

A pesar que las juntas longitudinales no repercuten grandemente en la rugosidad del pavimento, sí inciden en el comportamiento y durabilidad del mismo.

9. CONCLUSIONES

- La medición del IRI con el Perfilómetro Inercial con Sensores Láser, RSP, en cada capa bituminosa, ayudará a mejorar sustancialmente el IRI final obtenido en la carpeta de rodadura de una carretera, ya que ayuda a identificar lugares, que requieran de mejoras, en el caso de IRI muy altos, o bien pueden dar un parámetro de construcción en el caso de IRI muy bajos. Mejorando este aspecto se mejorará no sólo la comodidad del usuario, sino que la duración de las mismas con todas las ventajas que esto conlleva.
- Se obtuvieron mejoras significativas entre capa y capa de la carretera las cuales variaron entre el 26% y el 64%. Las mayores mejoras se obtuvieron entre la capa de base negra y el pavimento de mezcla asfáltica las cuales se mejoraron en un 50%. Debido a eso la vida esperada podría incrementar en un 7% para ambos carriles.
- Se debe poner atención a cada uno de los aspectos constructivos que afectan la obtención del IRI (capítulo 8) a fin de disminuir los valores obtenidos en las carpetas de rodadura de concreto asfáltico.

10. RECOMENDACIONES

- Llevar un control de calidad al construir la carretera, realizando mediciones sobre las distintas capas que conforman la estructura de un pavimento, cuando éstas sean capas estabilizadas, bituminosas o de concreto rígido, para poder hacer las correcciones necesarias a tiempo y que las lecturas del IRI en la carpeta de rodadura puedan estar dentro del rango requerido.
- Continuar realizando el banco de datos de medidas de rugosidad de la red vial pavimentada, por lo menos cada dos años, para que pueda ser utilizado para realizar estudios de factibilidad técnica-económica y, de esta forma, poder asignar prioridad a las obras y así optimizar los recursos.
- Aplicar sanciones a los contratistas si no se cumple con un IRI máximo requerido, asimismo, otorgar premios o bonificaciones si le logra un buen IRI. Este procedimiento es utilizado en Estados Unidos, Europa y otras partes del mundo.

11. BIBLIOGRAFÍA

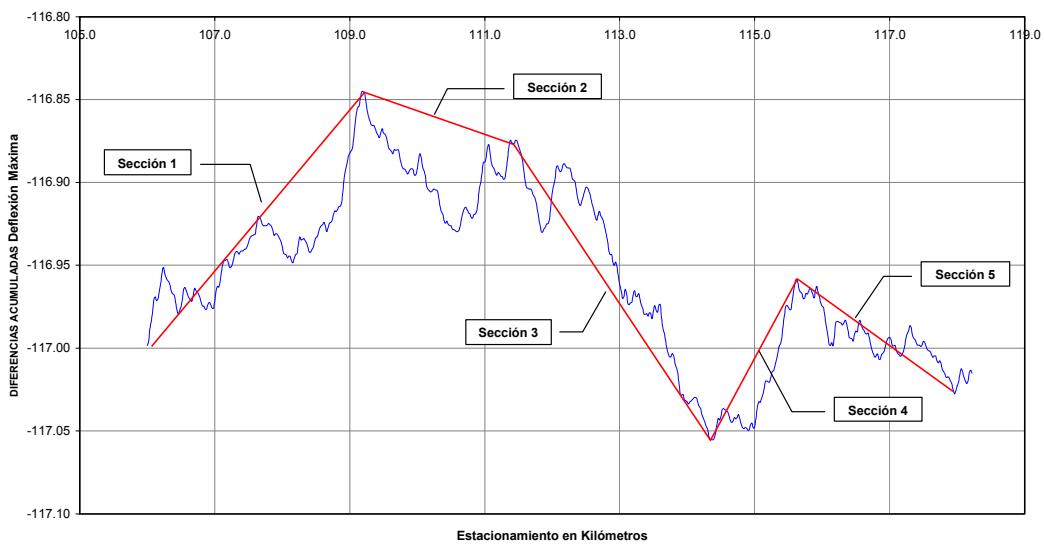
1. Carey, W.M., Irick, P.E. 1960. *The Pavement Serviceability Performance Concept*. HRB Bulletin 250, Highway Research Board. Washington, D.C. 512 págs.
2. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes*, 2001. Dirección General de Caminos.
3. *Guide for Design of Pavement Structures. Appendix J*. 1993 American Association for State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 75 págs.
4. Gillespie, T.D. "Everything you always wanted to know about the IRI, but were afraid to ask!". 1992. Meeting of the Road Profile Users Group. Lincoln, Nebraska. 85 págs.
5. Karamihas, S.M., et. al. *Guidelines for Longitudinal Pavement Profile Measurement*. 1999. NCHRP Report 434. Transportation Research Board. Washington D.C. 264 págs.
6. Kerall, Henry G.R. *Visión General de HDMIV. (Volumen 1)*. 2001 Washington D.C. 130 págs.
7. Paterson, W.D.O. et. al. *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*. 1986. World Bank Technical Paper No. 46. Washington D.C. 15 págs.
8. Pérez Guillén, Ranfis Virgilio. 1988. *Evaluación de Rugosidad en Pavimentos Flexibles Utilizando El Metro Mays*. Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala, 75 págs.
9. *Road and Paving Materials*. American Society of Testing and Materials 1999. Annual Book of ASTM Standards, Volume 4.03. Philadelphia, PA. 525 págs.
10. Sayers, M.W., S.M. Karamihas. "The Little Book of Profiling". 1998 Report from The University of Michigan Transportation Research Institute.
11. Sayers, W.D., T.D. Gillespie, W.D.O. Paterson. "Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements" 1986. World Bank Technical Paper No. 46. Washington D.C. págs 163.
12. Soto Nuñez, Benjamín. 2002, *Control de Calidad en Pavimentos*. Tesis Universidad Técnica Federico Santa María. Chile, Departamento de Obras Civiles. 75 págs.

