MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y COMUNICACIONES
VICEMINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y COMUNICACIONES
DIRECCIÓN DE VIALIDAD

INFORME DE EVALUACIÓN DE PAVIMENTO

RUTA NACIONAL N° 6 "DR. JUAN LEÓN MALLORQUÍN"
TRAMO: ENCARNACIÓN – MINGA GUAZÚ
(PROG. 0+000 A 250+000)

JULIO 2013

INFORME DE DOCUMENTACIÓN TÉCNICA

1. Informe N°: MOPC/DV/DGV/2013-006	2. Fecha del Informe: 18-JUL-2013
3. Título y Subtítulo: INFORME DE EVALUACIÓN DE PAVIMENTO RUTA NACIONAL N° 6 "DR. JUAN LEÓN MALLORQUÍN" TRAMO: ENCARNACIÓN – MINGA GUAZÚ (PROG. 0+000 A 250+000)	
4. Autores: Ing. Alfredo Sánchez Ing. Carlos Morel	
5. Nombre y dirección de la Institución: Departamento de Gestión Vial Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones Oliva y Alberdi Nº 411 Código Postal Nº 1221 Asunción, Paraguay	
6. Resumen: Los trabajos fueron realizados a pedido de la Unidad Ejecutora BID 1822 OC/PR. El estudio abarca dos tipos de ensayos no destructivos, la Deflectometría con equipo FWD (Falling Weight Deflectometer) y la medición del IRI (Índice Internacional de Rugosidad) con equipo BUMP INTEGRATOR. El ensayo de Deflectometría comprende el análisis de información de campo disponible, el relevamiento de datos con el equipo y el análisis de los parámetros estructurales de la calzada existente en el tramo. El trabajo de medición de Rugosidad comprende la marcación y nivelación de pistas de calibración para el rugosímetro tipo Bump Integrator, la determinación de una curva de correlación para el rugosímetro, el relevamiento de rugosidad en el tramo y su posterior procesamiento en gabinete.	
7. Palabras Claves: EVALUACIÓN DE PAVIMENTO; FWD; IRI; GMANS; RUTA N° 6	8. Número de Páginas: "46"

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES 6

1.1. OBJETO 6
1.2. ALCANCE 6
1.3. DESCRIPCIÓN DEL TRAMO 6

CAPÍTULO 2 - RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES 8

2.1. RECOPILACIÓN DE ANTECEDENTES 8
2.2. ANÁLISIS DE ANTECEDENTES 8
2.2.1. ESQUEMA GENERAL DEL TRAMO 8
2.2.2. PAQUETE ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO 9
2.2.3. SECCIÓN TRANSVERSAL TIPO 11

CAPÍTULO 3 – TAREAS DE CAMPO 13

3.1. TAREAS DESARROLLADAS 13
3.2. MEDICIÓN DEFLECTOMÉTRICA 13
3.3. MEDICIÓN DE RUGOSIDAD 15
3.4. RELEVAMIENTO FOTOGRÁFICO DEL TRAMO 16

CAPÍTULO 4 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL 19

4.1. NORMALIZACIÓN DE LAS DEFLEXIONES 19
4.2. SECCIONES HOMOGÉNEAS 19
4.3. PAQUETE ESTRUCTURAL 20
4.3.1. ANTECEDENTES 20
4.3.2. PAQUETES ADOPTADOS PARA EL CALCULO 21
4.4. RETRO-CÁLCULO MODULAR 21
4.5. ANÁLISIS DEL CUENCO DE DEFLEXIONES 24
4.6. PARÁMETROS DE DISEÑO 26
4.7. VIDA UTIL REMANENTE 27

CAPÍTULO 5 – RUGOSIDAD 30

5.1. INTRODUCCIÓN 30
5.2. CALIBRACIÓN DEL RUGOSÍMETRO 30
5.2.1. OBJETO 30
5.2.2. ALCANCE 30
5.2.3. DEFINICIONES 30
5.2.4. EQUIPO 30
5.2.5. CALIBRACION DEL RUGOSIMETRO (MEDICIONES BUMP A IRI) 31
5.2.5.1. SELECCIÓN DE LAS SECCIONES DE CALIBRACIÓN 31
5.2.5.2. DETERMINACIÓN DEL IRI DE LAS SECCIONES DE CALIBRACIÓN 31
5.2.5.3. MEDICIÓN DE LAS SECCIONES DE CALIBRACIÓN CON EL EQUIPO A CALIBRAR 40
5.2.5.4. ECUACIÓN DE CALIBRACIÓN 40
5.3. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE RUGOSIDAD 42
5.3.1. RUTA NACIONAL N° 6 "DR. JUAN LEÓN MALLORQUÍN" 42
5.3.1.1. ZONA URBANA (PROG 0+000 A PROG 9+000) 42
5.3.1.2. RUTA N° 6 (PROG 9+000 A PROG 250+000) 43
5.3.2. RESUMEN GENERAL 44

CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES 46

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I .....Antecedentes

Anexo II .....Archivos generados por el FWD

Anexo III .....Secciones Homogéneas

Anexo IV .....Análisis Estructural

Anexo V .....Análisis del cuenco de deflexiones

Anexo VI .....Resultados de IRI

Anexo VII .....CD con la versión digital del Informe.
Incluye el relevamiento fotográfico del tramo cada 10 m.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

Capítulo 1 - GENERALIDADES

1.1. OBJETO

El objeto de este Informe es presentar el resultado de los trabajos de evaluación de pavimento realizados en la Ruta Nacional N° 6 "Dr. Juan León Mallorquín" tramo: Encarnación – Minga Guazú.

Los trabajos fueron realizados a pedido de la Unidad Ejecutora BID 1822 OC/PR.

1.2. ALCANCE

El estudio abarca dos tipos de ensayos no destructivos, la Deflectometría con equipo FWD (Falling Weight Deflectometer) y la medición del IRI (Índice Internacional de Rugosidad) con equipo BUMP INTEGRATOR.

El ensayo de Deflectometría comprende el análisis de información de campo disponible, el relevamiento de datos con el equipo y el análisis de los parámetros estructurales de la calzada existente en el tramo.

El trabajo de medición de Rugosidad comprende la marcación y nivelación de pistas de calibración para el rugosímetro tipo Bump Integrator, la determinación de una curva de correlación para el rugosímetro, el relevamiento de rugosidad en el tramo y su posterior procesamiento en gabinete.

1.3. DESCRIPCIÓN DEL TRAMO

El Tramo de estudio corresponde a la Ruta Nacional N° 6 "Dr. Juan León Mallorquín" y se desarrolla en los Departamentos de Itapúa y Alto Paraná, entre las ciudades de Encarnación y Minga Guazú.

En este caso las mediciones se realizaron en correspondencia con los mojones de kilometraje ubicados sobre dicha ruta, situándose la progresiva 0+000 en el empalme con la Ruta N° 1 (Encarnación – Avenida Bernardino Caballero) y la 250+000 en el empalme con la Ruta N° 7 (Minga Guazú).

CAPITULO 2

RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

Capítulo 2 - RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

2.1. RECOPILACIÓN DE ANTECEDENTES

Para complementar los estudios se evaluaron los siguientes antecedentes:

- Informe final del Recapado de la Ruta N° 6, tramo: Bella Vista – km 149+750 (paquetes estructurales y secciones transversales tipo).
- Resumen estructural de Rutas pavimentadas del país Año 1990 (archivo de la División Evaluación del Departamento de Evaluación y Control).

Los Antecedentes evaluados se presentan en el **Anexo I**.

2.2. ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

2.2.1. ESQUEMA GENERAL DEL TRAMO

A continuación se expone el esquema general del tramo.

Cabe destacar que en el inicio del tramo en Encarnación, el mojón kilométrico 0+000 de la PY06 se encuentra ubicado sobre la Avenida Bernardino Caballero aproximadamente frente al cementerio de la ciudad (Latitud= 27°19.601'S Longitud= 55°52.169'O).

Es conocido que la Entidad Binacional Yacyretá (EBY) ha financiado varias obras viales en la Ciudad de Encarnación, las cuales han afectado a la traza de la PY01 (Puente sobre el Arroyo Quiteria) y la PY06 (Puente sobre el Arroyo Santa María).

En el tramo en estudio, la intervención de la EBY incluye el ensanche de la ruta PY06 a 4 carriles (2 por sentido) en aproximadamente 7 kilómetros, en los cuales no existen mojones de kilometraje.

Atendiendo lo expuesto anteriormente y como se ha detectado que el primer mojón de kilometraje después de la intervención de la EBY es el Mojón 9+000 (Latitud= 27°16.907'S Longitud= 55°49.370'O), se ha adoptado dicho mojón como un punto notable hasta donde llega la zona urbana de Encarnación.

Asimismo, se ha detectado in situ, que el Mojón 9+000 se encuentra tan solo a 7,5 Km del Mojón 0+000, por lo que durante los relevamientos nos hemos referidos a dicho tramo (Mojón 0+000 a Mojón 9+000) como Zona Urbana de Encarnación.

El fin del tramo se ubica en Minga Guazú en el Mojón 250+000 (Latitud= 25°29.039'S Longitud= 54°53.856'O) ubicado en la intersección con la PY07.

2.2.2. PAQUETE ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

Atendiendo los antecedentes existentes y a las observaciones in situ, se ha organizado el estudio en cinco grandes tramos:

TRAMO	NOMBRE
A	Mojón 0+000 a Mojón 9+000 (Zona Urbana Encarnación- 7,5 Km)
B	Prog. 9+000 a 48+000 (39 Km)
C	Prog. 48+000 a 73+000 (25 Km)
D	Prog. 73+000 a 150+000 (77 Km)
E	Prog. 150+000 a 250+000 (100 Km)

A su vez, cada tramo está dividido en sub tramos, de acuerdo a las características estructurales y geométricas similares:

La conformación del paquete estructural del pavimento del Proyecto, con los espesores respectivos de cada capa, se indican con detalle a continuación:

TRAMO A:

Descripción	Un.	Espesores (cm)
ZONA URBANA ENCARNACIÓN (Mojón 0+000 a Mojón 9+000)		
Recapado con carpeta de C°A°	cm	4
Tratamiento Superficial Triple	cm	2
Base de piedra triturada	cm	20
Sub-base de piedra triturada	cm	25

Fuente de la Información = Ante la falta de información del paquete estructural construido por la EBY, se ha adoptado el paquete consignado en el Resumen estructural de Rutas pavimentadas del país Año 1990 (archivo de la División Evaluación del Departamento de Evaluación y Control).

TRAMO B:

(Prog. 9+000 a 48+000)		
Recapado con carpeta de C°A°	cm	4
Tratamiento Superficial Triple	cm	2
Base de piedra triturada	cm	20
Sub-base de piedra triturada	cm	25

Fuente de la Información = Resumen estructural de Rutas pavimentadas del país Año 1990 (archivo de la División Evaluación del Departamento de Evaluación y Control).

TRAMO C:

(Prog. 48+000 a 73+000)		
Carpeta de C°A°	cm	5
Base de Estabilizado Remanente	cm	15
Sub-base de Estabilizado Remanente	cm	17

Fuente de la Información = Informe final del Recapado de la Ruta N° 6, tramo: Bella Vista – km 149+750 (paquetes estructurales y secciones transversales tipo).

TRAMO D:

(Prog. 73+000 a 150+000)		
Recapado con Carpeta de C°A°	cm	5
Camada monogranular C°A°	cm	2
Carpeta de C°A° existente	cm	5
Base de Estabilizado Remanente	cm	36

Fuente de la Información = Informe final del Recapado de la Ruta N° 6, tramo: Bella Vista – km 149+750 (paquetes estructurales y secciones transversales tipo).

TRAMO E:

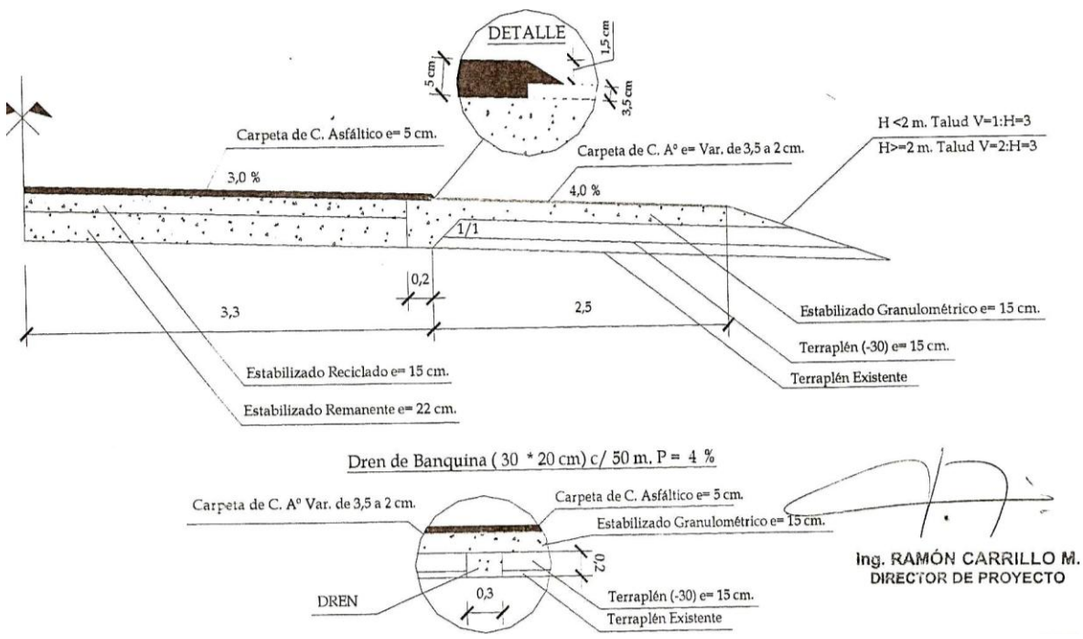
(Prog. 150+000 a 250+000)		
Recapado con Carpeta de C°A°	cm	6
Carpeta de C°A° existente	cm	5
Base de piedra triturada	cm	20
Sub-base de piedra triturada	cm	20

Fuente de la Información = Resumen estructural de Rutas pavimentadas del país Año 1990 (archivo de la División Evaluación del Departamento de Evaluación y Control). El espesor del último recapado fue ejecutado por la Empresa Talavera y Ortellado Construcciones entre los años 1.998 y 2.000.

