



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

COMPARACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FRANCISCO JAVIER ROMERO ARAYA

**PROFESOR GUÍA:
CLAUDIO FUENTES LÓPEZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
VICTOR ROCO HERRERA
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA**

SANTIAGO, CHILE

OCTUBRE 2008

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: FRANCISCO ROMERO A.
FECHA: 20/10/2008
PROF. GUIA: Sr. CLAUDIO FUENTES

“COMPARACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS”

La presente Memoria tiene por propósito comparar y correlacionar los valores del módulo de elasticidad de las capas que conforman una misma estructura de pavimento asfáltico, obtenidos mediante diversos procedimientos y los procedimientos actualmente utilizados.

Los procedimientos que se emplean en la actualidad son los siguientes: ensayos de laboratorio o método AASHTO (*Amerian Association of State Highway and Transportation Officials*) para el Suelo, método FHWA (*Federal Highway Administration*) para la Base y método *Shell*, mediante el programa computacional BANDS 2.0, para el Pavimento Asfáltico.

Los procedimientos que se analizan en la presente Memoria, y con los cuales se comparan y correlacionan los mencionados anteriormente, son los siguientes: WSDOT (*Washington State Department of Transportation*), FHWA y Retrocálculo (mediante el programa computacional MODTAG) para el Suelo, WSDOT y Retrocálculo (mediante el programa computacional MODTAG) para la Base, y ensayos de laboratorio con las prensas MTS y NAT, WSDOT, FHWA, Retrocálculo (mediante el programa computacional MODTAG), *Asphalt Institute* y *Shell* (mediante fórmulas) para el Pavimento Asfáltico.

El análisis se efectúa en la obra concesionada “Autopista Urbana Acceso Nor Oriente a Santiago”, desde esta obra se obtienen los datos y las muestras necesarias para el análisis. En este caso los datos corresponden a mediciones de deflectometría y las muestras, a testigos de pavimento asfáltico; además, se confeccionan probetas en el laboratorio.

La primera etapa del presente estudio corresponde a la determinación del módulo de elasticidad de mezclas asfálticas en forma empírica y teórica. La forma empírica consiste en determinar el módulo de elasticidad de la mezcla por dos procedimientos: en terreno y en laboratorio. La forma teórica consiste en usar las fórmulas y gráficos propuestos por el *Asphalt Institute* y por *Shell* para determinar el módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica.

La segunda etapa y final consiste en comparar y correlacionar los resultados obtenidos mediante los métodos usados en la actualidad y a través de los equipos de auscultación y ensayos de laboratorio vial.

El resultado que se obtiene es un Factor de Correlación que relaciona el módulo de elasticidad determinado, para una misma estructura de pavimento asfáltico, de acuerdo a los procedimientos planteados.

A partir de este Factor de Correlación se infiere que los procedimientos actualmente utilizados podrían ser reemplazados por otros cuyos resultados son similares y cuyo error asociado es menor. Específicamente, se propone la utilización del Retrocálculo para determinar el módulo de elasticidad de cada una de las capas que conforman una misma estructura de pavimento asfáltico, siendo éste complementado y ajustado con la realización de ensayos de laboratorio con la prensa NAT, en el caso de la capa de Pavimento Asfáltico.

En memoria de mi abuelo Carlos Alberto Romero Sepúlveda.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi padre Francisco Romero Dettoni por su incesante apoyo, mi profesor guía Claudio Fuentes López, Gerente General de Gauss S.A. a los profesores integrantes de mi comisión Victor Roco Herrera, Director del Laboratorio Nacional de Vialidad, y Federico Delfín Ariztía, Sub Director del Instituto de Investigación y Ensayo de Materiales (IDIEM), y a todas aquellas personas que apoyaron el desarrollo de la presente Memoria: René Labra, Inspector fiscal de la Autopista Urbana Acceso Nor Oriente a Santiago, Sergio Mathew, Jerico Nemi, Eusebio Beroiza, Rosa Zúñiga, Jefa del Sub Departamento Tecnológico y Materiales, Rebeca Vega, Jorge Silva, Gabriel Riquelme, Gabriel Palma, Rubén Ríos, Marcelino González, Aníbal Meza, Javier Galeno, Carolina Soto, Fernando Fuentes, Sergio Valverde, Claudia Sepúlveda y Raúl Palma.

CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
Introducción.....	1
Objetivos.....	2
Objetivos generales.....	2
Objetivos específicos.....	2
Metodología.....	3
2. EQUIPOS UTILIZADOS.....	5
Deflectómetro de impacto (FWD)	5
Prensa MTS	5
Nottingham Asphalt Tester (Prensa NAT)	6
3. PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL	7
4. DESARROLLO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.....	10
Determinación del tramo homogéneo.....	10
Determinación del módulo de elasticidad en laboratorio	10
Testigos.....	10
Confección del probetas de laboratorio	11
Determinación de la densidad.....	14
Determinación del módulo de elasticidad.....	14
Utilizando la prensa MTS.....	14
Utilizando la prensa NAT	14
Determinación del módulo de elasticidad en terreno	15
Datos.....	15
Cálculo Directo.....	16
Retrocálculo.....	17
Caracterización del asfalto.....	17
Determinación de la penetración	17

Determinación del punto de ablandamiento	18
Determinación del módulo de elasticidad teórico	18
5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	20
Corrección por temperatura	20
Determinación del módulo de elasticidad combinado.....	21
Análisis de los resultados	22
6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	28
7. BIBLIOGRAFÍA.....	30
ANEXO A: DETERMINACIÓN DEL TRAMO HOMOGÉNEO	31
ANEXO B: DATOS DE DEFLECTOMETRÍA.....	37
ANEXO C: DETERMINACIÓN DEL ESPESOR Y DEL DIÁMETRO DE LOS TESTIGOS.....	41
ANEXO D: CONFECCIÓN DE PROBETAS DE LABORATORIO	43
ANEXO E: DETERMINACIÓN DEL ESPESOR Y EL DIÁMETRO DE LAS PROBETAS	45
ANEXO F: DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LOS TESTIGOS Y DE LAS PROBETAS.....	46
ANEXO G: DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS TESTIGOS, MEDIANTE LA PRENSA MTS	48
ANEXO H: DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD MEDIANTE LA PRENSA NAT	53
ANEXO I: CORRECCIÓN POR DENSIDAD DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS PROBETAS.....	55
ANEXO J: DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO ..	57

ANEXO K: DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN TERRENO – CÁLCULO DIRECTO.....	58
ANEXO L: DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN TERRENO – RETROCÁLCULO	69
ANEXO M: RECUPERACIÓN DE ASFALTO	75
ANEXO N: DETERMINACIÓN DE LA PENETRACIÓN	76
ANEXO O: DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE ABLANDAMIENTO	77
ANEXO P: DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD TEÓRICO	78
ANEXO Q: DETERMINACIÓN DEL ERROR	84
ANEXO R: CORRECCIÓN POR TEMPERATURA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD	108
ANEXO S: DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD COMBINADO.....	113

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción.

La Dirección de Vialidad de Chile, en particular su Laboratorio Nacional, está estudiando la implementación de un Método Empírico Mecanicista (MEM) para el diseño estructural de pavimentos. El método se basa en que una estructura de pavimento y su fundación se pueden modelar como un sistema elástico multicapa; por lo tanto, es posible calcular tensiones, deformaciones o deflexiones en cualquier punto del sistema. Sin embargo, los investigadores reconocen que el comportamiento del pavimento probablemente se ve influenciado por un sinnúmero de factores que no pueden ser modelados en forma precisa mediante métodos mecanicistas. Por este motivo, resulta necesario calibrar los modelos con observaciones del comportamiento; esto es, correlaciones empíricas a través de equipos especializados.

En este contexto, es necesario caracterizar los materiales a emplear a través de sus propiedades, como el módulo elástico y el coeficiente de Poisson, leyes de fatiga y calibración de los datos de laboratorio con el comportamiento en terreno.