12. APÉNDICE

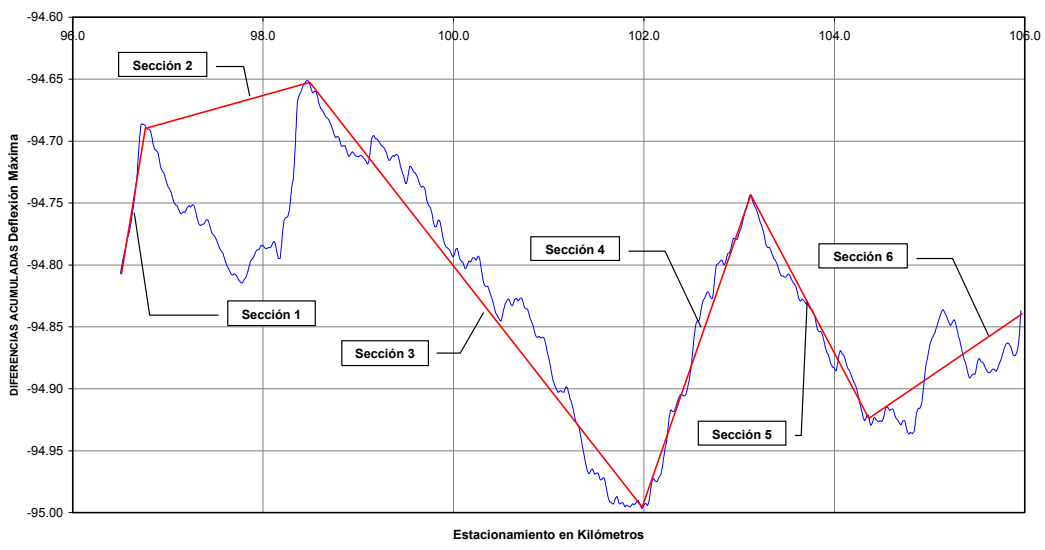
APÉNDICE A
GRÁFICAS DE SECCIONES HOMOGÉNEAS
PROYECTO CA – 14 TRAMO: EL RANCHO – LA CUMBRE