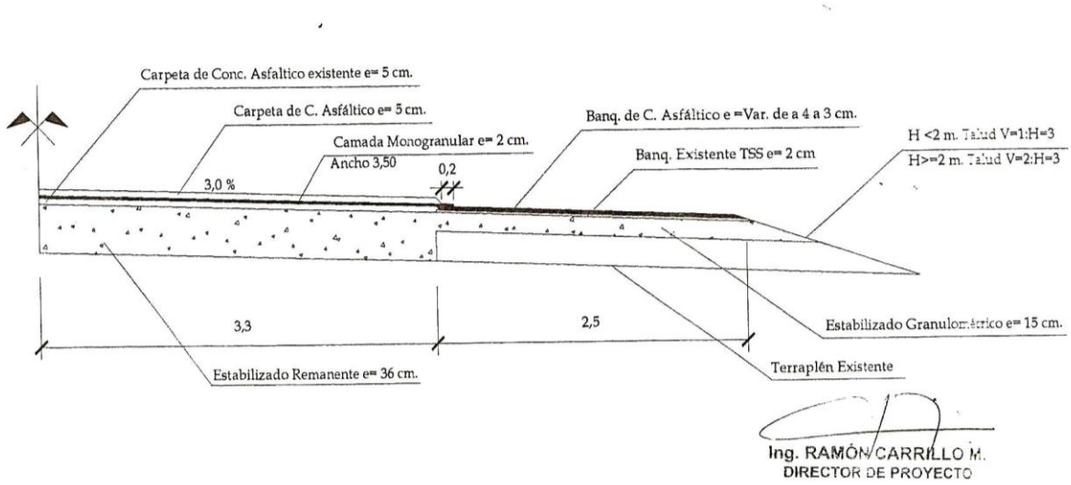
2.2.3. SECCIÓN TRANSVERSAL TIPO

La sección transversal tipo, se muestra a continuación en los siguientes gráficos:

PROG. 48+000 a 73+000



PROG. 73+000 a 150+000



CAPITULO 3

TAREAS DE CAMPO

Capítulo 3 – TAREAS DE CAMPO

3.1. TAREAS DESARROLLADAS

Las tareas de campo desarrolladas incluyen los siguientes aspectos:

- Relevamiento Fotográfico del Tramo.
- Trackeo del Tramo y Relevamiento de puntos notables con GPS GARMIN NAVEGADOR
- Deflectometría con equipo FWD (Falling Weight Deflectometer).
- Marcación y Nivelación de Pistas para calibración de rugosímetro tipo Bump Integrator.
- Calibración del equipo y determinación de la curva de correlación para la velocidad de relevamiento.
- Medición de Rugosidad con equipo BUMP INTEGRATOR (Marca ROMDAS-VECTRA).

3.2. MEDICIÓN DEFLECTOMÉTRICA

Se han realizado mediciones deflectométricas en el tramo en estudio. La auscultación deflectométrica consiste en la aplicación de cargas en la superficie del pavimento, midiendo la respuesta estructural del mismo en términos de deflexiones verticales.

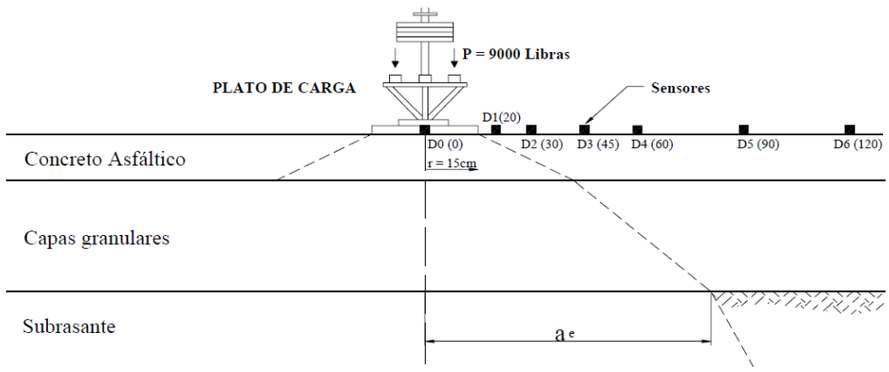
Es un método de ensayo no destructivo, y se ha utilizado un deflectómetro de impacto tipo Falling Weight Deflectometer (FWD), propiedad del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, que aplica en la superficie del pavimento una carga dinámica en forma de impulso similar, tanto en duración como en magnitud, a la producida por los vehículos que la circulan.

El equipo utilizado fue un KUAB 2m 50, con un plato de 15 cm de radio y siete sensores ubicados a 0, 20, 30, 45, 60, 90 y 120 cm del centro del plato de carga, aplicando una carga en el entorno de los 4082,3 Kg (9000 lbs).

El equipo mencionado utiliza sensores basados en LVDT, denominados sismómetros, los cuales efectúan las determinaciones de deflexiones producidas por la carga. Estos sismómetros permiten leer deflexiones de hasta 5 mm.

El plato de carga garantiza una distribución uniforme de la carga sobre la superficie y responde a las especificaciones FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories) Report No. 1996/1 "Harmonisation of the Use of Falling Weight Deflectometer on Pavements".

La figura siguiente muestra el concepto de medición mediante deflectómetro de impacto:



El equipo para las mediciones está montado sobre un remolque tirado por un vehículo que le permite un movimiento ágil y adecuado para liberar el área de manera inmediata.

El equipo dispone de un sistema de medición simultánea de temperaturas del aire y de la superficie del pavimento, para cada punto de ensayo. Además, se mide la temperatura realizando perforaciones en las capas asfálticas de manera a determinar la temperatura en el interior de las mismas. A partir de estos registros y con las temperaturas registradas por el deflectómetro en la superficie del pavimento, es posible determinar los factores de corrección.

La carga estándar y el diámetro del plato de carga son tales que permiten obtener sobre el pavimento condiciones de solicitación similares a las producidas por la presión de los vehículos de carga.

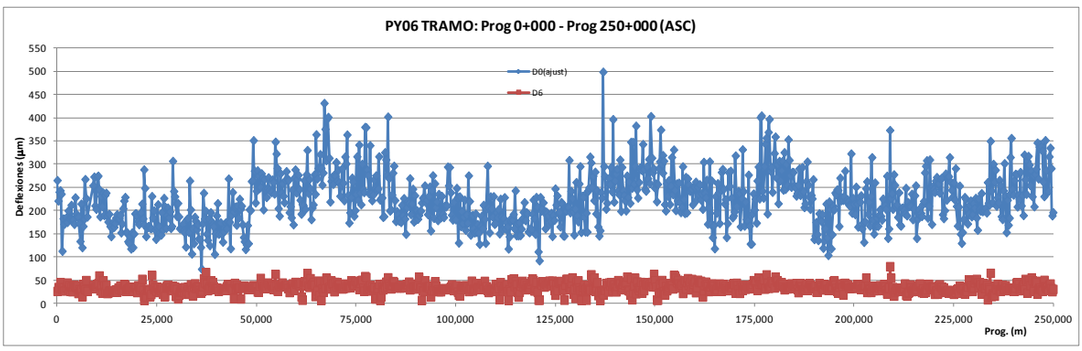
Las mediciones se realizaron en ambos carriles (ascendente y descendente) a 75 cm del borde externo de cada carril, de manera que coincidan con la huella externa, con una frecuencia de medición de 250 m.

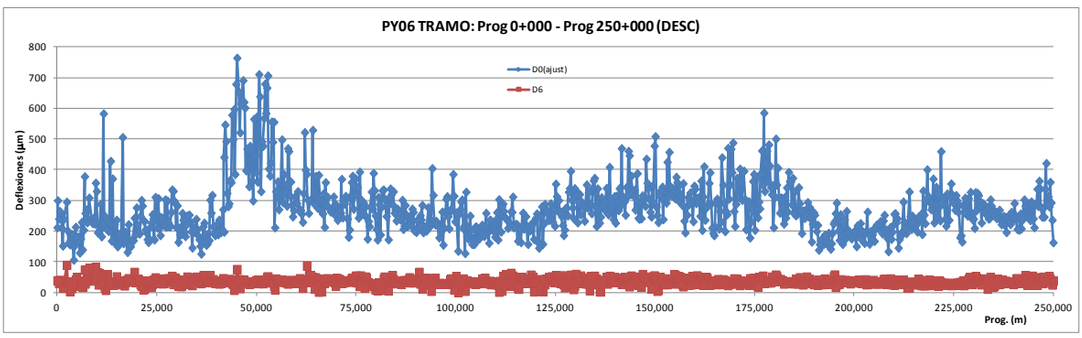
Las deflexiones utilizadas fueron corregidas a una carga normalizada de 4082,3 kg (9000 lbs), y en los tramos donde el espesor de las capas asfálticas es superior a 5 cm, las deflexiones también fueron corregidas por temperatura, ya que el Método establece su corrección en función al espesor de las capas asfálticas y el tipo de base, a partir de un espesor de dos pulgadas (5 cm).

Las mediciones deflectométricas fueron realizadas entre los días 08 al 12 de abril en sentido Ascendente (desde Encarnación hasta Minga Guazú) y 06 al 10 de mayo de 2013 en sentido Descendente (desde Minga Guazú hasta Encarnación).

En el **Anexo II** se presentan los archivos de la medición deflectométrica realizada.

A continuación se pueden apreciar los gráficos de la deflexión principal (D_0) corregidos por carga y la Deflexión del Sensor más lejano (D_6) en cada uno de los tramos:





3.3. MEDICIÓN DE RUGOSIDAD

La regularidad superficial es la característica más percibida por el usuario ya que afecta la comodidad de rodadura. Se relaciona con los efectos de las vibraciones, tales como niveles de deterioro, posibilidad de dañar a las mercancías transportadas, desgaste de los vehículos y consumo de energía. La comodidad depende principalmente del vehículo y del perfil longitudinal de la carretera.

Se ha utilizado Rugosímetro tipo Bump Integrator montado en una Furgoneta, propiedad del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. Su principio de funcionamiento es de respuesta-dinámica, que permite registrar y acumular los movimientos verticales relativos entre el chasis de un vehículo y su sistema de rodaje y suspensión.

El Bump Integrator puede ser calibrado a IRI mediante pistas de calibración especialmente seleccionadas, las que deberán ser niveladas en forma manual con Nivel y Mira, con el equipo Dipstick, o bien medidas con el equipo MERLIN, a los efectos de obtener el patrón de referencia IRI en cada una de las pistas.

En nuestro caso, las pistas fueron niveladas con el Equipo Dipstick y la metodología de calibración se detalla en el Capítulo "Rugosidad".

Equipo Dipstick para calibración del Bump Integrator

Se han utilizado pistas de calibración ubicadas sobre el tramo Areguá – Patiño – Ypacaraí y el tramo Ypacaraí - Pirayú. Las mismas fueron medidas en febrero del 2013 para la calibración del rugosímetro. Además, para este trabajo en particular se midieron las pistas ubicadas en el tramo Cnel. Oviedo – Santaní y fueron creadas otras pistas en la Ruta Nacional N° 9. La medición de rugosidad fue realizada entre los días 16 al 19 de abril de 2013 en ambos sentidos (Sentido Ascendente: desde Encarnación hacia Minga Guazú).

3.4. RELEVAMIENTO FOTOGRÁFICO DEL TRAMO

Durante la medición de la rugosidad, debido a que el equipo ROMDAS-VECTRA se encuentra integrado a las funcionalidades del sistema ASTRA-VECTRA, se realizó un registro fotográfico y de ubicación (progresiva y posición GPS) con adquisición de datos cada 10 m. En el **Anexo VII** se incluyen todas las fotos.

A continuación se presentan algunas fotografías del relevamiento realizado:

Medición de Rugosidad – Capitán Miranda

Medición de Deflexiones – Sta. Rita

Marcación de Pistas de Calibración de Rugosímetro

Medición de IRI, con equipo DIPSTICK, en Pistas de Calibración de Rugosímetro

CAPITULO 4

ANALISIS ESTRUCTURAL

Capítulo 4 – ANÁLISIS ESTRUCTURAL

4.1. NORMALIZACIÓN DE LAS DEFLEXIONES

A efectos de poder realizar el análisis del comportamiento del tramo se han normalizado las deflexiones a 20° C de temperatura y para una carga estándar de 9000 lbs (4082,3 kg), de acuerdo a lo recomendado por el Método AASHTO.

4.2. SECCIONES HOMOGÉNEAS

A partir de los antecedentes analizados, los resultados de los ensayos deflectométricos y suponiendo tránsito constante a lo largo de cada tramo, se definieron unidades homogéneas de análisis utilizando la metodología AASHTO (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures – 1993) Apéndice J Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences cumpliendo con los siguientes requisitos:

1. No se debe superar el 30 % de Coeficiente de Variación de D0c (VARIACIÓN PROMEDIO: AASHTO-93, Tabla 3.6, Página III-53).

2. Variación del tráfico no superior al 20 %. Se ha considerado que cada sección a lo largo de su extensión se encuentra sometida al mismo tráfico.

3. Longitud no menor a 600 metros (En caso que exista un tramo de longitud menor a 600 m con un paquete estructural diferente, será admitido para su análisis como sección homogénea).

Cabe destacar, que en las planillas de cálculo, las secciones definidas fueron referidas a las progresivas de medición tomadas por el odómetro del deflectómetro.

Se presentan a continuación las secciones definidas y los valores estadísticos obtenidos para la deflexión máxima (D0c) y la deflexión del último sensor (D6c), corregidas por carga y temperatura según sea el caso.

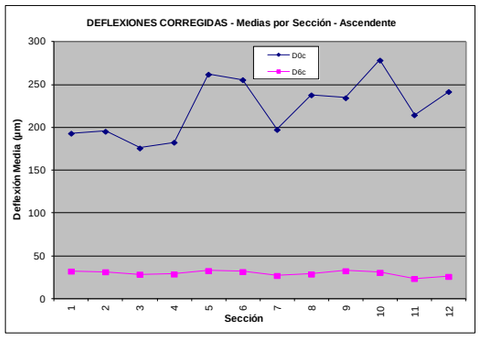
SECCIONES HOMOGÉNEAS

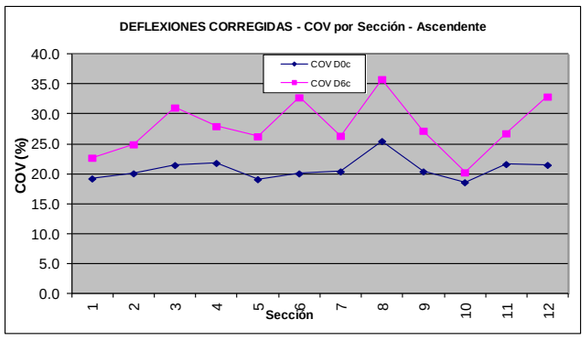
RUTA NACIONAL N° 6: "DR. JUAN LEÓN MALLORQUÍN"

TRAMO: ENCARNACIÓN - MINGA GUAZÚ

CARRIL ASCENDENTE

SECCIÓN	PROGRESIVA		LONG.	Carril medido	ESPESORES		DEFLEX. D0 CORR. (CARGA Y T°				DEFLEXIÓN D6 CORR. (CARGA Y T			
	INICIO	FIN			TOTAL	C°A°	MEDIA	P_{80}	DESVÍO	COV	MEDIA	P_{80}	DESVÍO	COV
			km		cm	cm	µm	µm	µm	%	µm	µm	µm	%
1	000+000	007+500	7.50	ASC	51.0	6.0	193	226	37.2	19.2	32	36	7.3	22.7
2	009+000	018+500	9.50	ASC	51.0	6.0	195	232	39.3	20.1	31	37	7.8	24.9
3	018+500	042+000	23.50	ASC	51.0	6.0	176	199	37.8	21.5	29	33	8.9	31.1
4	042+000	048+000	6.00	ASC	51.0	6.0	183	205	39.9	21.8	29	33	8.0	28.0
5	048+000	073+000	25.00	ASC	42.0	5.0	262	290	50.1	19.1	33	39	8.6	26.3
6	073+000	083+000	10.00	ASC	48.0	12.0	256	301	51.4	20.1	32	40	10.3	32.8
7	083+000	121+000	38.00	ASC	48.0	12.0	198	227	40.3	20.4	27	32	7.1	26.4
8	121+000	150+000	29.00	ASC	48.0	12.0	238	287	60.7	25.5	29	36	10.3	35.8
9	150+000	176+500	26.50	ASC	51.0	11.0	235	268	47.9	20.4	33	40	8.8	27.2
10	176+500	190+000	13.50	ASC	51.0	11.0	279	309	51.8	18.6	31	35	6.2	20.3
11	190+000	225+000	35.00	ASC	51.0	11.0	215	251	46.5	21.6	23	28	6.3	26.8
12	225+000	250+000	25.00	ASC	51.0	11.0	242	289	52.0	21.5	26	34	8.5	32.9
		Total=	248.50	Km										