En particular, en este estudio se caracteriza los materiales mediante su módulo elástico, estimado empíricamente, a través de mediciones en laboratorio utilizando la prensa NAT y la prensa MTS, y en terreno a través de la deflectometría de impacto (FWD), y teóricamente mediante las fórmulas propuestas por el *Asphalt Institute* y por *Shell*.

En la actualidad, si bien es posible determinar actualmente el módulo elástico de mezclas asfálticas en el laboratorio, los equipos disponibles a la fecha son muy complejos y onerosos o demasiado elementales, haciendo poco práctico su uso masivo. No obstante, en la actualidad el Laboratorio Nacional de Vialidad posee dos herramientas nuevas para la determinación del módulo de elasticidad de mezclas asfálticas: la Prensa NAT y el Deflectómetro de Impacto.

La Prensa NAT permite determinar el módulo elástico mediante un ensaye de tracción indirecta. La ventaja es que para el ensaye usa probetas convencionales de 100 mm de diámetro, las que se pueden moldear en laboratorio o se pueden obtener de testigos de obra.

El Deflectómetro de Impacto permite estimar el módulo en el pavimento terminado en forma indirecta y no-destructiva.

Ambas herramientas son de alto rendimiento y bajo costo, lo que permitiría un análisis masivo de la red vial del país, obteniéndose una base de datos apropiada tanto para la implementación de un nuevo sistema de diseño, como para evaluar la capacidad remanente de los pavimentos existentes.

Por otra parte, hasta ahora el módulo empleado en los diseños se obtiene de fórmulas que tienen como entrada las características del cemento asfáltico, el contenido de asfalto, el índice de vacíos en la mezcla y la granulometría de los agregados. Específicamente, en el diseño de pavimentos se utiliza un modelo de tres capas (Suelo, Base y Pavimento Asfáltico), cuyos módulos de elasticidad son determinados de acuerdo a diferentes procedimientos: ensayos de laboratorio o método AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) en el caso del Suelo, método FWHA (*Federal Highway Administration*) en el caso de la Base y método *Shell* en el caso del Pavimento Asfáltico.

Los resultados obtenidos mediante estos métodos no han sido validados y sólo son aplicables a mezclas y asfaltos convencionales. Es por este motivo que en el presente Trabajo de título se realiza un estudio orientado a validar o reemplazar los métodos antes mencionados. Esto se hace a través de la comparación de los módulos de elasticidad del suelo, la base y el pavimento asfáltico obtenidos mediante diferentes procedimientos con los obtenidos mediante los procedimientos utilizados actualmente en el diseño de pavimentos.

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivos generales.

El objetivo de este estudio es comparar los módulos de elasticidad obtenidos en forma teórica, mediante los procedimientos propuestos por el *Asphalt Institute* y por *Shell*, y en forma empírica, a través de la prensa NAT, la prensa MTS y el deflectómetro de impacto (Cálculo Directo y Retrocálculo), con los resultados obtenidos mediante los procedimientos actualmente utilizados en el diseño de pavimentos. De esta manera, se sientan las bases para establecer a futuro la metodología que mejor represente este parámetro.

1.2.2. Objetivos específicos.

Específicamente, el propósito es correlacionar los módulos de elasticidad obtenidos de forma teórica y de forma empírica, tanto en laboratorio como en terreno, con los módulos de elasticidad obtenidos mediante

los procedimientos actualmente utilizados en el diseño de pavimentos. Para ello se proponen los siguientes objetivos específicos:

1. Caracterizar la mezcla asfáltica en terreno.
Se determina el módulo de elasticidad a través de la utilización del deflectómetro de impacto, mediante Cálculo Directo y Retrocálculo.
2. Caracterizar la mezcla asfáltica en laboratorio.
Se determina el módulo de elasticidad mediante la utilización de la prensa NAT y la prensa MTS.
3. Caracterizar el asfalto.
Se determina la penetración y el punto de ablandamiento mediante ensayos de laboratorio tanto para el asfalto recuperado como para el asfalto original.
4. Determinar el módulo de elasticidad en forma teórica.
Se determina el módulo de elasticidad mediante los procedimientos establecidos por el *Asphalt Institute* y por *Shell*.
5. Establecer correlaciones entre los resultados obtenidos y los procedimientos utilizados actualmente.

1.3. Metodología.

Para cumplir con los objetivos establecidos, se seguirán los pasos siguientes:

1. Recolección de datos y extracción de testigos en terreno.
2. Determinación del Módulo de Elasticidad en laboratorio para testigos extraídos en terreno.
3. Confección de las mezclas tipo en el laboratorio.
4. Confección de las probetas a ensayar.
5. Determinación del Módulo de Elasticidad en laboratorio para probetas fabricadas en el laboratorio.
6. Determinación del módulo de elasticidad mediante deflectometría de impacto y cálculo directo.
7. Determinación del módulo de elasticidad en terreno mediante deflectometría de impacto y retrocálculo.
8. Recuperación del asfalto desde los testigos ensayados.
9. Caracterización del asfalto recuperado y del asfalto virgen mediante los ensayos de “Penetración” y “Punto de Ablandamiento”.
10. Determinación del módulo de elasticidad teórico mediante las fórmulas establecidas por el *Asphalt Institute* y por *Shell*.

11. Correlación de los resultados obtenidos tanto teórica como empíricamente mediante la confección de gráficos.

2. EQUIPOS UTILIZADOS

2.1. Deflectómetro de impacto (FWD).

El Deflectómetro de Impacto (FWD) es un instrumento de medición utilizado para evaluar las propiedades mecánicas de una estructura de pavimento.

Este instrumento está ubicado dentro de un carro de arrastre, el cual puede ser enganchado a un vehículo para su traslado.

Las mediciones que se realizan con este instrumento corresponden a deflexiones del pavimento provocadas por la aplicación de una carga de impacto. El Deflectómetro de Impacto simula la carga que genera un vehículo sobre la superficie del pavimento mediante la aplicación de una carga de impacto. La carga se produce al dejar caer un peso desde una cierta altura, la altura desde la cual se suelta el peso depende del nivel de carga que se quiere alcanzar; esta carga es transmitida al suelo mediante una placa circular llamada plato de carga, de 300 mm de diámetro.

La carga transmitida al suelo es medida por una celda de carga ubicada sobre el plato de carga. Las deformaciones o deflexiones son medidas por sensores (geóponos o sismómetros) alineados con el centro del plato de carga, separados de éste por una distancia de 0 cm, 20 cm, 30 cm, 45 cm, 60 cm, 90 cm y 120 cm.

Este instrumento de medición cuenta con un software, el cual registra los datos que posteriormente son utilizados para determinar el módulo de elasticidad del pavimento.

2.2. Prensa MTS.

La Prensa MTS es un equipo de medición utilizado para evaluar las propiedades mecánicas de materiales asfálticos.

Esta prensa carga axialmente la muestra (probeta cilíndrica) mediante un cilindro hidráulico y mediante sensores le mide su deformación axial. A través de un software asociado, los datos de carga y deformación son enviados a una planilla de cálculo, para posteriormente determinar el módulo de elasticidad de la muestra.

2.3. *Nottingham Asphalt Tester* (Prensa NAT).

La Prensa NAT es un equipo de medición utilizado para evaluar las propiedades mecánicas de materiales asfálticos.

Este equipo de medición está formado por un cilindro neumático, cabezales de carga, una placa de transmisión de carga, un bastidor donde se coloca la muestra y sensores de deformación y temperatura; además cuenta con un software asociado y está montado dentro de una cámara climatizada.

La Prensa NAT aplica un pulso de carga diametral sobre la muestra y mide la deformación de ésta en un plano perpendicular al de aplicación de la carga. La carga puntual que es producida por el cilindro neumático es transmitida a los cabezales y transformada en carga uniformemente distribuida sobre la muestra mediante la placa de carga ubicada entre el cilindro neumático y la muestra. La deformación de la muestra es medida por los sensores de deformación y es registrada y procesada mediante un software asociado al equipo, el cual calcula en forma directa el módulo de elasticidad de la muestra.

3. PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

En el presente Trabajo de Título se analizan procedimientos empíricos, tanto de terreno como de laboratorio, y teóricos empleados para determinar el módulo de elasticidad de las capas que forman un pavimento flexible (suelo, base y pavimento asfáltico).

Los procedimientos que se analizan son los siguientes:

Tabla n° 1: “Procedimientos que se analizan en el presente Trabajo de Título”

Tipo		Procedimiento	
Empírico	Terreno	Cálculo Directo	AASHTO
			FHWA
			WSDOT
		Retrocálculo	
Laboratorio		Prensa MTS	
		Prensa NAT	
Teórico			<i>Asphalt Institute</i>
			<i>Shell</i>
AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials.			
FHWA: Federal Highway Administration.			
WSDOT: Washington State Department of Transportation			

Los procedimientos de terreno requieren de la recolección de datos, lo cual se hace mediante deflectometría de impacto.

Los procedimientos de laboratorio requieren de la extracción de muestras (testigos de terreno) y de la confección de probetas. En el caso de la prensa MTS se utilizan los testigos de terrenos y en el caso de la prensa NAT se utilizan los testigos de terreno y las probetas de laboratorio.

Los procedimientos teóricos requieren de una muestra del asfalto empleado en terreno, virgen u original en el caso del *Asphalt Institute* y recuperado de los testigos de terreno en el caso de *Shell*.

Previo a realizar los procedimientos mencionados, es necesario determinar un tramo para llevar a cabo el estudio. Para ello se efectúa una tramificación del sector en el cual se hizo la deflectometría de impacto, y empleando los datos recolectados se determinan los parámetros en base a los cuales se establecen los tramos. El tramo en el que se realiza el estudio corresponde al tramo cuyos parámetros sean los más homogéneos.

En este tramo homogéneo se vuelve a hacer una deflecometría de impacto y, además, se extraen testigos de terreno, los cuales serán posteriormente ensayados con las prensas MTS y NAT para obtener su módulo de elasticidad.

En el laboratorio se reproducen las mezclas de terreno (Binder y Carpeta de Rodadura) para confeccionar probetas con ellas, cuyos módulos de elasticidad son determinados con la prensa NAT.

Es necesario realizar el trabajo de laboratorio previo a determinar el módulo de elasticidad en base a la deflectometría de impacto, pues para ello se requiere conocer el espesor de las capas del pavimento, el cual se obtiene de los testigos.

La determinación del módulo de elasticidad mediante deflecometría de impacto se realiza mediante cálculo directo y retrocálculo. En el primer caso se utilizan fórmulas (en los tres métodos mencionados) y en el segundo se utiliza un programa computacional.

Previo a efectuar los procedimientos teóricos, es necesario contar con muestras del asfalto empleado en terreno. Esto se hace de dos formas: extrayendo una muestra de asfalto previo a su mezcla con los áridos, la cual corresponde a la muestra de asfalto virgen u original; y extrayendo el asfalto de los testigos de terreno, lo cual corresponde a la muestra de asfalto recuperado. Las muestras de asfalto son caracterizadas de acuerdo a su Punto de Ablandamiento y a su Penetración.

La determinación del módulo de elasticidad en forma teórica se hace mediante fórmulas en el caso del *Asphalt Institute*, y mediante fórmulas y la utilización de un programa computacional en el caso de *Shell*.

Mediante los procedimientos descritos, se determina el módulo de elasticidad del suelo, la base y el pavimento asfáltico. Con el objetivo de comparar los resultados, se determinan Factores de Correlación y en base a estos se confeccionan Gráficos de Correlación.

En el caso del Suelo, se determina la correlación entre los resultados obtenidos mediante FHWA, WSDOT y Retrocálculo con los obtenidos mediante AASHTO.

En el caso del la Base, se determina la correlación entre los resultados obtenidos mediante WSDOT y Retrocálculo, con los obtenidos mediante FHWA.

En el caso del Pavimento Asfáltico, se determina la correlación entre los resultados obtenidos mediante la prensa MTS, la prensa NAT, WSDOT, FHWA, Retrocálculo y *Asphalt Institute*, con los obtenidos mediante Shell.

4. DESARROLLO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

4.1. Determinación del tramo homogéneo.

Se realiza una tramificación en función del área bajo la curva de cada cuenco, su radio de curvatura y el módulo resiliente del suelo, en base a un estudio estadístico. Específicamente, la tramificación se realiza en base al coeficiente de variación de los parámetros mencionados. En el Anexo A se detallada la obtención del tramo homogéneo.

El tramo con el menor coeficiente de variación para los tres parámetros es el comprendido entre el Km 16,000 y el Km 16,250, por lo tanto, este es el tramo que se escoge para realizar el estudio.

4.2. Determinación del módulo de elasticidad en laboratorio.

4.2.1. Testigos.

La extracción de testigos se lleva a cabo en la obra concesionada “Autopista Urbana Acceso Nor Oriente a Santiago”, específicamente entre el Km 16,000 y el Km 16,250. Desde este tramo se extraen testigos cada 50 m, partiendo en el Km 16,025 y terminando en Km 16,225, es decir, se extraen 5 testigos. Cada testigo está conformado por 2 capas: la capa intermedia o binder y la capa superficial o carpeta de rodadura.

Los análisis que se realizan sobre los testigos de terreno son los siguientes:

- Determinación de espesor total y de cada capa.
- Determinación de módulo de elasticidad utilizando la prensa MTS.
- Separación de ambas capas.
- Determinación de la densidad de cada capa.
- Determinación de módulo de elasticidad utilizando la prensa NAT.

En las siguientes tablas se muestra el espesor y el diámetro de los testigos; en el Anexo C se explica la forma de obtenerlos.

Tabla n° 2: “Espesor y diámetro de testigos antes de separar las 2 capas”

Testigo N°	Ubicación (Km)	Espesor (mm)			Diámetro (mm)
		Total	Carpeta de Rodadura	Binder	
1	16,025	130	52	78	99
2	16,075	132	61	71	99
3	16,125	135	60	75	99
4	16,175	137	59	78	99
5	16,225	150	62	87	99

Tabla n° 3: “Espesor y diámetro de testigos después de separar las 2 capas”

Testigo N°	Ubicación (Km)	Espesor (mm)	Diámetro (mm)
B1	16,025	46	99
B2	16,075	59	99
B3	16,125	60	99
B4	16,175	65	99
B5	16,225	75	99
C1	16,025	53	99
C2	16,075	60	99
C3	16,125	58	99
C4	16,175	55	99
C5	16,225	61	99

En la tabla anterior la letra C corresponde a Carpeta de Rodadura y la letra B, a Binder.

El procedimiento que se sigue para determinar el módulo de elasticidad utilizando las prensas MTS y NAT, se explica más adelante.

4.2.2. Confección de probetas de laboratorio.

Para confeccionar las probetas se reproducen 2 tipos de mezclas asfálticas, una correspondiente a la carpeta de rodadura y la otra, al binder. En ambos casos se fabrican 10 probetas, 5 son compactadas con 50 golpes y 5, con 75 golpes.

Los materiales que se utilizan en el proceso de reproducción de las mezclas asfálticas son los siguientes:

Tabla n° 4: “Materiales”

Muestra	Material
0	Cemento asfáltico CA 24 Asfalchile
1	Grava 12-18
2	Gravilla 6-12
3	Arena 0-6

Tabla n° 4: “Materiales (continuación)”

Muestra	Material
4	Filler de recuperación
5	Filler de aportación

El filler de recuperación corresponde a la fracción bajo malla N° 200 de grava, gravilla y arena, el cual es desechado y recuperado en el proceso de mezclado; el filler de aportación corresponde a caliza cruda Bio-Bío.

A continuación, se presentan las características de las mezclas a reproducir.