GRÁFICAS SECCIONES HOMOGÉNEAS CARPETA RODADURA CARRIL DERECHO

Gráfica 1, Deflexión máxima, estación 106+000 a Estación 118+240

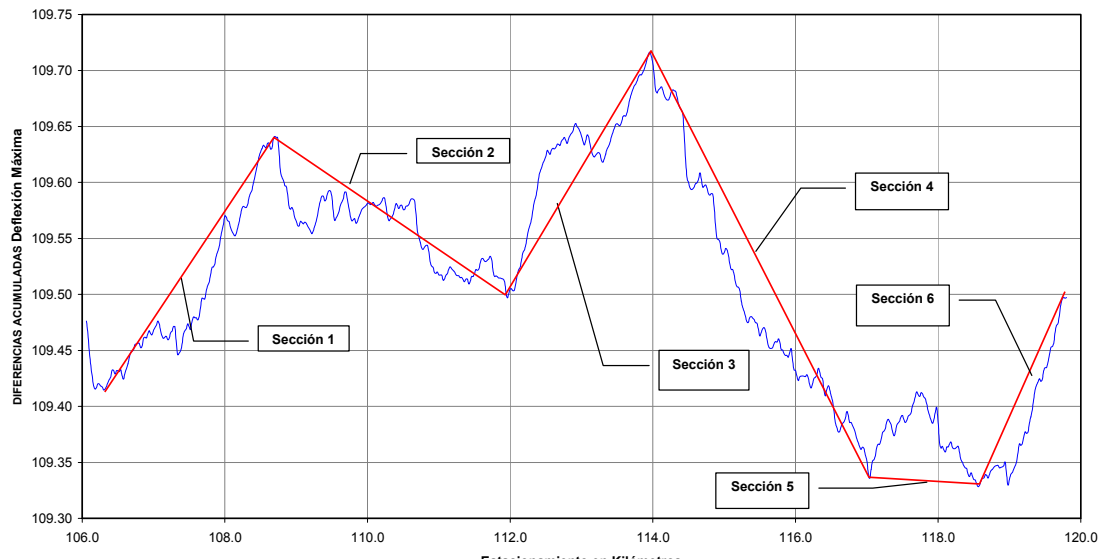


Gráfica 2, Deflexión máxima, estación 96+500 a estación 105+980

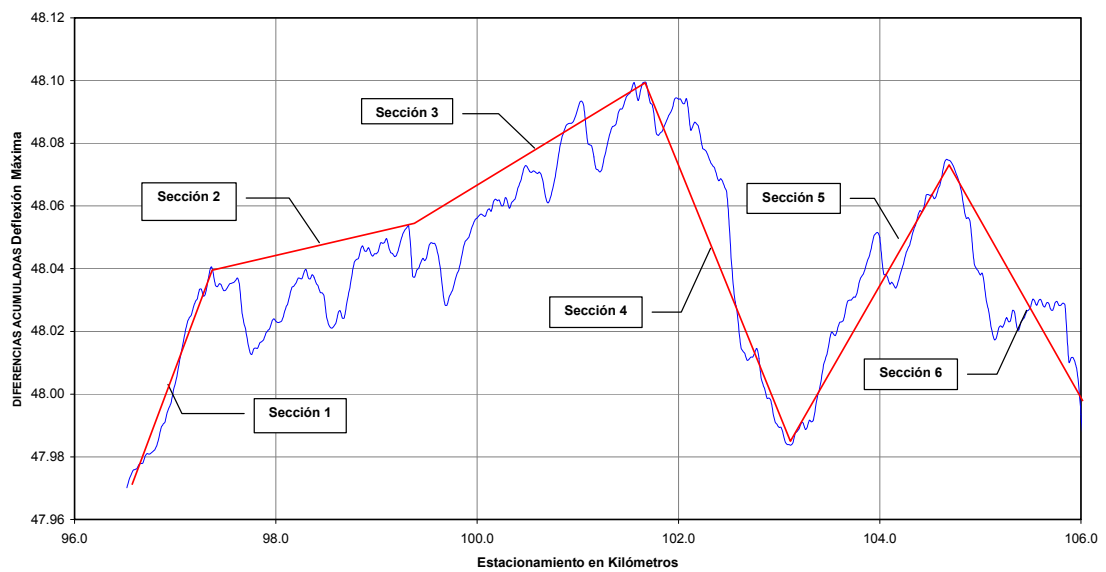


GRÁFICAS SECCIONES HOMOGÉNEAS CARPETA RODADURA CARRIL IZQUIERDO

Gráfica 3, deflexión máxima, estación 106+040 a estación 119+800

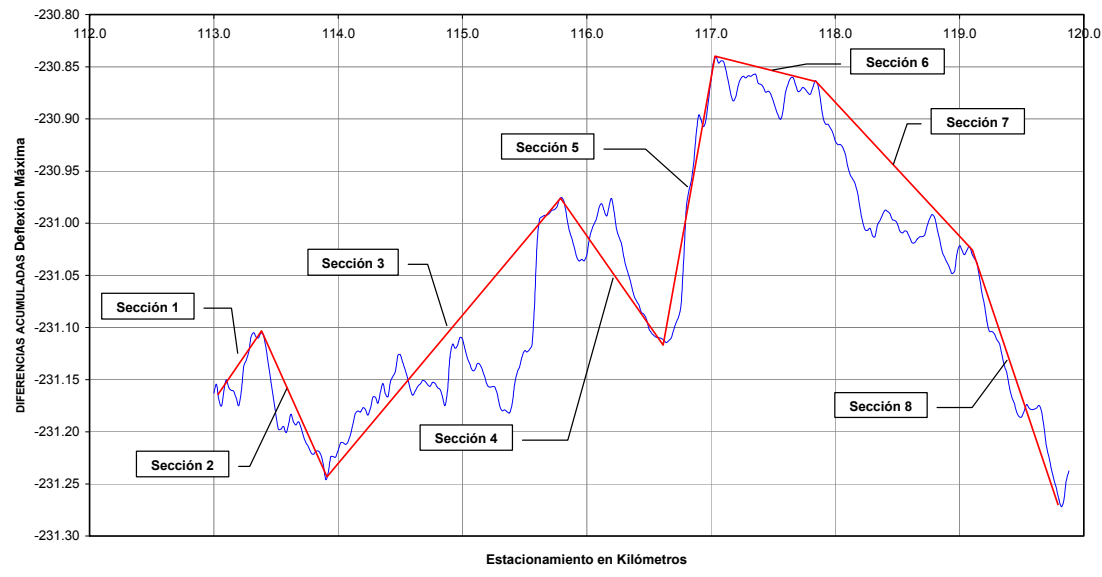