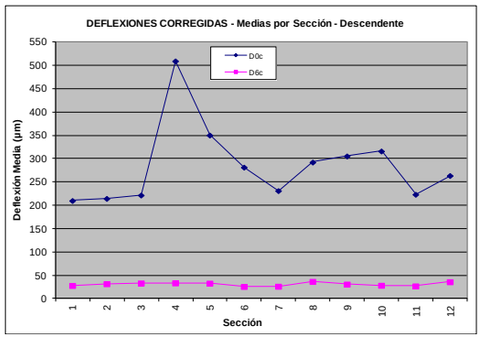
SECCIONES HOMOGÉNEAS

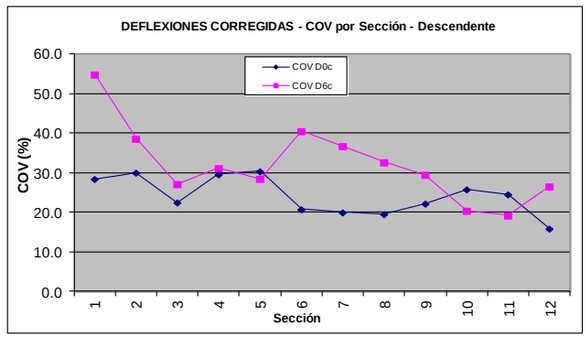
RUTA NACIONAL N° 6: "DR. JUAN LEÓN MALLORQUÍN"

TRAMO: ENCARNACIÓN - MINGA GUAZÚ

CARRIL DESCENDENTE

SECCIÓN	PROGRESIVA		LONG.	Carril medido	ESPESORES		DEFLEX. D0 CORR. (CARGA Y T°				DEFLEXIÓN D6 CORR. (CARGA Y T			
	INICIO	FIN			TOTAL	C°A°	MEDIA	P_{80}	DESVÍO	COV	MEDIA	P_{80}	DESVÍO	COV
			km		cm	cm	µm	µm	µm	%	µm	µm	µm	%
1	000+000	007+500	7.50	DESC	51.0	6.0	210	258	59.9	28.5	28	33	15.5	54.9
2	009+000	018+500	9.50	DESC	51.0	6.0	215	234	64.7	30.1	32	40	12.4	38.7
3	018+500	042+000	23.50	DESC	51.0	6.0	222	257	50.1	22.6	34	39	9.1	27.2
4	042+000	048+000	6.00	DESC	51.0	6.0	510	384	151.2	29.7	34	39	10.5	31.2
5	048+000	073+000	25.00	DESC	42.0	5.0	351	436	106.8	30.4	33	38	9.5	28.6
6	073+000	083+000	10.00	DESC	48.0	12.0	282	331	58.7	20.8	26	35	10.6	40.6
7	083+000	121+000	38.00	DESC	48.0	12.0	232	263	46.4	20.1	27	34	9.8	36.8
8	121+000	150+000	29.00	DESC	48.0	12.0	293	332	57.4	19.6	37	48	12.1	32.7
9	150+000	176+500	26.50	DESC	51.0	11.0	306	355	68.2	22.3	31	39	9.2	29.6
10	176+500	190+000	13.50	DESC	51.0	11.0	317	365	81.9	25.9	29	33	5.9	20.5
11	190+000	225+000	35.00	DESC	51.0	11.0	224	256	55.1	24.6	27	30	5.2	19.3
12	225+000	250+000	25.00	DESC	51.0	11.0	264	293	42.1	16.0	36	45	9.6	26.6
		Total=	248.50	Km										





Estas unidades homogéneas han sido utilizadas para el cálculo de los parámetros estructurales del pavimento (M_R, E_p, SN efectivo y radio de curvatura Rc). En el **Anexo III** se detalla el listado de secciones homogéneas resultantes por deflexiones y por paquetes estructurales.

4.3. PAQUETE ESTRUCTURAL

4.3.1. ANTECEDENTES

A partir del análisis de antecedentes, se definieron los espesores de las capas asfálticas y el espesor total del paquete estructural de las diferentes secciones homogéneas.

Estos espesores son los utilizados para el retrocálculo modular y el cálculo del Número Estructural (SN).

Se considera como espesor total de estructura resistente al conformado por las capas asfálticas, capas granulares, capas tratadas con cemento y capas de suelo (subrasante mejorada) que aportan resistencia a la estructura.

En este caso, a lo largo de del tramo en estudio pueden encontrarse varios tipos de paquetes estructurales, producto de las distintas intervenciones que se han ejecutado a lo largo del tiempo.

4.3.2. PAQUETES ADOPTADOS PARA EL CALCULO

Los paquetes adoptados para el cálculo son los siguientes:

PY06 - DR JUAN LEÓN MALLORQUÍN

TRAMO: ENCARNACIÓN - MINGA GUAZÚ

SECCIÓN	DESDE	HASTA	LONG.	ESPESORES	
				TOTAL	C°A°
			km	cm	cm
1	000+000	007+500	7.50	51.0	6.0
2	009+000	018+500	9.50	51.0	6.0
3	018+500	042+000	23.50	51.0	6.0
4	042+000	048+000	6.00	51.0	6.0
5	048+000	073+000	25.00	42.0	5.0
6	073+000	083+000	10.00	48.0	12.0
7	083+000	121+000	38.00	48.0	12.0
8	121+000	150+000	29.00	48.0	12.0
9	150+000	176+500	26.50	51.0	11.0
10	176+500	190+000	13.50	51.0	11.0
11	190+000	225+000	35.00	51.0	11.0
12	225+000	250+000	25.00	51.0	11.0
		Total =	248.50		

4.4. RETRO-CÁLCULO MODULAR

Siguiendo la metodología definida en la Guía AASHTO (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures – 1993), se realizó el retrocálculo modular, a partir de los ensayos deflectométricos realizados y los espesores de capas determinados in-situ. De esta manera se obtuvieron los módulos de la estructura E_p y M_R, el radio de curvatura (Rc), y el número estructural efectivo (SN_{eff}) para cada tramo homogéneo.

A continuación se indica la metodología y las expresiones seguidas para la obtención de los parámetros estructurales:

Módulo Resiliente (M_R): a distancias suficientemente grandes del plato de carga, la deflexión medida en la superficie del pavimento responde solamente a la deformación de la subrasante. Esto permite retrocalcular el módulo resiliente de la subrasante a partir del valor de una deflexión y la magnitud de la carga aplicada, a partir de la siguiente expresión:

$$M_R = \frac{0{,}24 \cdot P}{d_r \cdot r}$$

Donde:

- **M_R** Módulo resiliente de la subrasante (psi)
- **P** es la magnitud de la carga aplicada (libras)
- **d_r** es la deflexión medida a una distancia r del centro de aplicación de la carga (pulgadas)
- **r** es la distancia al centro de aplicación de la carga (pulgadas)

La deflexión usada para el cálculo de M_R debe estar lo suficientemente alejada del centro de aplicación de la carga de manera independizarla del efecto de las capas superiores, pero lo suficientemente cerca como para que su valor no sea demasiado pequeño e implica calcular el módulo con precisión. La distancia mínima se determina a partir de la siguiente relación:

$$r \geq 0{,}7 \cdot a_e$$

Donde:

$$a_e = \sqrt{\left[a^2 + \left(D \cdot \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2 \right]}$$

- **a_e** es el radio del bulbo de tensiones en la interfase subrasante - pavimento (pulgadas)
- **a** es el radio del plato de cargas del equipo FWD (pulgadas)
- **D** es el espesor total de las capas de pavimento sobre la subrasante (pulgadas)
- **E_p** es el módulo efectivo de todas las capas del pavimento (psi)

Antes de utilizar el M_R retrocalculado en el diseño del pavimento, debe ser ajustado para ser consistente con el valor medido en laboratorio usado por la ecuación AASHTO de pavimentos flexibles. El valor de M_R retrocalculado debe ser multiplicado por un factor de corrección C, el cual varía en función del tipo de suelo de subrasante y la presencia de una capa rígida (bedrock).

$$M_{R(Diseño)} = C \cdot M_R$$

Donde:

- **M_R** Módulo resiliente de la subrasante obtenida por retrocálculo (psi)
- **C** Factor de ajuste o corrección
- **$M_{R(Diseño)}$** corresponde entonces al valor de M_R corregido mediante el factor en cuestión

Para el presente estudio se ha adoptado un C=0,33 siguiendo los criterios desarrollados en la metodología AASHTO'93.

Módulo efectivo del pavimento (E_p): conocidos el espesor del pavimento (D) y el módulo resiliente de la subrasante (M_R), el módulo efectivo del pavimento se determina a partir de la deflexión medida en el centro de aplicación de la carga usando la siguiente expresión:

$$d_0 = 1{,}5 \cdot p \cdot a \cdot \left\{ \frac{1}{M_R \cdot \sqrt{1+\left(\frac{D}{a} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}}\right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{D}{a}\right)^2}}\right]}{E_p} \right\}$$

Donde:

- **d_0** es la deflexión medida en el centro de aplicación de la carga, ajustada a una temperatura estándar de 68ºF (20°C) (pulgadas)
- **p** es la presión aplicada por el plato de carga (psi)
- **a** es el radio del plato de cargas del equipo FWD (pulgadas)
- **D** es el espesor total de las capas de pavimento sobre la subrasante, (pulgadas)
- **E_p** es el módulo efectivo de todas las capas del pavimento (psi)
- **M_R** Módulo resiliente de la subrasante obtenida por retrocálculo (psi)

Como se observa, el proceso de cálculo de M_R y E_p es iterativo, dado que el valor de E_p tiene influencia en la determinación del sensor utilizado para el cálculo de M_R, y a su vez este valor influye en la determinación del E_p.

Número estructural efectivo (SN_{eff}): se determina a partir de la siguiente expresión:

$$SN_{eff} = 0{,}0045 \cdot \mathrm{D} \cdot \sqrt[3]{E_p}$$

Donde:

- **D** es el espesor de las capas de pavimento (pulgadas)
- **E_p** es el módulo efectivo retrocalculado (psi)

Radio de curvatura (Rc): el radio de curvatura expresado en metros se determina a partir de la siguiente expresión:

$$Rc = \frac{6250}{2 \cdot \left(\frac{d_0}{10} - \frac{(d_{20} + d_{30})}{20}\right)}$$

Donde d_0, d_{20} y d_{30} son las deflexiones medidas a 0, 20 y 30 cm respectivamente del punto de aplicación de la carga, corregidas a la carga y temperatura estándar, en micrones.

En la tabla ubicada más adelante se resumen los valores promedio de cada uno de los parámetros mencionados. Los cálculos y demás indicadores estadísticos se indican en el **Anexo IV**.

Se presentan a continuación los valores obtenidos del retrocálculo:

PY06 - DR JUAN LEÓN MALLORQUÍN
TRAMO: ENCARNACIÓN - MINGA GUAZÚ
CARRIL ASCENDENTE

SECCIÓN	DESDE	HASTA	LONG.	ESPESORES		D0'(t)	PARÁMETROS ESTRUCTURALES				
				TOTAL	C°A°		Factor C	C*Mr	Ep	SNeff	RC
			km	cm	cm	(µm)		psi	psi		m
1	000+000	007+500	7.50	51.0	6.0	193	0.33	10,444	156,763	4.84	678
2	009+000	018+500	9.50	51.0	6.0	195	0.33	10,725	150,677	4.78	624
3	018+500	042+000	23.50	51.0	6.0	176	0.33	11,993	171,645	4.97	643
4	042+000	048+000	6.00	51.0	6.0	183	0.33	10,727	172,821	4.97	675
5	048+000	073+000	25.00	42.0	5.0	262	0.33	10,256	109,776	3.54	327
6	073+000	083+000	10.00	48.0	12.0	256	0.33	9,582	110,989	4.03	422
7	083+000	121+000	38.00	48.0	12.0	198	0.33	10,373	154,435	4.53	552
8	121+000	150+000	29.00	48.0	12.0	238	0.33	9,681	126,903	4.22	439
9	150+000	176+500	26.50	51.0	11.0	235	0.33	10,774	116,700	4.36	400
10	176+500	190+000	13.50	51.0	11.0	279	0.33	8,826	93,330	4.08	327
11	190+000	225+000	35.00	51.0	11.0	215	0.33	11,294	125,153	4.47	416
12	225+000	250+000	25.00	51.0	11.0	242	0.33	10,353	109,045	4.28	352
		Total =	248.50								

PY06 - DR JUAN LEÓN MALLORQUÍN
TRAMO: ENCARNACIÓN - MINGA GUAZÚ
CARRIL DESCENDENTE

SECCIÓN	DESDE	HASTA	LONG.	ESPESORES		D0'(t)	PARÁMETROS ESTRUCTURALES				
				TOTAL	C°A°		Factor C	C*Mr	Ep	SNeff	RC
			km	cm	cm	(µm)		psi	psi		m
1	000+000	007+500	7.50	51.0	6.0	210	0.33	10,708	139,608	4.64	581
2	009+000	018+500	9.50	51.0	6.0	215	0.33	9,389	147,928	4.72	679
3	018+500	042+000	23.50	51.0	6.0	222	0.33	10,006	130,603	4.54	579
4	042+000	048+000	6.00	51.0	6.0	510	0.33	10,533	43,599	3.12	146
5	048+000	073+000	25.00	42.0	5.0	351	0.33	10,491	75,466	3.10	232
6	073+000	083+000	10.00	48.0	12.0	282	0.33	10,233	93,870	3.83	322
7	083+000	121+000	38.00	48.0	12.0	232	0.33	10,381	123,397	4.20	450
8	121+000	150+000	29.00	48.0	12.0	293	0.33	8,776	95,057	3.85	389
9	150+000	176+500	26.50	51.0	11.0	306	0.33	10,939	79,660	3.84	284
10	176+500	190+000	13.50	51.0	11.0	317	0.33	9,110	80,244	3.85	305
11	190+000	225+000	35.00	51.0	11.0	224	0.33	11,219	120,866	4.42	435
12	225+000	250+000	25.00	51.0	11.0	264	0.33	9,767	98,595	4.15	395
		Total =	248.50								

4.5. ANÁLISIS DEL CUENCO DE DEFLEXIONES

Se ha analizado el cuenco de las deflexiones medidas.