Tabla n° 5: “Dosificación de los áridos”

Muestra	Fracción (%)	
	Carpeta de Rodadura	Binder
1	21	30
2	26	25
3	47	41
4	3	2
5	3	2

Tabla n° 6: “Granulometría de los áridos”

Tamiz ASTM	Fracción que Pasa (%)	
	Carpeta de Rodadura	Binder
¾”	100	100
½”	83	75
⅜”	73	64
N° 4	54	47
N° 8	37	32
N° 30	16	13
N° 50	12	9
N° 100	9	7
N° 200	7	5

Tabla n° 7: “Características de la mezcla”

Banda de Trabajo	Carpeta de Rodadura	Binder
	IV-A-12	III-12a
Densidad Real Seca de los Áridos (Kg/m ³)	2.620	2.620
Densidad Efectiva de los Áridos (Kg/m ³)	2.630	2.633
Absorción de Asfalto (%)	0,15	0,19
Adherencia con CA 24 AASHTO (% ref. ag.)	+95	+95
Adherencia Riedel Weber (%)	2 – 6	2 – 6
Equivalente de Arena (%)	52	54
Desintegración por Sulfatos (%)	2,1	1,9
Sales Solubles (%)	No contiene	No contiene
Desgaste de los Angeles (%)	15,4	15,4

Tabla n° 7: “Características de la mezcla (continuación)”

	Carpeta de Rodadura	Binder
Partículas Chancadas (%)	99,6	99,6
Partículas Lajeadas (%)	0,6	1,4
Indice de Plasticidad (%)	NP	NP
Densidad del asfalto (Kg/m ³)	1.010	1.010
Contenido de Asfalto (%)	4,9 ± 0,3	4,5 ± 0,5
Temperatura de mezclado (°C)	149 ± 3	149 ± 3
Temperatura de compactación Inicial (°C)	142 ± 5	142 ± 5

Tabla n° 8: “Parámetros Marshall de la mezcla”

	Carpeta de Rodadura	Binder
Asfalto CA 24	4,9 ± 0,3	4,5 ± 0,5
Densidad (Kg/m ³)	2.328	2.318
DMM (Kg/m ³)	2.446	2.463
Huecos en la mezcla	4,9	5,9
VAM (%)	15,3	15,3
Estabilidad (N)	15.760	13.964
Fluidez (0,25 mm)	12,2	11

En el Anexo D se encuentran más detalles sobre la mezcla.

En la siguiente tabla se muestra el espesor y el diámetro de las probetas; en el Anexo E se explica la forma de obtenerlos

Tabla n° 9: “Espesor y diámetro de probetas”

Probeta N°	Espesor (mm)	Diámetro (mm)
B501	65	102
B502	64	102
B503	64	102
B504	64	102
B505	64	102
B751	63	102
B752	64	102
B753	64	102
B754	64	102
B755	65	102
C501	62	101
C502	63	102
C503	63	102
C504	63	101
C505	62	102
C751	62	102
C752	61	102
C753	62	102
C754	61	102
C755	62	101

En la tabla anterior la letra B corresponde a Binder y la letra C, a Carpeta de Rodadura, el número 50 se refiere a que la probeta ha sido compactada a 50 golpes y el número 75, a 75 golpes.

4.2.3. Determinación de la densidad.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para los testigos de terreno y las probetas de laboratorio. En el Anexo F se explica el procedimiento seguido para determinar la densidad de los testigos y las probetas.

Tabla n° 10: “Densidad real de los testigos y de las probetas”

Muestra	Número de Golpes	Capa	Densidad (Kg/m3)
Testigos		Carpeta de Rodadura	2.328
		Binder	2.325
Probetas	50	Carpeta de Rodadura	2.327
		Binder	2.316
	75	Carpeta de Rodadura	2.357
		Binder	2.320

4.2.4. Determinación del módulo de elasticidad.

4.2.4.1. Utilizando la prensa MTS.

El procedimiento de ensaye se efectúa de acuerdo a la norma AASHTO T294-92. Los testigos son sometidos a pulsos de carga axial, a una temperatura de 19 °C y se registra la tensión y la deformación.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos. En el Anexo G se presentan mayores detalles.

Tabla n° 11: “Determinación del Módulo de Elasticidad con la prensa MTS”

Testigo N°	Módulo de Elasticidad (MPa)
1	10.758
2	11.262
3	9.173
4	9.126
5	8.007
Promedio	9.665

4.2.4.2. Utilizando la prensa NAT.

El procedimiento de ensaye se efectúa de acuerdo a la norma EN 12697-26. Las muestras son sometidas a pulsos de carga, a una temperatura de 19 °C. La carga se aplica sobre el manto de la muestra, induciendo

sobre ésta una tracción indirecta. Esta prensa cuenta con un *software* asociado a ella, el cual entrega como resultado el módulo de elasticidad de la muestra ensayada.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos. En el Anexo H se presentan mayores detalles.

Tabla n° 12: “Determinación del Módulo de Elasticidad con la prensa NAT”

Muestra	Número de Golpes	Capa	Densidad (Kg/m ³)	Módulo de Elasticidad (MPa)
Testigos		Carpeta de Rodadura	2.328	4.736
		Binder	2.325	4.400
Probetas	50	Carpeta de Rodadura	2.327	4.162
		Binder	2.316	3.645
	75	Carpeta de Rodadura	2.357	4.197
		Binder	2.320	4.268

Los resultados obtenidos corresponden a densidades distintas al valor de terreno, es decir, de los testigos, por lo tanto, se debe determinar cuál sería el valor del módulo de elasticidad si la densidad de las probetas fuera igual a la de los testigos. En el Anexo I se encuentra el detalle.

Los módulos de elasticidad que se obtienen para la carpeta de rodadura y para el binder son los siguientes.

Tabla n° 13: “Módulo de Elasticidad de las Probetas y de los Testigos”

Muestra	Capa	Módulo de Elasticidad (MPa)
Probetas	Carpeta de Rodadura	4.163
	Binder	5.047
Testigos	Carpeta de Rodadura	4.736
	Binder	4.400

4.3. Determinación del módulo de elasticidad en terreno.

4.3.1. Datos.

Para obtener el módulo de elasticidad del pavimento asfáltico es necesario obtener dos grupos de datos: datos de terreno y datos de laboratorio. Los primeros corresponden a deflectometría de impacto y los segundos, al espesor de los testigos extraídos en terreno.

Los datos de terreno corresponden a deflectometría de impacto. Con el objetivo de realizar futuras comparaciones, se cuenta con tres set de datos, dos de ellos son obtenidos con estaciones distanciadas 25 m entre sí, en el tramo comprendido entre el Km 16,000 y el Km 16,250, con dos deflectómetros de

impacto distintos, uno perteneciente al Laboratorio Nacional de Vialidad (LNV) y el otro perteneciente a la empresa de asesoría vial Gauss S.A. (Gauss-TH –TH: Tramo Homegéneo–); el tercer set de datos es obtenido con estaciones distanciadas 50 m entre sí, en el tramo comprendido entre el Km 14,500 y el Km 21,400, con el deflectómetro de impacto perteneciente a Gauss S.A (Gauss-TC –TC: Tramo Completo–). En el Anexo B se presentan los datos obtenidos.

Los datos de laboratorio corresponden al espesor de los testigos extraídos en terreno. Estos datos se encuentran en el Anexo C.

4.3.2. Cálculo Directo.

El cálculo directo se lleva a cabo de acuerdo los procedimientos establecidos por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), por el *Washington State Department of Transportation* (WSDOT) y por la *Federal Highway Administration* (FHWA).

Las fórmulas propias de cada procedimiento se presentan en el Anexo K. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos mediante los métodos mencionados.

Tabla n° 14: “Resultados obtenidos mediante FHWA, WSDOT y AASHTO”

Datos	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)							
		FHWA			WSDOT			AASHTO	
		Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Pavimento
LNV	30	170	442	2.501	145	274	2.561	264	813
Gauss-TH	23	165	451	4.621	161	308	3.523	281	787
Gauss-TC	27	158	413	5.811	151	303	4.492	274	941

La temperatura del pavimento se obtiene mediante el método BELLS2, descrito en el Anexo J.