Gráfica 4, deflexión máxima, estación 96+480 a estación 106+020

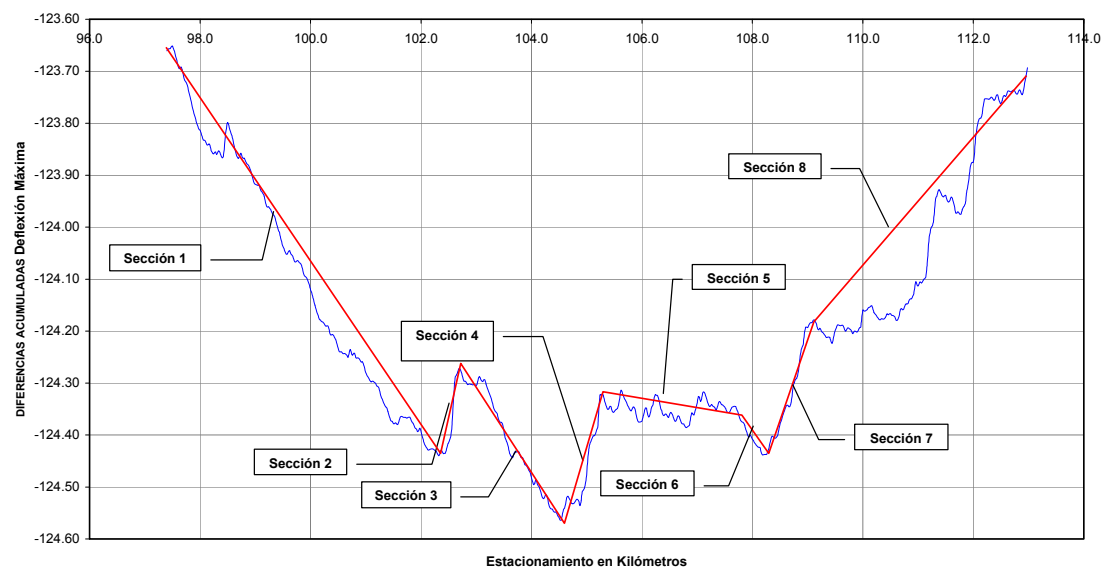


GRÁFICAS SECCIONES HOMOGÉNEAS BASE NEGRA, CARRIL DERECHO

Gráfica 5, deflexión máxima, estación 113+000 a estación 119+970

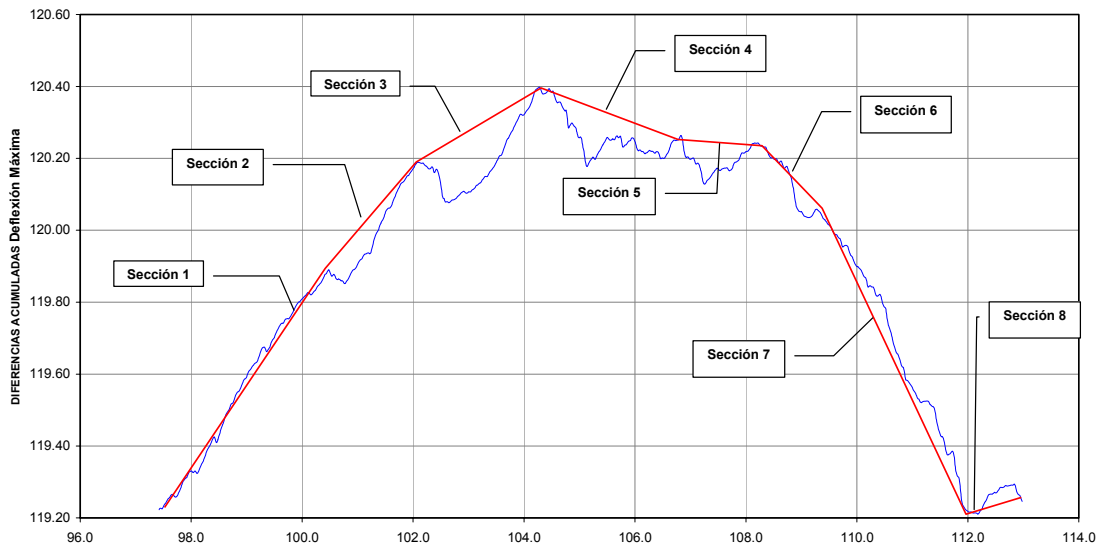


Gráfica 6, estación 97+400 a estación 113+000, carril derecho



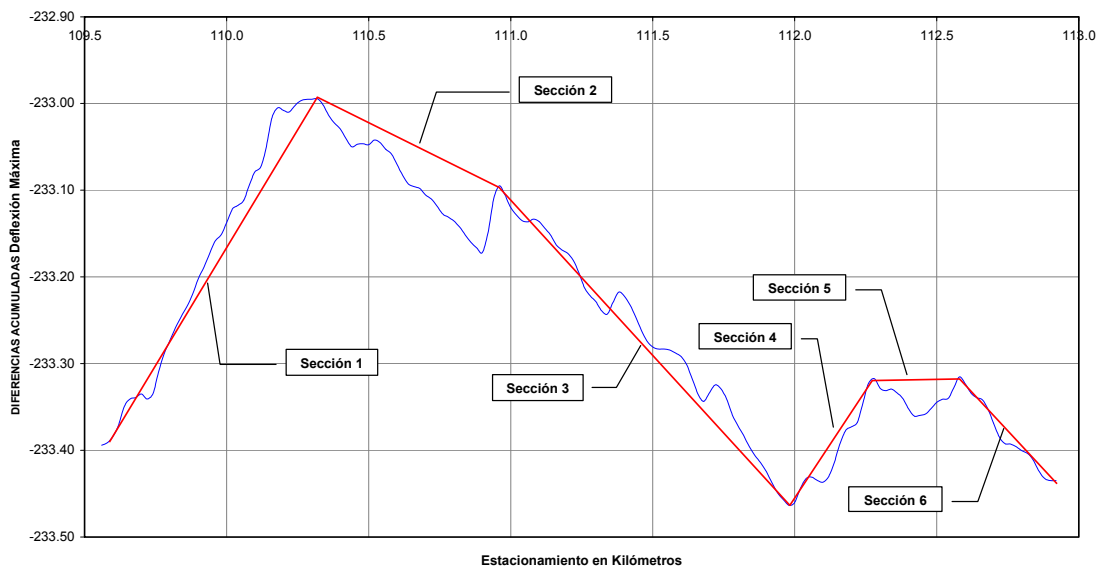
GRÁFICAS SECCIONES HOMOGÉNEAS BASE NEGRA, CARRIL IZQUIERDO

Gráfica 7, estación 97+400 a estación 112+980, carril izquierdo