Se han calculado dos indicadores, a partir del análisis de los cuencos de deflexiones:

SCI: (Surface Condition Index): Permite determinar el estado de los 20 cm superiores de la estructura.

$$\mathbf{SCI\ (mils) = (D0 - D2) / 25,4}$$

BCI: (Base Condition Index) Permite determinar el estado entre los 20 cm y los 40 cm de la estructura.

$$\mathbf{BCI\ (mils) = (D2 - D4) / 25,4}$$

W7: Permite determinar el estado de la subrasante.

$$\mathbf{W7\ (mils) = (D6) / 25,4}$$

Para los espesores de concreto asfáltico existentes la bibliografía consultada indica que:

Indicador	Estado de la estructura	Valor para CA > 12,5 cm	Valor para 6,2 cm <CA < 12,5 cm	Valor para 1,3 cm< CA <6,2 cm
SCI	Muy Buena	< 4	< 6	<12
	Buena	4 - 6	6 - 10	12-18
	Moderada	6 - 8	10 - 15	18-24
	Pobre	8 - 10	15 - 20	24-30
	Muy Pobre	> 10	> 20	>30
BCI	Muy Buena	< 2	< 3	<4
	Buena	2 - 3	3 - 5	4-8
	Moderada	3 - 4	5 - 8	8-12
	Pobre	4 - 5	8 - 10	12-16
	Muy Pobre	> 5	> 10	>16
W7	Muy Buena	< 1	< 1	<1.0
	Buena	1.0 – 1.4	1.0 – 1.4	1.0-1.4
	Moderada	1.4 – 1.8	1.4 – 1.8	1.4-1.8
	Pobre	1.8 – 2.2	1.8 – 2.2	1.8-2.2
	Muy Pobre	> 2.2	> 2.2	>2.2

El ajuste por temperatura no se aplica en su totalidad en todos los sensores, reduciéndose a medida que se alejan del plato de carga.

La siguiente tabla muestra el porcentaje de aplicación del Ajuste de Temperatura en función del espesor de Concreto Asfáltico y del Tipo de Sensor:

	Espesor de CA	< 5 cm	5 – 12,5 cm	>12,5 cm
% de aplicación del Factor de Ajuste por Temperatura	W1=D0	0	100	100
	W2=D2	0	45	62
	W3=D3	0	12	34
	W4=D4	0	5	10

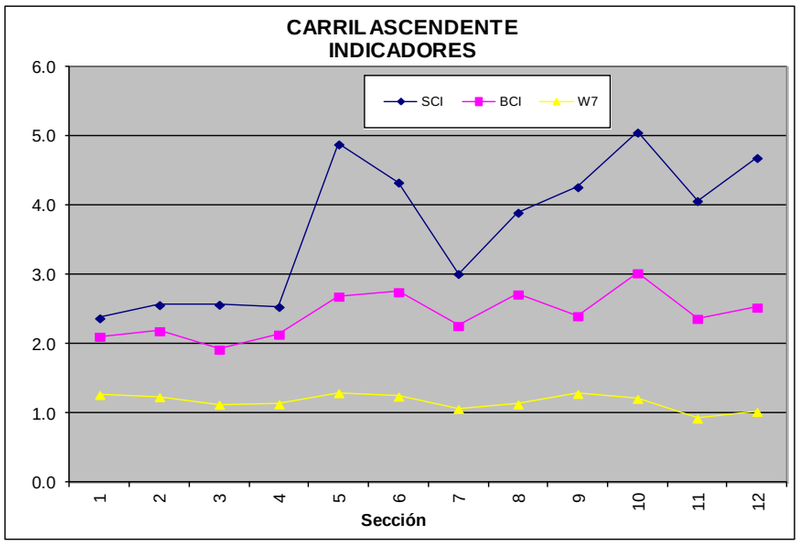
No se realizó ajuste por temperatura a las capas asfálticas.

Los cálculos se detallan en el **Anexo V**.

Las tablas siguientes resumen los valores obtenidos:

RUTA NACIONAL N° 6 "DR. JUAN LEÓN MALLORQUÍN"
TRAMO: ENCARNACIÓN - MINGA GUAZÚ
CARRIL ASCENDENTE

SECCIÓN	PROGRESIVA		LONG.	Carril medido	ESPESORES		SCI		BCI		W7	
	INICIO	FIN	m		TOTAL cm	C°A° cm	MEDIA	CONDICION	MEDIA	CONDICION	MEDIA	CONDICION
1	000+000	007+500	7,500	ASC	51.0	6.0	2.4	Muy Buena	2.1	Muy Buena	1.3	Muy Buena
2	009+000	018+500	9,500	ASC	51.0	6.0	2.6	Muy Buena	2.2	Muy Buena	1.2	Muy Buena
3	018+500	042+000	23,500	ASC	51.0	6.0	2.6	Muy Buena	1.9	Muy Buena	1.1	Muy Buena
4	042+000	048+000	6,000	ASC	51.0	6.0	2.5	Muy Buena	2.1	Muy Buena	1.1	Muy Buena
5	048+000	073+000	25,000	ASC	42.0	5.0	4.9	Muy Buena	2.7	Muy Buena	1.3	Muy Buena
6	073+000	083+000	10,000	ASC	48.0	12.0	4.3	Muy Buena	2.7	Muy Buena	1.2	Muy Buena
7	083+000	121+000	38,000	ASC	48.0	12.0	3.0	Muy Buena	2.3	Muy Buena	1.1	Muy Buena
8	121+000	150+000	29,000	ASC	48.0	12.0	3.9	Muy Buena	2.7	Muy Buena	1.1	Muy Buena
9	150+000	176+500	26,500	ASC	51.0	11.0	4.3	Muy Buena	2.4	Muy Buena	1.3	Muy Buena
10	176+500	190+000	13,500	ASC	51.0	11.0	5.1	Muy Buena	3.0	Muy Buena	1.2	Muy Buena
11	190+000	225+000	35,000	ASC	51.0	11.0	4.1	Muy Buena	2.4	Muy Buena	0.9	Muy Buena
12	225+000	250+000	25,000	ASC	51.0	11.0	4.7	Muy Buena	2.5	Muy Buena	1.0	Muy Buena
		Total=	248,500	m								

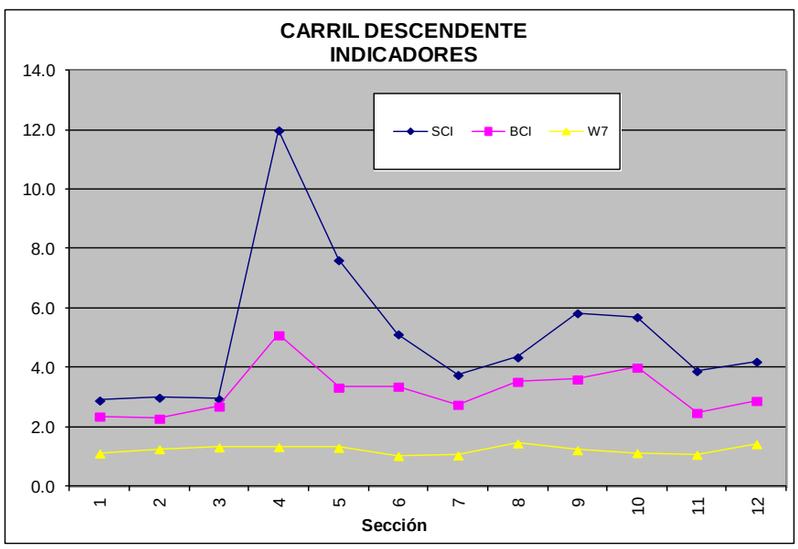


RUTA NACIONAL N° 6 "DR. JUAN LEÓN MALLORQUÍN"

TRAMO: ENCARNACIÓN - MINGA GUAZÚ

CARRIL DESCENDENTE

SECCIÓN	PROGRESIVA		LONG.	Carril medido	ESPESORES		SCI		BCI		W7	
	INICIO	FIN	m		TOTAL cm	C°A° cm	MEDIA	CONDICION	MEDIA	CONDICION	MEDIA	CONDICION
1	000+000	007+500	7,500	DESC	51.0	6.0	2.9	Muy Buena	2.4	Muy Buena	1.1	Muy Buena
2	009+000	018+500	9,500	DESC	51.0	6.0	3.0	Muy Buena	2.3	Muy Buena	1.3	Muy Buena
3	018+500	042+000	23,500	DESC	51.0	6.0	2.9	Muy Buena	2.7	Muy Buena	1.3	Muy Buena
4	042+000	048+000	6,000	DESC	51.0	6.0	12.0	Muy Buena	5.1	Muy Buena	1.3	Muy Buena
5	048+000	073+000	25,000	DESC	42.0	5.0	7.6	Muy Buena	3.3	Muy Buena	1.3	Muy Buena
6	073+000	083+000	10,000	DESC	48.0	12.0	5.1	Muy Buena	3.4	Muy Buena	1.0	Muy Buena
7	083+000	121+000	38,000	DESC	48.0	12.0	3.8	Muy Buena	2.8	Muy Buena	1.0	Muy Buena
8	121+000	150+000	29,000	DESC	48.0	12.0	4.4	Muy Buena	3.5	Muy Buena	1.5	Muy Buena
9	150+000	176+500	26,500	DESC	51.0	11.0	5.8	Muy Buena	3.6	Muy Buena	1.2	Muy Buena
10	176+500	190+000	13,500	DESC	51.0	11.0	5.7	Muy Buena	4.0	Muy Buena	1.1	Muy Buena
11	190+000	225+000	35,000	DESC	51.0	11.0	3.9	Muy Buena	2.5	Muy Buena	1.1	Muy Buena
12	225+000	250+000	25,000	DESC	51.0	11.0	4.2	Muy Buena	2.9	Muy Buena	1.4	Muy Buena
		Total=	248,500	m								



4.6. PARÁMETROS DE DISEÑO

Se detallan a continuación los parámetros de diseño utilizados en la aplicación del método AASHTO 1993.

Confiabilidad: confiabilidad es la probabilidad de que el sistema estructural que conforma el pavimento cumpla con la función prevista dentro de su vida útil, bajo las condiciones de diseño.

El método AASHTO recomienda para una ruta principal (principal arterials) en zona rural, tomar valores entre el 75% y el 95%.

En este caso en particular se adopta un valor de 85%

Desvío Estándar: en el método AASHTO se usan como variables de entrada los módulos resilientes de la subrasante y de las distintas capas que conforman el paquete estructural, coeficientes de drenaje, datos de tránsito, etc.; que son valores susceptibles a un amplio rango de variación.

El método de diseño recomienda 0,49 como valor de desvío estándar general (S_0) para evaluación de obras de refuerzo.

Índice de serviciabilidad inicial y final: la serviciabilidad de un pavimento se define como la capacidad de servir al tipo de tránsito.

Para el cálculo se adopta un $\Delta PSI = 4,2 - 2,0 = 2,2$

Período de diseño: el período de diseño considerado para el análisis del refuerzo fue de 10 años.

4.7. VIDA UTIL REMANENTE

Se calculó la vida útil remanente en términos de EJES EQUIVALENTES REMANENTES, considerando los parámetros de diseño arriba señalados.

Los mismos se consignan a continuación:

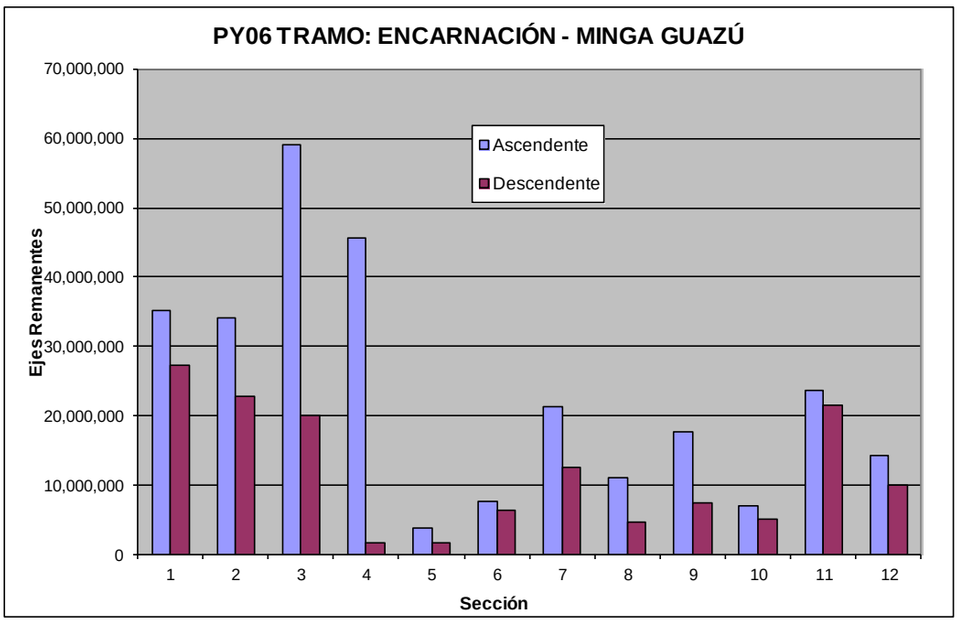
PY06 - DR JUAN LEÓN MALLORQUÍN
TRAMO: ENCARNACIÓN - MINGA GUAZÚ
CARRIL ASCENDENTE

SECCIÓN	DESDE	HASTA	LONG.	ESPESORES		D0'(t)	PARÁMETROS ESTRUCTURALES					PARÁMETROS DE DISEÑO			$N_{8,2}$ Remanente
				TOTAL	C°A°		Factor C	C*Mr	Ep	SNeff	RC	R	S	ΔPSI	
			km	cm	cm	(µm)		psi	psi		m	CONF.	DESVÍO		
1	000+000	007+500	7.50	51.0	6.0	193	0.33	10,444	156,763	4.84	678	85%	0.49	2.2	35,206,334
2	009+000	018+500	9.50	51.0	6.0	195	0.33	10,725	150,677	4.78	624	85%	0.49	2.2	34,157,886
3	018+500	042+000	23.50	51.0	6.0	176	0.33	11,993	171,645	4.97	643	85%	0.49	2.2	59,045,555
4	042+000	048+000	6.00	51.0	6.0	183	0.33	10,727	172,821	4.97	675	85%	0.49	2.2	45,581,042
5	048+000	073+000	25.00	42.0	5.0	262	0.33	10,256	109,776	3.54	327	85%	0.49	2.2	3,712,269
6	073+000	083+000	10.00	48.0	12.0	256	0.33	9,582	110,989	4.03	422	85%	0.49	2.2	7,739,001
7	083+000	121+000	38.00	48.0	12.0	198	0.33	10,373	154,435	4.53	552	85%	0.49	2.2	21,369,720
8	121+000	150+000	29.00	48.0	12.0	238	0.33	9,681	126,903	4.22	439	85%	0.49	2.2	10,961,852
9	150+000	176+500	26.50	51.0	11.0	235	0.33	10,774	116,700	4.36	400	85%	0.49	2.2	17,723,616
10	176+500	190+000	13.50	51.0	11.0	279	0.33	8,826	93,330	4.08	327	85%	0.49	2.2	6,972,713
11	190+000	225+000	35.00	51.0	11.0	215	0.33	11,294	125,153	4.47	416	85%	0.49	2.2	23,643,492
12	225+000	250+000	25.00	51.0	11.0	242	0.33	10,353	109,045	4.28	352	85%	0.49	2.2	14,158,872
		Total =	248.50												