Los resultados obtenidos mediante FHWA y WSDOT deben ser corregidos por temperatura, pues se debe determinar cuál es valor del módulo de elasticidad del pavimento asfáltico a 19 °C.

Más adelante se efectúa una corrección por temperatura a estos valores. Los resultados obtenidos mediante AASHTO se encuentran ya corregidos a 20 °C.

4.3.3. Retrocálculo.

Con el objetivo de determinar el módulo de elasticidad del pavimento asfáltico mediante Retrocálculo, se utiliza el programa computacional MODTAG.

Los resultados obtenidos son los siguientes. En el Anexo L se presentan más detalles.

Tabla n° 15: “Módulo de Elasticidad del pavimento asfáltico”

Datos	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)					Error
		Pavimento Asfáltico	Base	Pedraplén	Suelo	Capa Rígida	
LNV	30	3.129	462	246	243	45.000	3,89
Gauss-TH	23	5.042	181	527	70	45.000	2.03
Gauss-TC	27	3.836	314	293	173	45.000	1,94

La temperatura del pavimento se obtiene mediante el método BELLS2, descrito en el Anexo J.

Los resultados anteriores deben ser corregidos por temperatura, pues se debe determinar cuál es valor del módulo de elasticidad del pavimento asfáltico a 19 °C.

Más adelante se efectúa una corrección por temperatura a este valor.

4.4. Caracterización del asfalto.

El asfalto será caracterizado mediante los parámetros Penetración y Punto de Ablandamiento, debido a que éstos son los utilizados en la estimación del módulo de elasticidad de las mezclas asfálticas mediante las fórmulas del *Asphalt Institute* y de *Shell*. Estos parámetros se determinan tanto para el asfalto recuperado como para el original.

En el Anexo M se explica la forma de recuperar el asfalto.

4.4.1. Determinación de la penetración.

La determinación de la Penetración se realiza de acuerdo al método 8.302.3 “Asfaltos: Método de ensaye de penetración (LNV 34)”, perteneciente al Volumen N° 8 del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad.

Los resultados de este ensaye se presentan en la siguiente tabla. En el Anexo N se presentan más detalles.

Tabla n° 16: “Penetración”

Asfalto	Penetración (0,1 mm)	
	Medida	Promedio
Original	54	54
Recuperado	34	33
	32	
	32	

4.4.2. Determinación del punto de ablandamiento.

La determinación del Punto de Ablandamiento se realiza se acuerdo al método 8.302.16 “Asfaltos: Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de Anillo y Bola (LNV 48)”, perteneciente al Volumen N° 8 del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad.

En la siguiente tabla se muestran los resultados. En el Anexo O se presentan más detalles.

Tabla n° 17: “Punto de Ablandamiento”

Asfalto	Punto de Ablandamiento (°C)	
	Medida	Promedio
Original	53	53
Recuperado	60	60
	60	

4.5. Determinación del módulo de elasticidad teórico.

El módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica se puede estimar mediante la utilización de gráficos y fórmulas, ambos basados en las propiedades del asfalto y el volumen de agregados.

En este caso, el módulo de elasticidad se estima mediante los gráficos y fórmulas establecidos por el *Asphalt Institute* y por *Shell*.

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos. En el Anexo P se presentan más detalles.

Tabla n° 18: “Módulo de Elasticidad Teórico”

Capa	Módulo de Elasticidad (MPa)		
	<i>Asphalt Institute</i>	<i>Shell</i>	
		BANDS 2.0	Fórmulas
Carpeta de Rodadura	6.887	5.030	4.993
Binder	6.263	5.090	5.056

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos en mediante los procedimientos descritos, se presentan en la siguiente tabla. El error cuadrático medio (RMS) y el coeficiente de variación (CV) se encuentra en el Anexo Q.

Tabla n° 19: “Resultados”

Método	Procedimiento	Datos	T (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)						RMS (%)	CV (%)
				Suelo	Pe	Base	Binder	CR	PA		
Empírico Laboratorio	MTS		19						9.665		13,7
	NAT (probetas)		19				5.047	4.163			10,0
	NAT (testigos)		19				4.400	4.736			6,8
Empírico Terreno	AASHTO	LNV	30	264						813	41,0
		Gauss-TH	23	281						787	42,7
		Gauss-TC	27	274						941	38,7
	FHWA	LNV	30	170		442			2.501		100,6
		Gauss-TH	23	165		451			4.621		115,5
		Gauss-TC	27	158		413			5.811		111,2
	WSDOT	LNV	30	145		274			2.561		133,8
		Gauss-TH	23	161		308			3.523		124,5
		Gauss-TC	27	151		303			4.492		123,6
	MODTAG	LNV	30	243	246	462			3.129		3,89
		Gauss-TH	23	70	527	181			5.042		2,03
		Gauss-TC	27	173	293	314			3.836		1,94
Teórico	<i>Asphalt Institute</i>		19				6.263	6.887			
	<i>Shell BANDS 2.0</i>		19				5.090	5.030			
	<i>Shell fórmulas</i>		19				5.029	4.993			

Nota: T: Temperatura.
Pe: Pedraplán.
CR: Carpeta de Rodadura.
PA: Pavimento Asfáltico.
Pa: Pavimento.

Para poder realizar comparaciones de los resultados obtenidos, estos deben homogeneizados. La forma de hacerlo, se explica a continuación.

5.1. Corrección por temperatura.

Los resultados obtenidos a través de los procedimientos establecidos por el *Washington State Department of Transportation* (WSDOT) y por la *Federal Highway Administration* (FHWA), y los obtenidos con el programa computacional MODTAG deben ser corregidos por temperatura para determinar el valor del módulo de elasticidad para 19 °C.

Además, estos mismos valores son corregidos a 20 °C para ser posteriormente comparados con los resultados obtenidos a través de los procedimientos establecidos por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

Para corregir por temperatura el módulo de elasticidad, se utiliza el modelo planteado por el Estado de Washington. En el Anexo R se presentan más detalles.

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla n° 20: “Módulo de elasticidad del pavimento asfáltico corregido por temperatura”

Temperatura (°C)	Datos	Módulo de Elasticidad (MPa)		
		FHWA	WSDOT	MODTAG
19	LNV	2.989	3.061	3.742
	Gauss-TH	4.874	3.716	5.349
	Gauss-TC	7.112	5.164	4.405
	Promedio	5.051	4.113	4.074
20	LNV	2.950	3.021	3.693
	Gauss-TH	4.810	3.668	5.279
	Gauss-TC	7.019	5.096	4.348
	Promedio	4.985	4.059	4.021
En el cálculo del promedio no se considera Gauss-TH pues está incluido en Gauss-TC.				

5.2. Determinación del módulo de elasticidad combinado.

En la mayoría de los procedimientos descritos se determinó el módulo de elasticidad para cada capa de pavimento asfáltico por separado, es decir, se determinó el módulo de elasticidad para la carpeta de rodadura y para el binder, por lo tanto, se debe obtener un valor que combine ambos en uno sólo. Además, con el fin de comparar los resultados obtenidos mediante AASHTO con los resultados obtenidos mediante FHWA, WSDOT y MODTAG, se determina el módulo de elasticidad combinado de las capas de Pavimento Asfáltico y Base.

En el caso de MODTAG, la combinación de las capas Pedraplén y Suelo corresponde a la capa que en los otros procedimientos mencionados se le denomina Suelo. Por lo tanto, con el fin de realizar comparaciones, se determina el módulo de elasticidad combinado de las capas Pedraplén y Suelo.

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas. En el Anexo S se presentan más detalles.