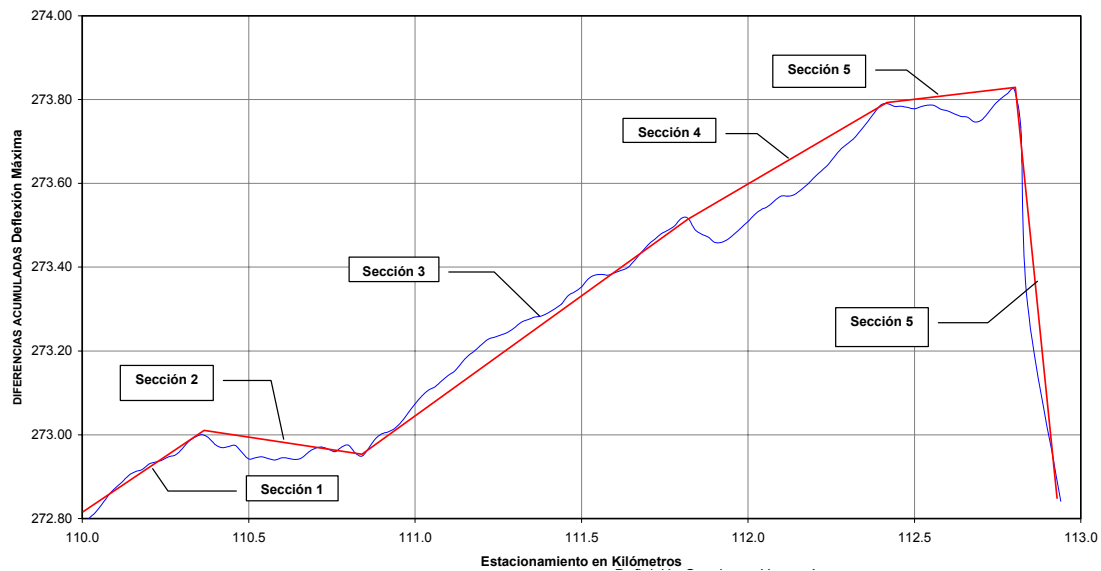
GRÁFICAS SECCIONES HOMOGÉNEAS BASE IMPRIMADA, CARRIL DERECHO

Gráfica 8, estación 109+560 a estación 112+920, carril derecho



GRÁFICAS SECCIONES HOMOGÉNEAS BASE IMPRIMADA, CARRIL IZQUIERDO

Gráfica 9, estación 110+000 a estación 112+980, carril izquierdo



APÉNDICE B
TABLAS VALORES IRI
SECCIONES HOMOGÉNEAS
PROYECTO CA – 14 TRAMO: EL RANCHO – LA CUMBRE

1. Tablas valores secciones homogéneas subtramo 1

1.1. Carril derecho

Base negra

Estación fin	Estación inicio	Longitud	Promedio	Desviación Estándar	Promedio + Desv Estan
95.520	97.360	1.840	2.34	0.80	3.14
97.400	102.400	5.000	1.12	0.30	1.42
102.400	102.790	0.390	1.63	0.69	2.32
102.790	104.560	1.770	1.12	0.27	1.39
104.560	105.300	0.740	1.60	0.61	2.22
105.300	107.720	2.420	1.26	0.36	1.61
107.720	108.300	0.580	1.13	0.23	1.37
108.300	109.080	0.780	1.58	0.35	1.93
109.080	111.460	2.380	1.37	0.41	1.78