PY06 - DR JUAN LEÓN MALLORQUÍN
TRAMO: ENCARNACIÓN - MINGA GUAZÚ
CARRIL DESCENDENTE

SECCIÓN	DESDE	HASTA	LONG.	ESPESORES		D0'(t)	PARÁMETROS ESTRUCTURALES					PARÁMETROS DE DISEÑO			$N_{8,2}$ Remanente
				TOTAL	C°A°		Factor C	C*Mr	Ep	SNeff	RC	R	S	ΔPSI	
			km	cm	cm	(µm)		psi	psi		m	CONF.	DESVÍO		
1	000+000	007+500	7.50	51.0	6.0	210	0.33	10,708	139,608	4.64	581	85%	0.49	2.2	27,380,904
2	009+000	018+500	9.50	51.0	6.0	215	0.33	9,389	147,928	4.72	679	85%	0.49	2.2	22,867,117
3	018+500	042+000	23.50	51.0	6.0	222	0.33	10,006	130,603	4.54	579	85%	0.49	2.2	19,972,526
4	042+000	048+000	6.00	51.0	6.0	510	0.33	10,533	43,599	3.12	146	85%	0.49	2.2	1,694,655
5	048+000	073+000	25.00	42.0	5.0	351	0.33	10,491	75,466	3.10	232	85%	0.49	2.2	1,609,042
6	073+000	083+000	10.00	48.0	12.0	282	0.33	10,233	93,870	3.83	322	85%	0.49	2.2	6,328,450
7	083+000	121+000	38.00	48.0	12.0	232	0.33	10,381	123,397	4.20	450	85%	0.49	2.2	12,462,834
8	121+000	150+000	29.00	48.0	12.0	293	0.33	8,776	95,057	3.85	389	85%	0.49	2.2	4,593,730
9	150+000	176+500	26.50	51.0	11.0	306	0.33	10,939	79,660	3.84	284	85%	0.49	2.2	7,522,109
10	176+500	190+000	13.50	51.0	11.0	317	0.33	9,110	80,244	3.85	305	85%	0.49	2.2	5,009,564
11	190+000	225+000	35.00	51.0	11.0	224	0.33	11,219	120,866	4.42	435	85%	0.49	2.2	21,471,622
12	225+000	250+000	25.00	51.0	11.0	264	0.33	9,767	98,595	4.15	395	85%	0.49	2.2	9,941,452
		Total =	248.50												

Se elaboró además, un gráfico para visualizar el número estructural necesario (SNnec) de las secciones:


PY06 TRAMO: ENCARNACIÓN - MINGA GUAZÚ
70,000,000
60,000,000
50,000,000
40,000,000
30,000,000
20,000,000
10,000,000
0
Ejes Remanentes
Ascendente
Descendente
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
Sección

CAPITULO 5

RUGOSIDAD

Capítulo 5 – RUGOSIDAD

5.1. INTRODUCCIÓN

Como ya se ha mencionado anteriormente, los trabajos previos a la medición de rugosidad fueron la selección, marcación y nivelación de las pistas de calibración, la medición de las mismas con el Rugosímetro Bump Integrator y la elaboración de la curva de calibración para dicho equipo.

5.2. CALIBRACIÓN DEL RUGOSÍMETRO

5.2.1. OBJETO

Documentar el procedimiento para la calibración del Rugosímetro ROMDAS-VECTRA.

5.2.2. ALCANCE

Medición de la rugosidad dinámica acumulada en calzadas pavimentadas.

5.2.3. DEFINICIONES

***Rugosidad (Roughness)*:** Son las desviaciones de la superficie del camino con respecto a una superficie plana, de dimensiones tales que afectan a la dinámica del vehículo, a la calidad de circulación, a las cargas dinámicas y al drenaje.

***Rugosímetro (Roughmeter)*:** Son equipos que miden y acumulan los desplazamientos verticales relativos entre el chasis del vehículo o trailer en el que están montados y la rueda del mismo, mientras circulan sobre un tramo de camino, permitiendo obtener una medida de su Rugosidad (Roughness).

Sistema Tipo-Respuesta (Response-Type System): Son sistemas compuestos básicamente por: a) un Rugosímetro (Roughmeter), b) un vehículo, c) un trailer, si el rugosímetro está montado en un trailer y no en el vehículo, y d) un medidor de distancia recorrida. Estos sistemas miden las irregularidades reales del perfil longitudinal, filtradas por el sistema dinámico de la suspensión del vehículo o trailer, acumulando los desplazamientos verticales relativos entre chasis y rueda, producidos al circular.

RTSN (Response-Type System Number): Es el número proporcionado por un Sistema Tipo-Respuesta (Response-Type System), que refleja la magnitud de las irregularidades acumuladas a lo largo de una cierta longitud, expresado en unidades arbitrarias y dependientes del Rugosímetro (Roughmeter) con que cuenta el sistema.

***IRI, Indice de Rugosidad Internacional (International Roughness Index)*:** Es un número que se obtiene por simulación matemática de la respuesta dinámica de un vehículo al perfil longitudinal de la línea de medición, utilizando el modelo matemático denominado "cuarto de carro" y haciéndolo circular a lo largo de dicho perfil a una velocidad de 80 km/h.

5.2.4. EQUIPO

El Bump Integrator es un equipo tipo respuesta-dinámica, que permite registrar y acumular los movimientos verticales relativos entre el chasis de un vehículo y su sistema de rodaje y suspensión. Luego esta señal es procesada para arribar a un indicador de la regularidad longitudinal de la vía. Adecuadamente calibrado, el Bump Integrator permite expresar dicho indicador en términos del Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

El Rugosímetro usualmente operara a tres velocidades de medición: 30, 40 y 60 km/h y efectúa las mediciones sobre ambas huellas del carril de circulación.

Las señales de rugosidad son procesadas en forma automática por medio de una computadora ubicada a bordo del vehículo tractor.

La forma de calibración adoptada para este equipo es a través del Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

5.2.5. CALIBRACION DEL RUGOSIMETRO (Mediciones BUMP a IRI)

El comportamiento de un sistema tipo-respuesta de medición de Rugosidad es propio de cada equipo y variable con el tiempo. Por tales motivos el sistema debe ser calibrado cuando es puesto en servicio y luego en forma periódica, durante su uso, cada vez que sus mediciones caigan fuera de los límites de control.

El método de calibración consiste en obtener varias mediciones con el propio equipo, sobre secciones especiales de calibración. Estas secciones de calibración pertenecen a caminos reales, a las cuales se les ha calculado previamente el IRI.

Las secciones de calibración son recorridas un determinado número de veces por el equipo a calibrar, a las velocidades de operación. Los valores de las mediciones efectuadas con el equipo son graficados con respecto al IRI calculado para cada una de las secciones de calibración. Por medio de un procedimiento matemático de regresión, se obtiene la curva que relaciona ambas mediciones, quedando así definida la ecuación de calibración correspondiente.

5.2.5.1. Selección de las secciones de calibración

Para que la calibración sea válida las secciones de calibración elegidas deben ser representativas de los tipos de superficies y las rugosidades de los caminos a medir.

Es esencial que las secciones de calibración tengan una Rugosidad "natural". Es decir, irregularidades debidas a procesos constructivos, técnicas de mantenimiento y uso, y no "provocadas" ex profeso. Además la Rugosidad debe ser uniforme en toda la longitud de la sección de calibración.

La respuesta dinámica de los vehículos es también función de las irregularidades existentes antes del inicio de la sección a evaluar. Por tal motivo las secciones de calibración deben estar localizadas en sectores de camino con baja pendiente y sin curvas horizontales.

Las secciones de calibración deben tener, en los 50 metros adicionales a cada uno de sus extremos, una Rugosidad similar a la de la propia sección de calibración.

En lo posible las secciones de calibración deben ser seleccionadas sobre caminos con poco tránsito, donde las características de la superficie no cambien demasiado con el tiempo.

La calibración que se realice será válida sólo en el rango de Rugosidades cubierto por las secciones de calibración. En general sólo puede admitirse extrapolación dentro de un entorno de 30% en cada dirección (o sea 30% menos que el más liso y 30% más que el más rugoso).

En nuestro caso, se han seleccionado las pistas de calibración en el Acceso Areguá – Patiño – Ypacaraí (pistas Q, R, S y T) y el Acceso Ypacaraí – Pirayú (pista O) y las pistas de control, sobre la Ruta N° 9 (pistas PY09_54, PY09_56, PY09_61, PY09_63 y PY09_67), y el tramo Cnel. Oviedo – Santaní (PY08_159, PY08_172), siendo en todos los casos de 300 metros de longitud.

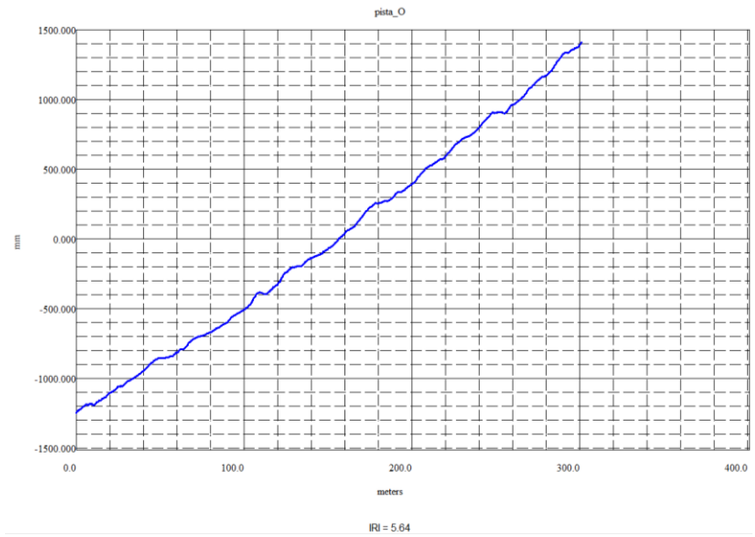
5.2.5.2. Determinación del IRI de las secciones de calibración

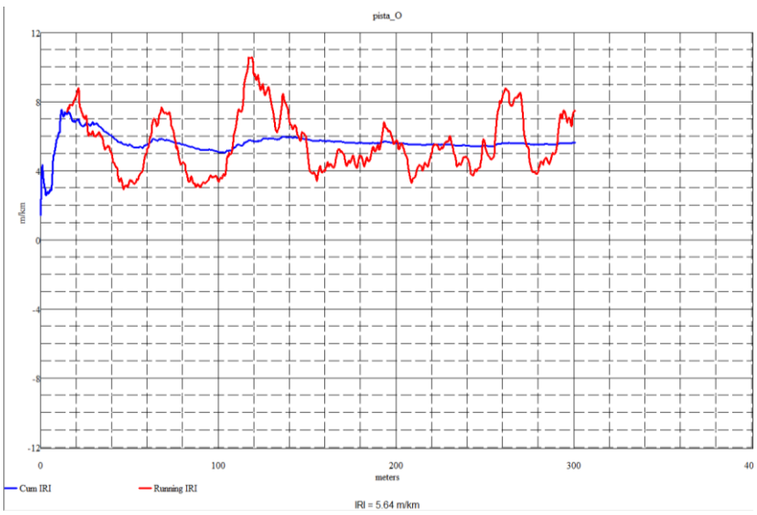
Para la calibración de los sistemas tipo-respuesta de medición de Rugosidad, es suficiente determinar el IRI de las secciones de calibración en base a un método Clase 2 de medición de rugosidad. Un método Clase 2 requiere que el perfil longitudinal sea medido como una serie de puntos equiespaciados a 500 mm y con una precisión de lectura de 1 mm.

Para la determinación del IRI de las secciones de calibración se procedió a la utilización equipo tipo "Dipstick" Modelo 2272 Marca FACE que determina el perfil longitudinal cada 300 mm con una precisión de lectura de 0,1 mm, para luego calcular el IRI.

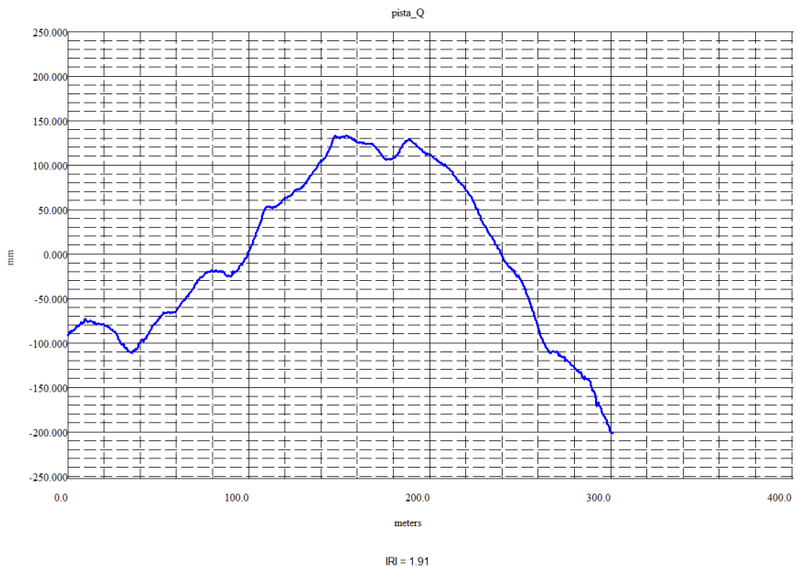
A continuación se exponen los perfiles (gráfico superior en color azul) y el cálculo del IRI (gráfico inferior en azul y rojo) para cada una de las pistas de calibración:

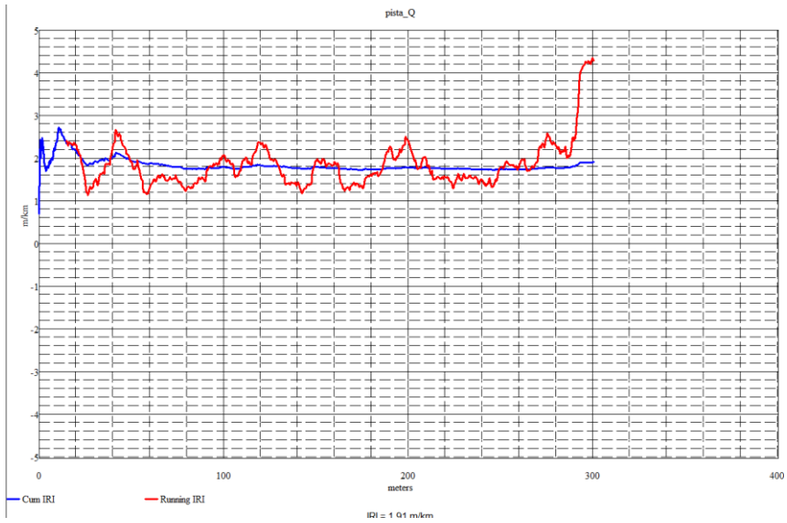
Pista O



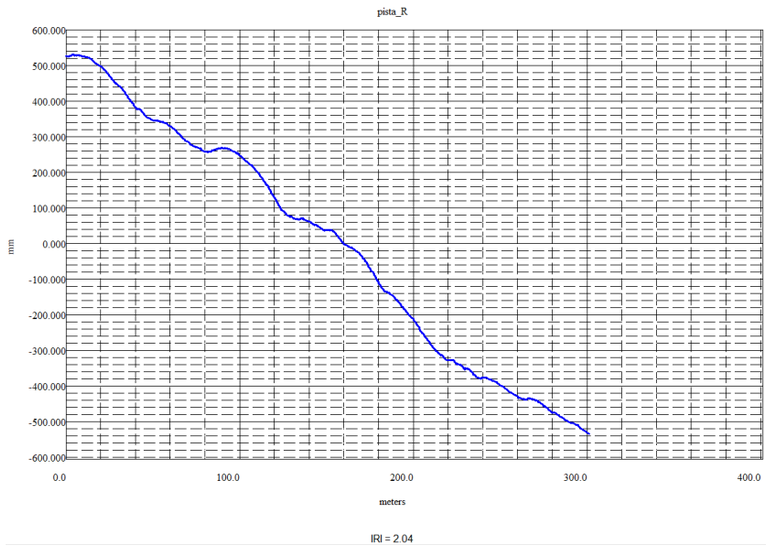


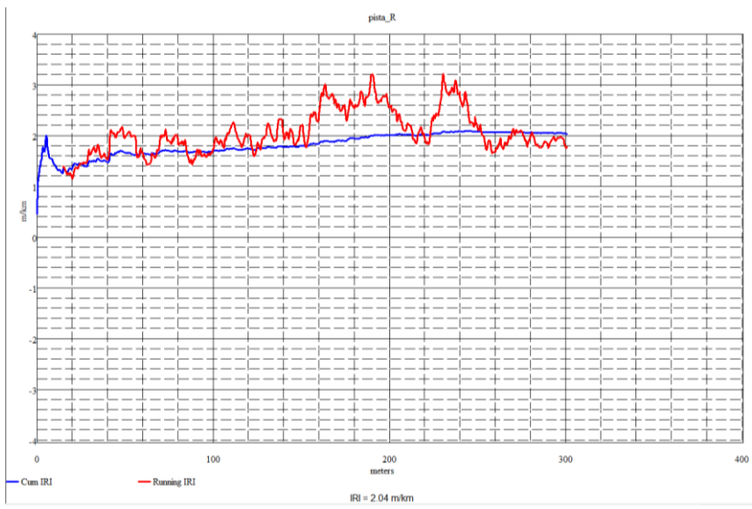
Pista Q



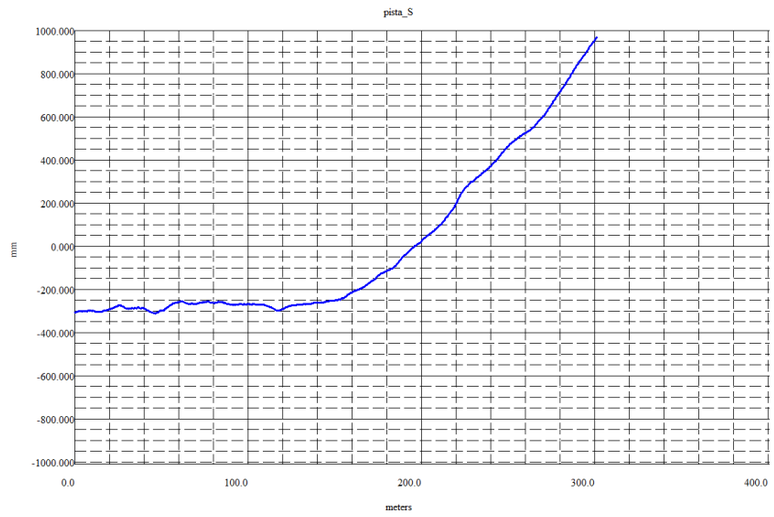


Pista R

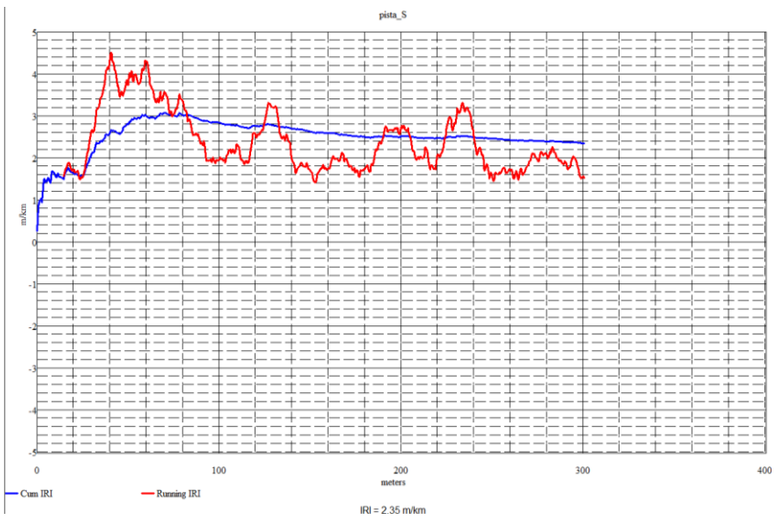




Pista S

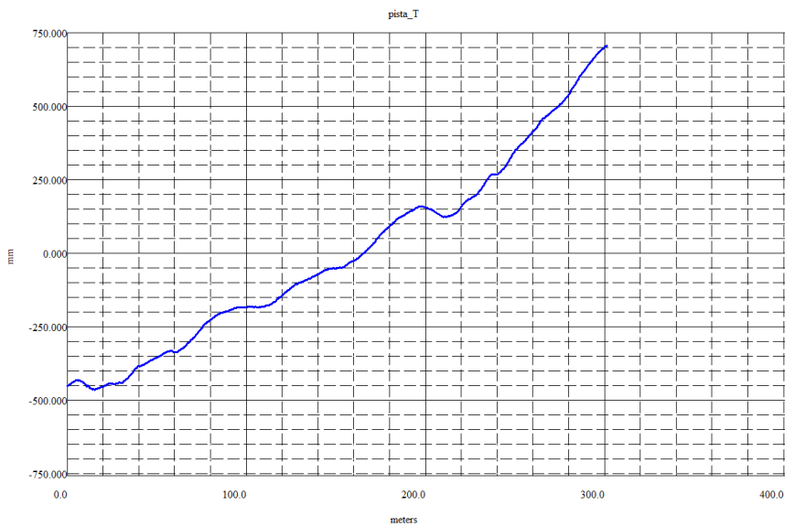


IRI = 2.35

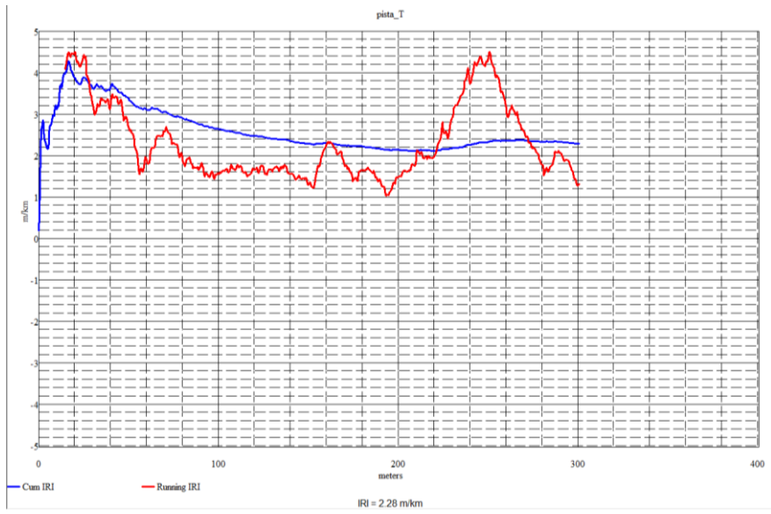


IRI = 2.35 m/km

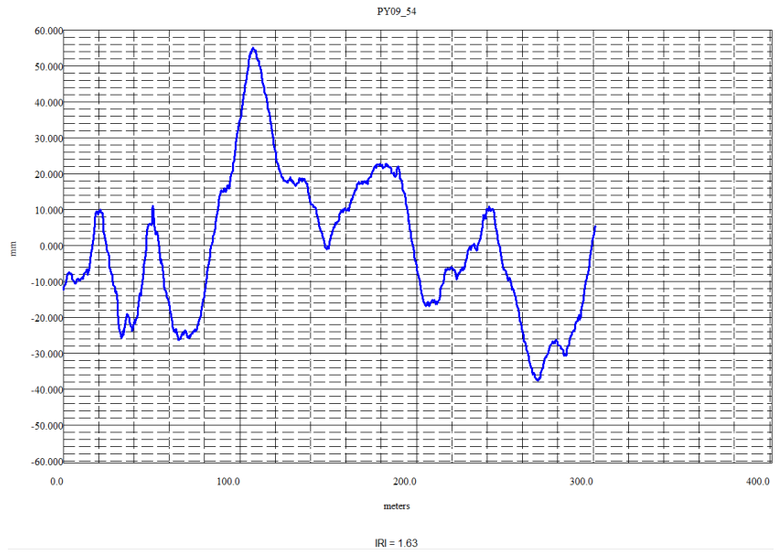
Pista T



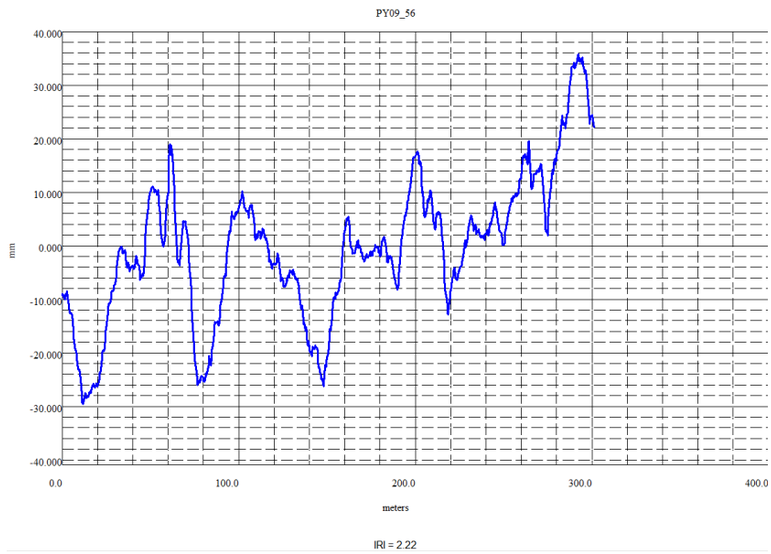
IRI = 2.28

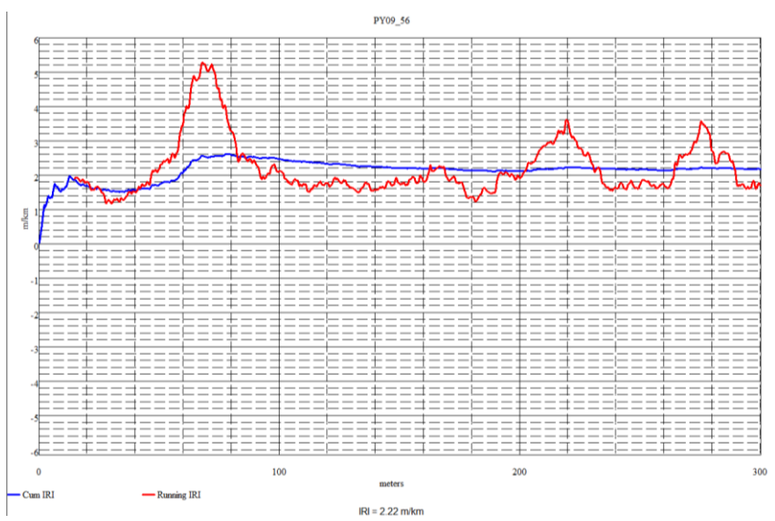


Pista PY09_54

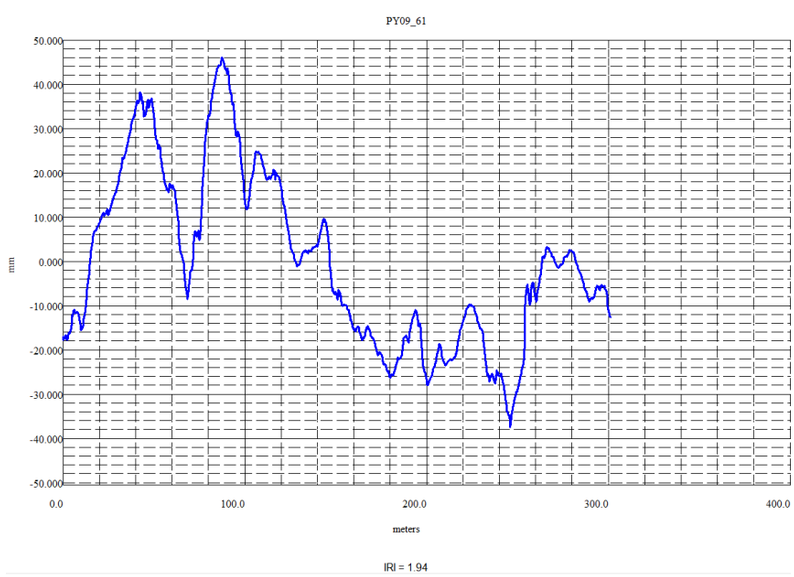


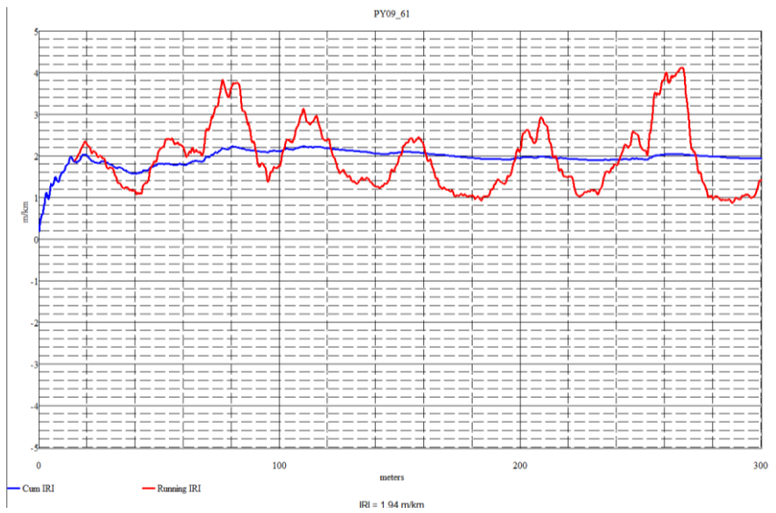
Pista PY09_56



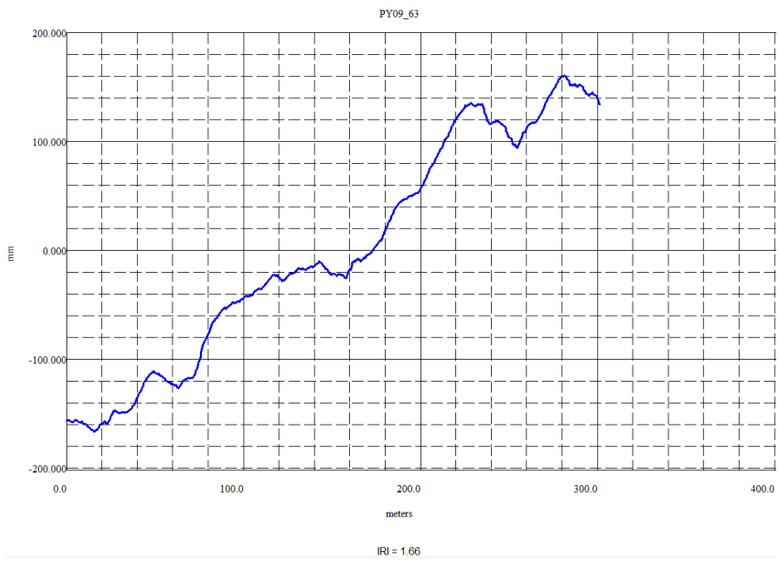


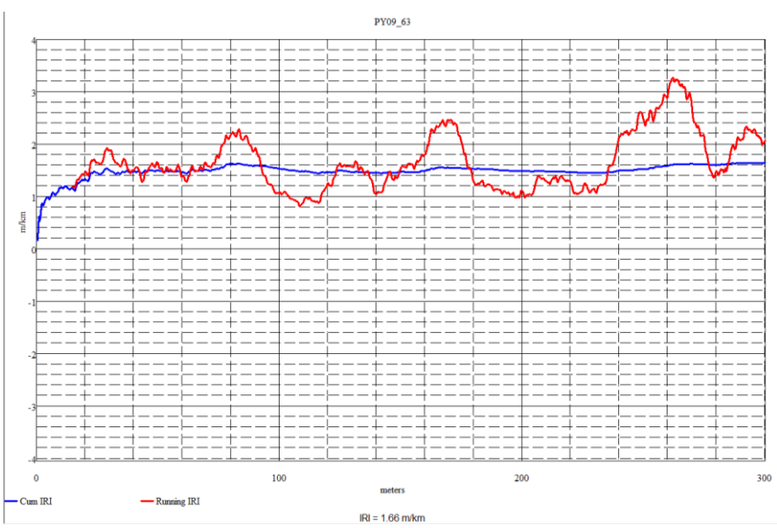
Pista PY09_61





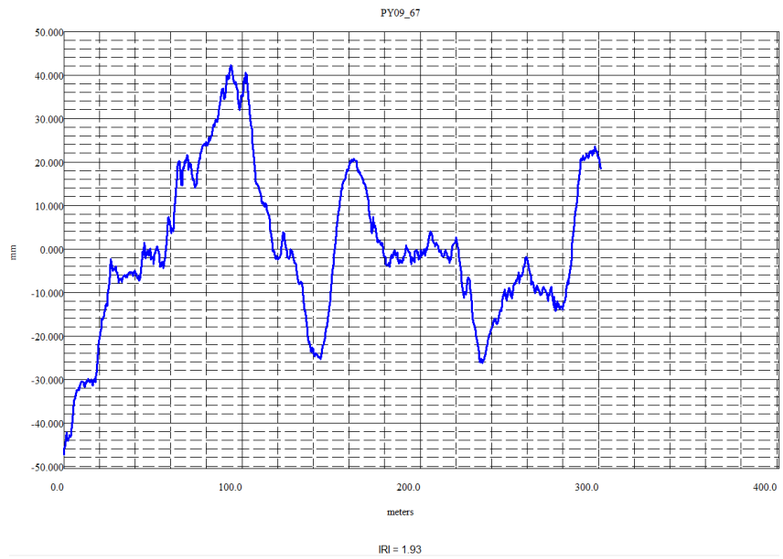
Pista PY09_63

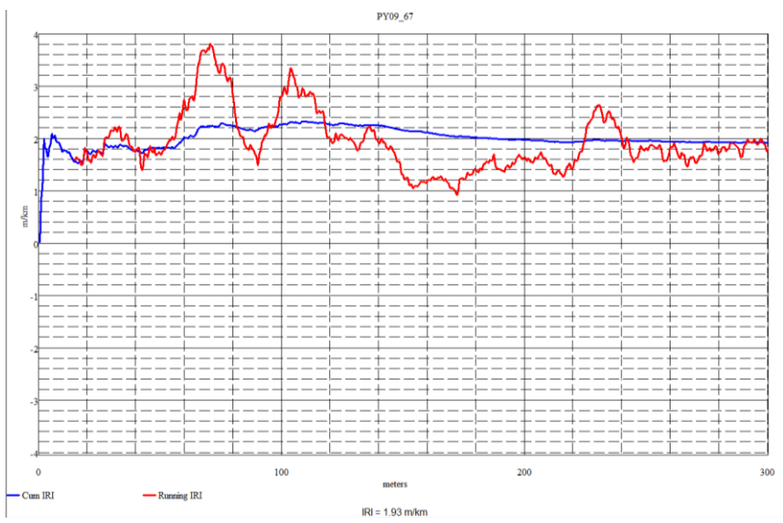




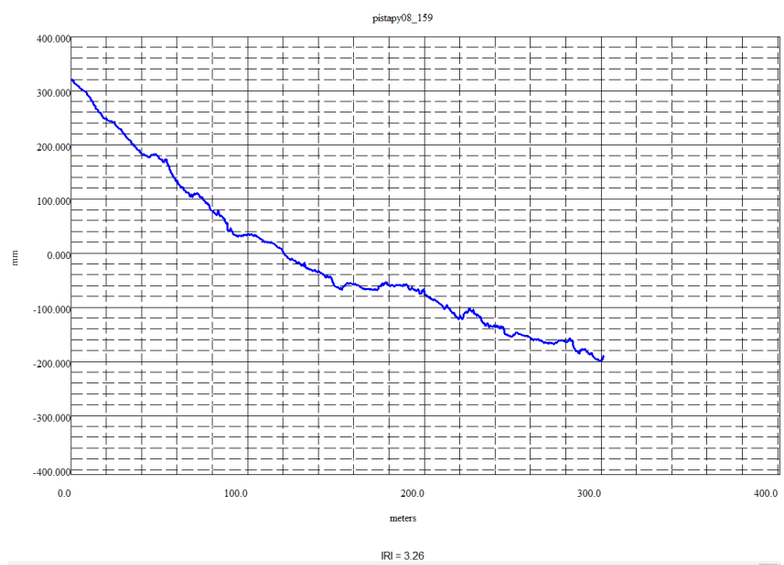
.

Pista PY09_67

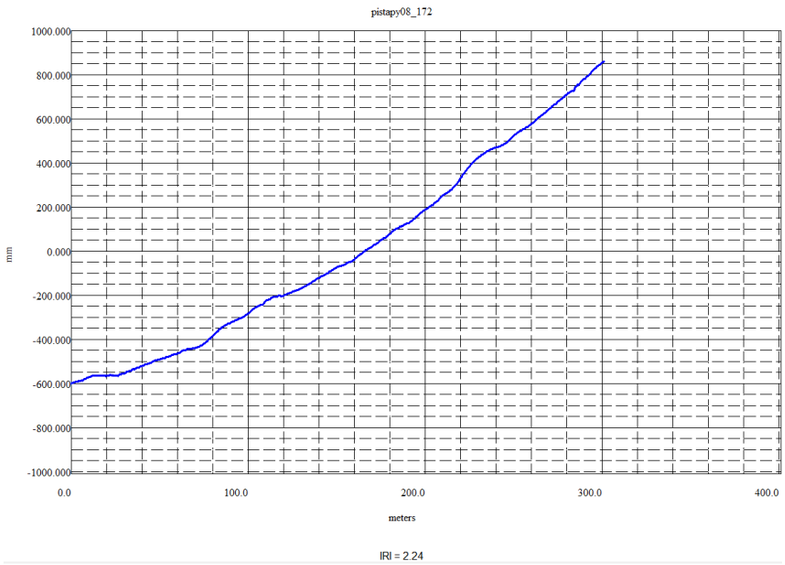




Pista PY08_159



Pista PY08_172



Las secciones o pistas de calibración empleadas y sus correspondientes valores del IRI calculado son las siguientes:

N° PISTA	NOMBRE	UBICACIÓN	IRI (m/km)
1	PISTA O	Tramo: Ypacaraí – Pirayú (Asc)	5.64
2	PISTA Q	Tramo: Areguá – Patiño – Ypacaraí (Asc)	1.91
3	PISTA R	Tramo: Areguá – Patiño – Ypacaraí (Asc)	2.04
4	PISTA S	Tramo: Areguá – Patiño – Ypacaraí (Desc)	2.35
5	PISTA T	Tramo: Areguá – Patiño – Ypacaraí (Desc)	2.28
6	PISTA PY09_54	km 54 Ruta N° 9 (Desc)	1.63
7	PISTA PY09_56	km 56 Ruta N° 9 (Asc)	2.22
8	PISTA PY09_61	km 61 Ruta N° 9 (Asc)	1.94
9	PISTA PY09_63	km 63 Ruta N° 9 (Desc)	1.66
10	PISTA PY09_67	km 67 Ruta N° 9 (Asc)	1.93
11	PISTA PY08_159	km 159 Ruta N° 8 (Asc)	3.26
12	PISTA PY08_172	km 172 Ruta N° 8 (Desc)	2.24

5.2.5.3. Medición de las secciones de calibración con el equipo a calibrar

Las secciones de calibración son recorridas con el equipo a calibrar, un número de veces determinado y a la velocidad de operación del equipo.

Las mediciones son luego promediadas y se obtiene el valor real de Rugosidad dado por el equipo, en las unidades propias del equipo de medición (en este caso para el Bump Integrator: número de impulsos).