Tabla n° 21: “Módulo de elasticidad del pavimento asfáltico”

Procedimiento	Temperatura (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)		
		Carpeta	Binder	Pavimento Asfáltico
NAT (probetas)	19	4.163	5.047	4.652
NAT (testigos)	19	4.736	4.400	4.543
<i>Asphalt Institute</i>	19	6.887	6.263	6.527
<i>Shell BANDS 2.0</i>	19	5.030	5.090	5.064
<i>Shell fórmulas</i>	19	4.993	5.056	5.029

Tabla n° 22: “Módulo de elasticidad del pavimento”

Procedimiento	Temperatura (°C)	Datos	Módulo de Elasticidad (MPa)			
			Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Pavimento
FHWA	19	LNV	170	442	2.989	926
		Gauss-TH	165	451	4.874	1.184
		Gauss-TC	158	413	7.112	1.383
		Promedio	164	428	5.051	1.154
WSDOT	19	LNV	145	274	3.061	732
		Gauss-TH	161	308	3.716	855
		Gauss-TC	151	303	5.164	1.009
		Promedio	148	289	4.113	870
MODTAG	19	LNV	243	462	3.742	1.053
		Gauss-TH	70	181	5.349	822
		Gauss-TC	173	314	4.405	943
		Promedio	208	388	4.074	998
FHWA	20	LNV	170	442	2.950	920
		Gauss-TH	165	451	4.810	1.176
		Gauss-TC	158	413	7.019	1.373
		Promedio	164	428	4.985	1.147
WSDOT	20	LNV	145	274	3.021	727
		Gauss-TH	161	308	3.668	850
		Gauss-TC	151	303	5.096	1.002
		Promedio	148	289	4.059	864
MODTAG	20	LNV	243	462	3.693	1.047
		Gauss-TH	70	181	5.279	815
		Gauss-TC	173	314	4.348	936
		Promedio	208	388	4.021	991
AASHTO	20	LNV	264			813
		Gauss-TH	281			787
		Gauss-TC	274			941
		Promedio	269			877

En el cálculo del promedio no se considera Gauss-TH pues está incluido en Gauss-TC.

Tabla n° 23: “Módulo de elasticidad combinado del suelo”

Procedimiento	Datos	Módulo de Elasticidad (MPa)		
		Pedraplén	Suelo (*)	Suelo
MODTAG	LNV	246	243	245
	Gauss-TH	527	70	232
	Gauss-TC	293	173	229
	Promedio	270	208	237

(*) Corresponde a la cuarta capa del modelo utilizado por MODTAG
 En el cálculo del promedio no se considera Gauss-TH pues está incluido en Gauss-TC.

5.3. Análisis de resultados.

En la actualidad en el diseño de pavimentos se utiliza un modelo de tres capas (Suelo, Base y Pavimento Asfáltico), cuyos módulos de elasticidad son determinados de acuerdo a los procedimientos indicados en la siguiente tabla.

Tabla n° 24: “Procedimientos empleados actualmente para determinar el módulo de elasticidad en el diseño de pavimentos flexibles”

Capa	Suelo	Base	Pavimento Asfáltico
Procedimiento	AASHTO	FHWA	Shell BANDS 2.0

En realidad en el caso del Suelo se utilizan ensayos de laboratorio, sin embargo, se ha determinado que el factor de correlación existente entre los resultados obtenidos mediante ensayos de laboratorio y AASHTO, es prácticamente igual a 1. Para efectos del presente Trabajo de Título es considerado igual a 1.

Luego de homogeneizarlos, los resultados son los que se presentan en las siguientes tablas.

Tabla n° 25: “Resultados homogéneos – Comparación del módulo de elasticidad del suelo”

Método	Procedimiento	T (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)				RMS (%)
			Suelo	Base	PA	Pa	
Empírico Terreno	AASHTO	20	269			813	39,9
	FHWA	19	164	428	5.051		105,9
	WSDOT	19	148	289	4.113		128,7
	MODTAG	19	208	388	4.074		2,9

T: Temperatura.
PA: Pavimento Asfáltico.
Pa: Pavimento.
Para el caso de MODTAG se muestra el módulo de elasticidad combinado del Suelo (Pedraplén + Suelo) (ver 4.2).

Tabla n° 26: “Resultados homogéneos – Comparación del módulo de elasticidad de la base”

Método	Procedimiento	T (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)			RMS (%)
			Suelo	Base	PA	
Empírico Terreno	FHWA	19	164	428	5.051	105,9
	WSDOT	19	148	289	4.113	128,7
	MODTAG	19	208	388	4.074	2,9

T: Temperatura.
PA: Pavimento Asfáltico.

Tabla n° 27: “Resultados homogéneos – Comparación del módulo de elasticidad del pavimento asfáltico”

Método	Procedimiento	T (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)			RMS (%)	CV (%)
			Suelo	Base	PA		
Empírico Laboratorio	MTS	19			9.665		13,7
	NAT (probetas)	19			4.652		10,0
	NAT (testigos)	19			4.543		6,8
Empírico Terreno	FHWA	19	164	428	5.051	105,9	
	WSDOT	19	148	289	4.113	128,7	
	MODTAG	19	208	388	4.074	2,9	
Teórico	<i>Asphalt Institute</i>	19			6.527		
	<i>Shell BANDS 2.0</i>	19			5.064		
	<i>Shell fórmulas</i>	19			5.029		

T: Temperatura.
PA: Pavimento Asfáltico.
Para los casos de NAT y Método Teórico se muestra el módulo de elasticidad combinado del PA (Base + Carpeta de Rodadura) (ver 4.2).

Tabla n° 28: “Resultados homogéneos – Comparación del módulo de elasticidad del pavimento”

Método	Procedimiento	T (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)		RMS (%)
			Suelo	Pa	
Empírico Terreno	AASHTO	20	269	877	39,9
	FHWA	20	164	1.147	105,9
	WSDOT	20	148	864	128,7
	MODTAG	20	208	991	2,9
T: Temperatura. Pa: Pavimento. Para los casos de FHWA, WSDOT y MODTAG se muestra el módulo de elasticidad combinado del Pa (Base + PA) (ver 4.2).					

Los resultados obtenidos para el módulo de elasticidad se encuentran dentro de los resultados esperados para un pavimento asfáltico, sin embargo, el valores obtenidos para MTS es muy alto y el valor obtenido para *Asphalt Institute* es levemente alto.

Al observar los resultados empíricos, se nota una diferencia superior al 100 % entre los resultados obtenidos con la prensa MTS y los obtenidos con la prensa NAT. La diferencia entre los resultados obtenidos a 19 °C mediante Cálculo Directo (FHWA, WSDOT) y Retroanálisis, es bastante menor, del orden del 10%.

Con respecto al módulo de elasticidad del pavimento (base + pavimento asfáltico), se observa que los resultados obtenidos se encuentran dentro de lo esperado, sin embargo, se observa una diferencia del orden del 25% en el módulo elasticidad combinado del pavimento para los casos correspondientes a los resultados obtenidos mediante FHWA y WSDOT.

En el caso de los resultados teóricos, se observa que el módulo combinado calculado con las fórmulas del *Asphalt Institute* es un 30 % mayor que el determinado usando BANDS 2.0. Esta diferencia se debe a que en un caso se consideran las características del asfalto original y en el otro las del asfalto recuperado. Además, se observa que al calcular el módulo de elasticidad con las fórmulas de *Shell*, se obtiene un resultado similar al determinado con BANDS 2.0.

Además, se puede observar que al determinar el módulo de elasticidad con los datos Gauss-TC se obtiene un RMS menor que al determinarlo con los set de datos restantes; y el mayor RMS se obtiene con los datos Gauss-TH. Lo anterior se debe a que en el primer caso se cuenta con un mayor número de datos.

Con el fin de estimar la variabilidad de los resultados, se ha calculado el error cuadrático medio (RMS) y el coeficiente de variación (CV) de los mismos.

Los resultados obtenidos con la prensa MTS poseen un CV de 13,7 %, mientras que los CV's de los resultados obtenidos con la prensa NAT son menores.

El RMS de los resultados obtenidos mediante el cálculo directo es elevado, superior al 100 %, exceptuando a los resultados correspondientes a AASHTO. Lo cual se debe principalmente a los parámetros de entrada, es decir, los datos provenientes de la deflectometría. Sin embargo, en el caso de los resultados obtenidos con el programa computacional MODTAG, el RMS es bajo, menor al 5 %.