Carpeta de rodadura

Estación fin	Estación inicio	Longitud	Promedio	Desviación Estándar	Promedio + Desv Estan
96.500	96.820	0.320	1.37	0.41	1.78
96.820	98.480	1.660	1.01	0.40	1.40
98.480	101.980	3.500	0.88	0.25	1.14
101.980	103.140	1.160	1.20	0.32	1.51
103.140	104.440	1.300	0.84	0.24	1.09
104.440	105.980	1.540	1.05	0.34	1.39
106.000	110.020	4.020	1.15	0.18	1.33

1.2 Carril izquierdo

Base negra

Estación fin	Estación inicio	Longitud	Promedio	Desviación Estándar	Promedio + Desv Estan
84.160	85.780	1.620	1.79	0.95	2.73
85.780	89.820	4.040	1.73	0.68	2.42
89.820	93.080	3.260	1.59	0.46	2.05
93.080	94.860	1.780	2.19	0.61	2.80
94.860	97.700	2.840	3.08	3.36	6.44
97.700	100.560	2.860	1.02	0.25	1.27
100.560	102.240	1.680	1.05	0.24	1.29
102.240	104.460	2.220	1.13	0.33	1.46
104.460	106.800	2.340	1.28	0.45	1.73
106.800	108.360	1.560	1.24	0.34	1.58
108.360	109.360	1.000	1.41	0.34	1.74
109.360	112.040	2.680	1.53	0.38	1.91

Carpeta de rodadura

Estación fin	Estación inicio	Longitud	Promedio	Desviación Estándar	Promedio + Desv Estan
96.500	97.360	0.860	0.83	0.17	1.00
97.360	99.320	1.960	0.98	0.25	1.22
99.320	101.680	2.360	0.96	0.29	1.25
101.680	103.140	1.460	1.14	0.33	1.47
103.140	104.700	1.560	0.88	0.23	1.11
104.700	106.040	1.340	1.13	0.36	1.49
106.040	108.740	2.700	0.97	0.29	1.27
108.740	112.040	3.300	1.07	0.27	1.34

2. Tablas valores secciones homogéneas subtramo 2

2.1 Carril derecho

Base granular imprimada

Estación fin	Estación inicio	Longitud	Promedio	Desviación Estándar	Promedio + Desv Estan
109.560	110.050	0.490	2.70	0.47	3.17
110.050	110.740	0.690	2.14	0.62	2.76
110.740	111.210	0.470	2.00	0.71	2.71
111.210	111.960	0.750	1.76	0.47	2.22
111.960	112.470	0.510	2.33	0.62	2.95
112.470	112.930	0.460	1.96	0.55	2.51

Base negra

Estación fin	Estación inicio	Longitud	Promedio	Desviación Estándar	Promedio + Desv Estan
109.080	111.460	2.380	1.37	0.41	1.78
111.460	113.000	1.540	1.43	0.44	1.87

Carpeta de rodadura

Estación fin	Estación inicio	Longitud	Promedio	Desviación Estándar	Promedio + Desv Estan
110.020	112.820	2.800	1.07	0.20	1.28

2.2 Carril izquierdo

Base Granular imprimada

Estación fin	Estación inicio	Longitud	Promedio	Desviación Estándar	Promedio + Desv Estan
110.000	110.360	0.360	1.93	0.39	2.32
110.360	110.840	0.480	2.55	0.64	3.18
110.840	111.820	0.980	1.96	0.51	2.47
111.820	112.420	0.600	2.05	0.66	2.71
112.420	112.800	0.380	2.37	0.60	2.98
112.800	112.940	0.140	2.02	0.31	2.33

Base negra

Estación fin	Estación inicio	Longitud	Promedio	Desviación Estándar	Promedio + Desv Estan
109.360	112.040	2.680	1.53	0.38	1.91
112.040	113.000	0.960	1.19	0.25	1.44

Carpeta de rodadura

Estación fin	Estación inicio	Longitud	Promedio	Desviación Estándar	Promedio + Desv Estan
108.740	112.040	3.300	1.07	0.27	1.34
112.040	113.980	1.940	0.93	0.22	1.15