Fueron realizadas 10 mediciones por pista, a una velocidad de 40 km/h y los resultados obtenidos son los siguientes:

LONGITUD DE PISTAS: 300 M - VELOCIDAD: 40 KM/H					
N° PISTA	NOMBRE	UBICACIÓN	BUMPS (IMPULSOS) PROMEDIO	DESVÍO ESTANDAR	COV (DESV/PROM)
1	PISTA O	Tramo: Ypacaraí – Pirayú (Asc)	527	7.92	1.5%
2	PISTA Q	Tramo: Areguá – Patiño – Ypacaraí (Asc)	290	5.62	1.9%
3	PISTA R	Tramo: Areguá – Patiño – Ypacaraí (Asc)	278	4.47	1.6%
4	PISTA S	Tramo: Areguá – Patiño – Ypacaraí (Desc)	337	10.82	3.2%
5	PISTA T	Tramo: Areguá – Patiño – Ypacaraí (Desc)	322	5.87	1.8%
6	PISTA PY09_54	km 54 Ruta N° 9 (Desc)	270	7.75	2.9%
7	PISTA PY09_56	km 56 Ruta N° 9 (Asc)	367	11.54	3.1%
8	PISTA PY09_61	km 61 Ruta N° 9 (Asc)	325	11.22	3.4%
9	PISTA PY09_63	km 63 Ruta N° 9 (Desc)	267	6.82	2.6%
10	PISTA PY09_67	km 67 Ruta N° 9 (Asc)	299	9.81	3.3%
11	PISTA PY08_159	km 159 Ruta N° 8 (Asc)	437	7.56	1.7%
12	PISTA PY08_172	km 172 Ruta N° 8 (Desc)	366	8.64	2.4%

5.2.5.4. Ecuación de calibración

La ecuación de calibración del equipo se calcula planteando una regresión lineal simple. La ecuación de calibración tendría la siguiente forma:

$$IRI = a\ (RTSN) + b$$

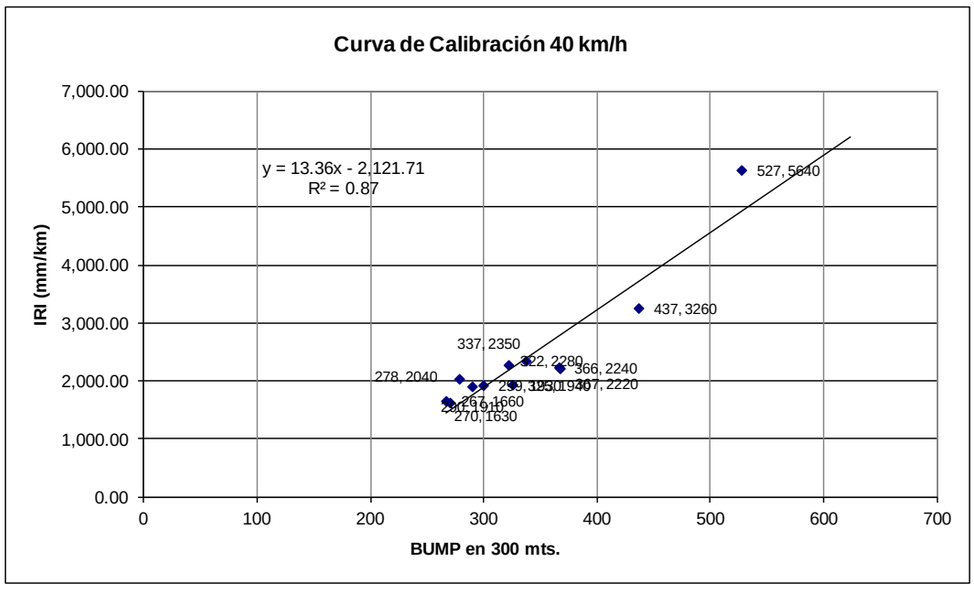
Donde:
IRI= valor del IRI de referencia de la sección (m/km)
RTSN= valor de medición del rugosímetro (Impulsos)
a, b= constantes de calibración

La última calibración efectuada, en un todo de acuerdo a los procedimientos descriptos en los puntos anteriores, y en base a la Norma ASTM E 1448-92 (2004)

"Standard Practice for Calibration of Systems Used for Measuring Vehicular Response to Pavement Roughness", dio origen a la siguiente ecuación de calibración, vigente para este estudio:

Vel: 40 km/h $IRI = 13.36(RTSN) - 2121.71$

Donde:
IRI se expresa en (m/km)
RTSN= valor de medición del rugosímetro (Impulsos)



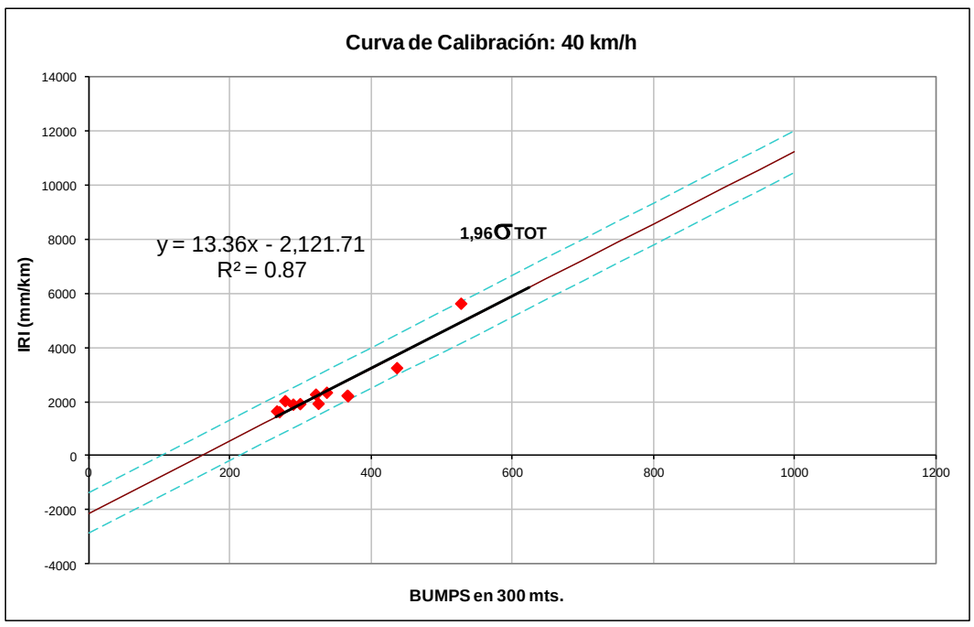
Fue calculado el error típico de la regresión realizada y se obtuvo el valor de:

σ_{TOT}= 0,386 m/km

El error típico de la regresión (también conocido como el error estándar de la estimación) mide la variabilidad, o dispersión de los valores observados alrededor de la línea de regresión.