Al comparar los módulos de elasticidad obtenidos para el suelo, se observa que el valor determinado mediante MODTAG es el más cercano al determinado mediante AASHTO, sin embargo, la diferencia es del orden del 30%, pero el error asociado a MODTAG es significativamente menor.

Al comparar los módulos de elasticidad obtenidos para la base, se observa que el valor determinado mediante MODTAG es el más cercano al determinado mediante FHWA, la diferencia es del orden del 10%, pero el error asociado a MODTAG es significativamente menor.

Al comparar los módulos de elasticidad obtenidos para el pavimento asfáltico, se observa que el valor determinado mediante FHWA es el más cercano al determinado mediante BANDS 2.0, sin embargo, los valores determinados mediante la prensa NAT representan una buena aproximación, presentando un error mucho menor (en particular el caso de los testigos; en este sentido, se observa que el resultado que presenta el menor error corresponde al determinado mediante MODTAG y su valor es similar al obtenido mediante NAT).

Con la finalidad de ilustrar la correlación de los resultados obtenidos, se confeccionan gráficos. Previo a ello, se determina la media aritmética de los módulos de elasticidad obtenidos mediante la prensa NAT, su valor es 4.598 MPa; además, es necesario determinar los Factores de Correlación. Esta correlación se efectúa de acuerdo a los procedimientos empleados actualmente para determinar el módulo de elasticidad en el diseño de pavimentos flexibles, es decir, de acuerdo a lo indicado en la Tabla n° 24.

Los Factores de Correlación se determinan mediante la siguiente fórmula:

$$FC = \frac{E_A}{E_B} \quad (\text{Fórmula n° 1})$$

Donde:

FC es el factor de correlación.

E_A es el módulo de elasticidad calculado según el procedimiento A.

E_B es el módulo de elasticidad calculado según el procedimiento B.

En la siguiente tabla se muestran los Factores de Correlación.

Tabla n° 29: “Factores de Correlación”

Procedimiento	Factor de Correlación		
	AASHTO (Suelo)	FHWA (Base)	Shell BANDS 2.0 (Pavimento Asfáltico)
MTS			0,52
NAT			1,10
AASHTO	1,00		
FHWA	1,64	1,00	1,00
WSDOT	1,82	1,48	1,23
MODTAG	1,29	1,10	1,24
Asphalt Institute			0,78
Shell BANDS 2.0			1,00
Shell fórmulas			1,35

En la tabla anterior, el valor presentado en cada casilla corresponde al cociente entre el módulo de elasticidad calculado según el procedimiento indicado en la columna y el módulo de elasticidad calculado según el procedimiento indicado en la fila.

En los siguientes gráficos se muestra la correlación entre los resultados obtenidos. Las pendientes de las rectas graficadas en ellos corresponden a los factores de correlación presentados en la tabla anterior.

Gráfico n° 1: “Correlación de resultados para el caso del Suelo”

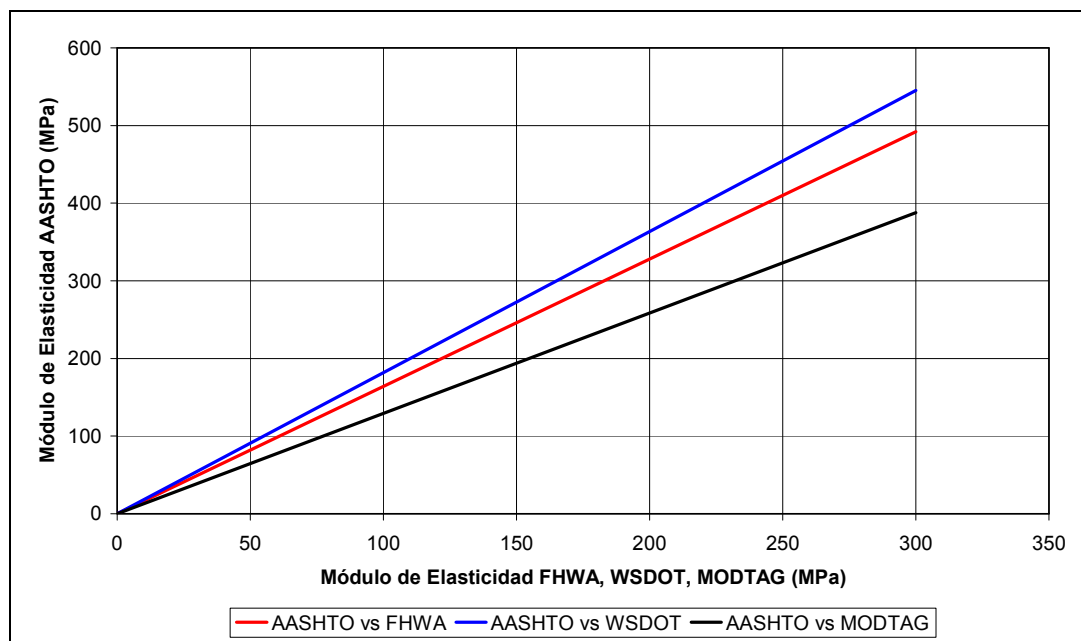


Gráfico nº 2: “Correlación de resultados para el caso de la Base”

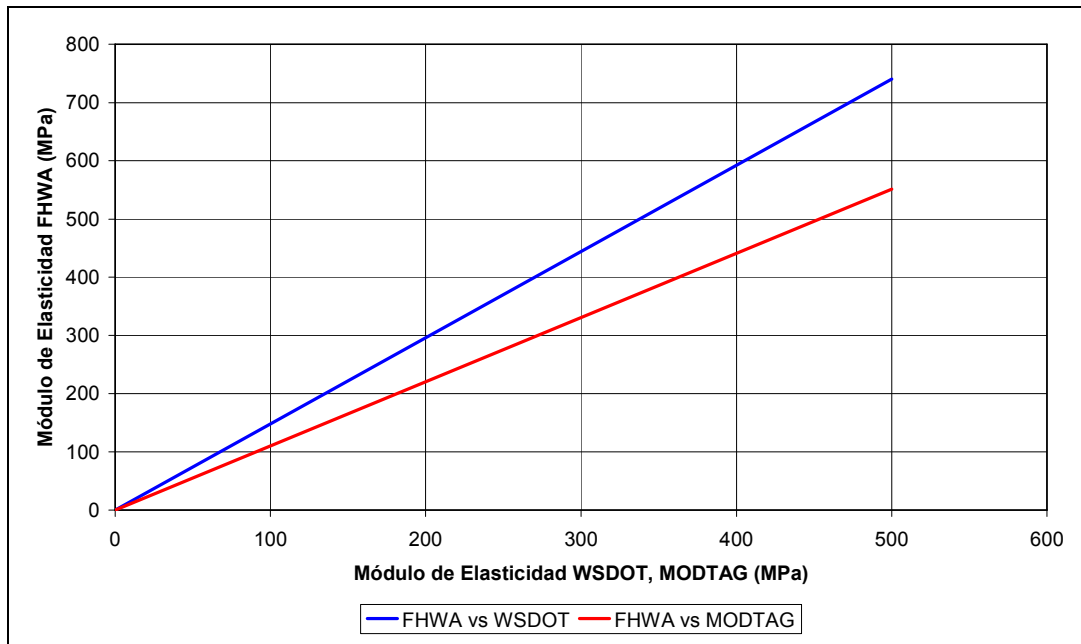
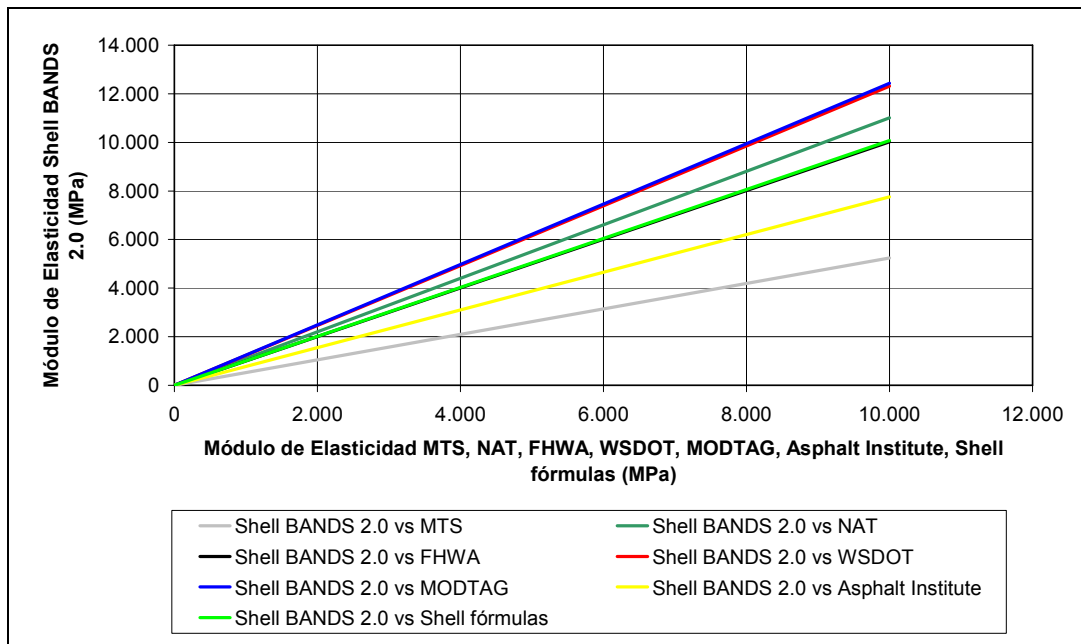