Asociando el concepto de confiabilidad a nuestra regresión, el error del sistema con un 95% de confiabilidad sería de 1,96 σ_{TOT}, es decir:

Error del sistema con 95% de confiabilidad = 0,756 m/km



5.3. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE RUGOSIDAD

Se procedió a medir la rugosidad del tramo en estudio a la velocidad de 40 Km/h, realizando mediciones en sentido ascendente y descendente.

El paso de integración configurado en el equipo es de 100 m. Es decir, el Bump Integrator acumulará los movimientos verticales relativos entre el chasis del vehículo y su sistema de rodaje y suspensión, generando un RTSN (Bumps) cada 100 m, el cual será convertido a IRI mediante la ecuación de calibración.

A continuación se exponen los resultados de la medición:

5.3.1. Ruta Nacional N° 6 "Dr. Juan León Mallorquín"

5.3.1.1. Zona urbana (Prog 0+000 a Prog 9+000)

	VALORES DE IRI DEL TRAMO COMPLETO (m/km)			
	PROMEDIO	DESV. EST.	Caract 95%	COV
Sentido ASCENDENTE	3,41	0,81	5,00	24%
Sentido DESCENDENTE	3,71	0,84	5,36	23%

Sentido Ascendente:

Total de tramos de 100 m medidos = 69

Valores de IRI (m/km)	<3	>3	>3,5	>3,75	>4	>4,254
Tramos de 100 m	25	44	36	27	13	9
Porcentaje del Total	36.2%	63.8%	52.2%	39.1%	18.8%	13.0%

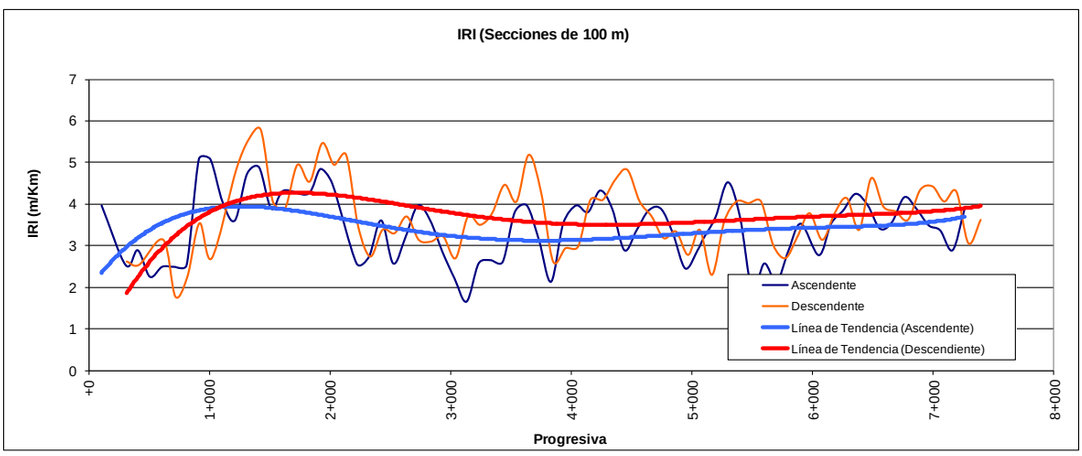
Sentido Descendente:

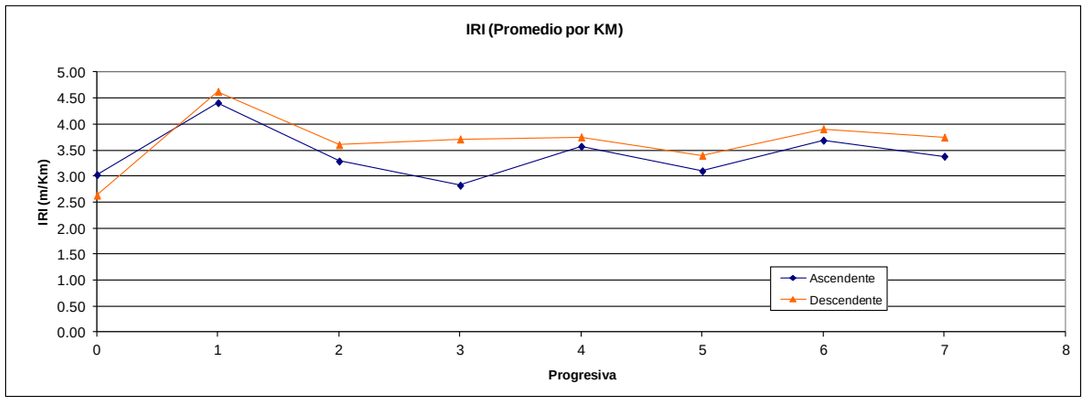
Total de tramos de 100 m medidos = 69

Valores de IRI (m/km)	<3	>3	>3,5	>3,75	>4	>4,254
Tramos de 100 m	13	56	40	33	27	17
Porcentaje del Total	18.8%	81.2%	58.0%	47.8%	39.1%	24.6%

Obs.: Algunos tramos de 100 m, fueron descartados del análisis debido a que durante la medición la velocidad se encontraba fuera de rango permitido.

A continuación se observan los gráficos elaborados en base a los resultados:





5.3.1.2. Ruta N° 6 (Prog 9+000 a Prog 250+000)

	VALORES DE IRI DEL TRAMO COMPLETO (m/km)			
	PROMEDIO	DESV. EST.	Caract 95%	COV
Sentido ASCENDENTE	2,73	1,04	4,76	38%
Sentido DESCENDENTE	2,90	0,89	4,64	31%

Sentido Ascendente:

Total de tramos de 100 m medidos = 2326

Valores de IRI (m/km)	<3	>3	>3,5	>3,75	>4	>4,254
Tramos de 100 m	1413	913	537	413	302	193
Porcentaje del Total	60.7%	39.3%	23.1%	17.8%	13.0%	8.3%

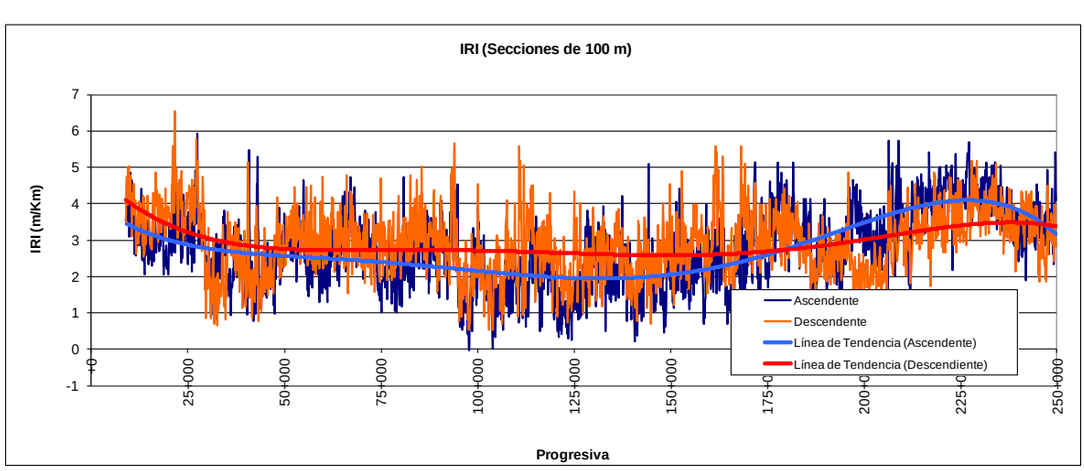
Sentido Descendente:

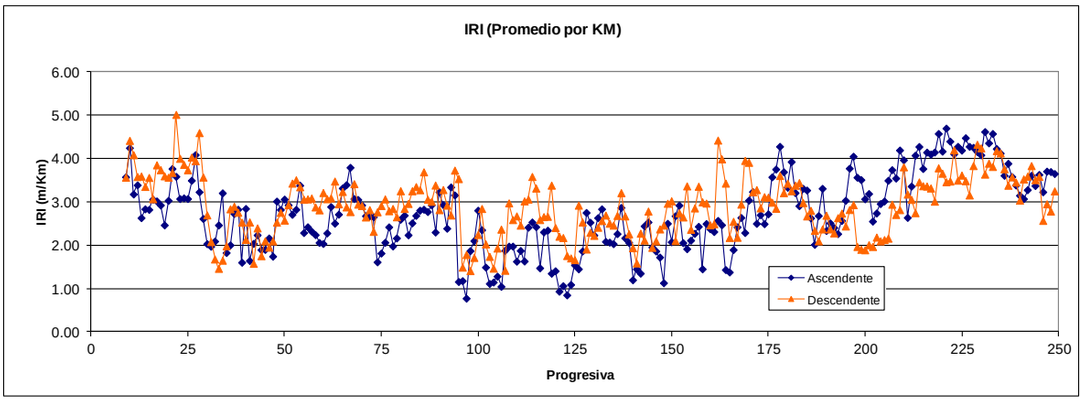
Total de tramos de 100 m medidos = 2324

Valores de IRI (m/km)	<3	>3	>3,5	>3,75	>4	>4,254
Tramos de 100 m	1239	1085	558	393	254	147
Porcentaje del Total	53.3%	46.7%	24.0%	16.9%	10.9%	6.3%

Obs.: Algunos tramos de 100 m, fueron descartados del análisis debido a que durante la medición la velocidad se encontraba fuera de rango permitido.

A continuación se observan los gráficos elaborados en base a los resultados:





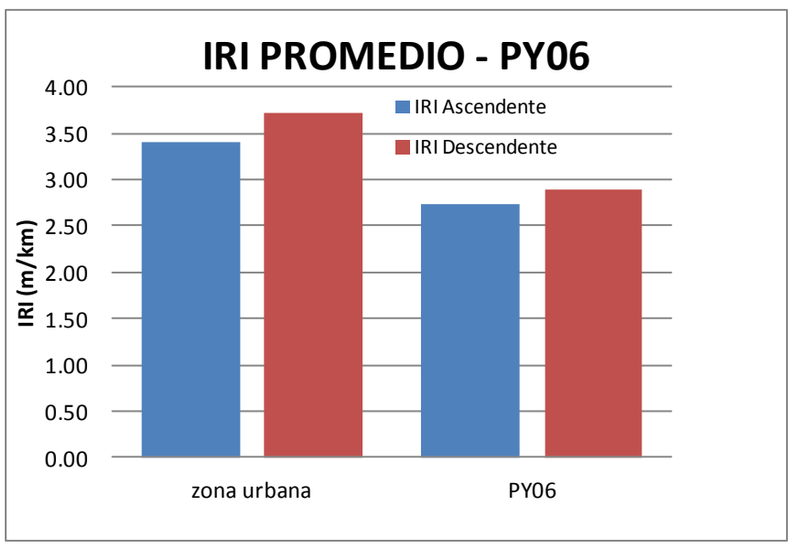
5.3.2. Resumen General

A continuación se expone el resumen general de la medición del IRI:

MEDICION DE RUGOSIDAD
RUTA NACIONAL N° 6 "DR. JUAN LEÓN MALLORQUÍN"

SUB TRAMO	PROGRESIVA		LONG.	ESPESORES		IRI CARRIL ASCENDENTE (m/km)				IRI CARRIL DESCENDENTE (m/km)			
	INICIO	FIN		TOTAL	C°A°	PROMEDIO	DESV. EST.	Caract 95%	COV	PROMEDIO	DESV. EST.	Caract 95%	COV
			km	cm	cm								
1	0+000	7+500	7.50	51.0	6.0	3.41	0.81	5.00	24%	3.71	0.84	5.36	23%
2	9+000	18+500	9.50	51.0	6.0								
3	18+500	42+000	23.50	51.0	6.0								
4	42+000	48+000	6.00	51.0	6.0								
5	48+000	73+000	25.00	42.0	5.0								
6	73+000	83+000	10.00	48.0	12.0								
7	83+000	121+000	38.00	48.0	12.0	2.73	1.04	4.76	38%	2.90	0.89	4.64	31%
8	121+000	150+000	29.00	48.0	12.0								
9	150+000	176+500	26.50	51.0	11.0								
10	176+500	190+000	13.50	51.0	11.0								
11	190+000	225+000	35.00	51.0	11.0								
12	225+000	250+000	25.00	51.0	11.0								

Total=	7.50	**zona urbana**	3.41	(Promedio General)	3.71	(Promedio General)
Total=	241.00	**PY06**	2.73	(Promedio General)	2.90	(Promedio General)



Los valores de IRI de los tramos de 100 m se encuentran en el **Anexo VI**.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

Capítulo 6 – CONCLUSIONES

Con base en los antecedentes disponibles para la elaboración del presente informe, con el relevamiento realizado pudo determinarse la capacidad remanente de la estructura del pavimento en el tramo en estudio.

La capacidad remanente de la estructura en estudio, que ha sido determinada mediante el coeficiente SNeff (número estructural efectivo) obtenido del retrocálculo de las deflexiones y de los parámetros de diseño y serviciabilidad considerados, nos indica la cantidad de ejes equivalentes que aun puede recibir la estructura.

Del análisis estructural, se puede concluir que el tramo posee una respuesta estructural heterogénea comparando entre sí las distintas secciones estudiadas, lo cual puede apreciarse claramente observando las deflexiones e indicadores. El carril descendente (sentido Miga Guazú – Encarnación) se encuentra más comprometido estructuralmente que el carril ascendente. En general, se concluye que la traza principal tiene un buen comportamiento estructural, lo cual se refleja en los coeficientes SNeff obtenidos del retrocálculo para cada sección.

Cabe destacar, que no ha sido calculada la necesidad de refuerzo estructural por no contar con datos de tránsito actualizados.

Con respecto a la medición de rugosidad de los distintos tramos en estudio, y atendiendo que la medición fue realizada en sentido ascendente y descendente, se puede concluir que ambos carriles tienen un comportamiento similar, reflejados en los datos estadísticos.

El IRI promedio de la Ruta Nacional N° 6 en la zona urbana, sentido ascendente es de 3,41 m/km y en el sentido descendente de 3,71 m/km, mientras que en el tramo desde la Prog 9+000 hasta la Prog 250+000 en sentido ascendente es de 2,73 m/km y en sentido descendente es de 2,90 m/km.

Como las mediciones fueron realizadas con el equipo BUMP INTEGRATOR que es un rugosímetro tipo respuesta dinámica, los resultados son obtenidos a través de una curva de calibración, motivo por el cual es recomendable tener presente el error del sistema (0,756 m/km – 95% de confiabilidad).