Gráfico nº 3: “Correlación de resultados para el caso del Pavimento Asfáltico”



6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio es comparar los módulos de elasticidad obtenidos en forma teórica, mediante las fórmulas propuestas por el *Asphalt Institute* y por *Shell*, y en forma empírica, a través de la prensa NAT, la prensa MTS y el deflectómetro de impacto (Cálculo Directo y Retrocálculo), con los resultados obtenidos mediante los procedimientos actualmente utilizados en el diseño de pavimentos, los cuales son: ensayos de terreno o método AASHTO para determinar el módulo de elasticidad del Suelo, método FHWA en el caso de la Base, y BANDS 2.0 de *Shell* en el caso del Pavimento Asfáltico.

Los resultados obtenidos mediante Retrocálculo (MODTAG) son similares a los obtenidos mediante los procedimientos actualmente utilizados y, además, son los que presentan el menor error asociado. Otro punto a favor de este procedimiento es la rapidez de la recolección de datos (mediante deflectometría de impacto). Es por estos motivos que se recomienda a futuro la utilización de este procedimiento para la determinación del módulo de elasticidad de las capas de pavimento, es decir, Suelo, Base y Pavimento Asfáltico.

En particular, en el caso del módulo de elasticidad del Pavimento Asfáltico, se recomienda la utilización del Retroanálisis mediante el programa computacional MODTAG debido a que para utilizar BANDS 2.0 se debe extraer testigos de terreno y recuperar su asfalto para su posterior análisis, lo cual constituye un proceso lento y crítico al ser propenso a generar resultados erróneos debido a que es altamente probable que el asfalto que se recupera no sea del todo puro, pudiendo contener una pequeña fracción de agregados finos, lo cual genera distorsión en los resultados.

Ahora bien, los resultados obtenidos mediante la prensa NAT son similares a los obtenidos mediante MODTAG para el caso del Pavimento Asfáltico, por lo que se recomienda su utilización para complementar y ajustar mejor el modelo utilizado en el Retroanálisis. No obstante, se recomienda un futuro estudio orientado a correlacionar empíricamente los resultados obtenidos mediante NAT y BANDS 2.0 de *Shell* para lograr un ajuste más preciso.

Los resultados obtenidos mediante las fórmulas de *Shell* son prácticamente iguales a los obtenidos mediante BANDS 2.0. Lo anterior era de esperar que sucediera pues este programa computacional se basa en las fórmulas empleadas. Además, al usar BANDS 2.0 se obtienen resultados más rápidamente. Por lo tanto, se recomienda utilizar BANDS 2.0 en lugar de las fórmulas debido a su rapidez de ejecución.

Existe una clara diferencia entre los resultados obtenidos mediante BANDS 2.0 de *Shell* y las fórmulas del *Asphalt Institute*, esta diferencia se debe a que los parámetros de entrada del primer caso son las características del asfalto recuperado y del segundo, las características del asfalto original. Es decir, al tratarse de materiales con distintas propiedades, debido al distinto nivel de envejecimiento, se obtienen resultados disímiles.

Con respecto al trabajo de laboratorio, es decir, con respecto a la determinación del módulo de elasticidad de las mezclas asfálticas mediante la utilización de las prensas NAT y MTS, se puede decir que el trabajo con la primera es más eficiente y más rápido que el realizado con la segunda. Además, al analizar las mismas muestras de terreno con ambos equipos, los resultados obtenidos con la prensa NAT presentan una variabilidad menor que los resultados obtenidos con la prensa MTS. Por lo tanto, se recomienda utilizar la prensa NAT en lugar de la prensa MTS en el trabajo de laboratorio.

La determinación del módulo de elasticidad mediante Cálculo Directo resulta más rápida que al hacerlo mediante el programa computacional MODTAG, es decir, mediante el Retroanálisis. Lo anterior se debe a que, para modelar de forma más exacta la estructura del pavimento y encontrar resultados con un nivel bajo de error, el programa se debe correr reiteradas veces hasta encontrar el resultado adecuado. Sin embargo, el error asociado a MODTAG es significativamente menor que el error asociado al Cálculo directo. Por lo tanto se recomienda la utilización del Retroanálisis mediante MODTAG en lugar del Cálculo directo para determinar el módulo de elasticidad mediante deflectometría.

Los resultados y los gráficos de correlación obtenidos tienen validez sólo para el tipo de asfalto y los tipos de mezclas analizados en este Trabajo de Título y bajo las condiciones a las cuales han sido sometidos; teniendo esto en consideración, el presente Trabajo de Título sienta las bases para realizar un estudio de mayor envergadura.

Como ha sido observado, los resultados obtenidos con el set de datos Gauss-TC, es decir, el que tiene la mayor cantidad de datos, presenta el menor error. Por lo tanto, con el fin de disminuir la variabilidad de los resultados, es necesario ampliar las bases de datos, es decir, se deben realizar mediciones de deflectometría y extracciones de testigos en forma sistemática para su posterior análisis. Al disminuir la variabilidad de los resultados se puede obtener una correlación de los mismos cuya aplicabilidad sea más amplia que la presentada en este estudio.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Dirección de Vialidad, Dirección General de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Manual de Carreteras, Volumen N° 8: Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control. Chile, 2003.
2. National Highway Institute. Pavement Deflection Analysis - Participant Workbook. Publication No. FHWA-HI-94-021. Estados Unidos, 1994.
3. Norma AASHTO T294-92. Resilient Modulus of Unbound Granular Base/ Subbase Materials and Subgrade Soils – SHRP Protocol P46. Estados Unidos, 1992.
4. Norma EN 12697-26. Mezclas Bituminosas, Métodos de Ensayo para Mezclas Bituminosas en Caliente, Parte 26. 2006.
5. Virginia Department of Transportation and Cornell University. MODTAG Users Manual. 4ª Edición. Estados Unidos, 2006.
6. Yang H. Huang. Pavement Analysis and Design. Estados Unidos, Prentice-Hall Inc., 1993.
7. Gazitúa Riveros, Francisco Javier. Módulos resilientes, comparación de determinaciones de laboratorio y terreno. Tesis (Ingeniero Civil). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 1999. 75 h.

ANEXO A: DETERMINACIÓN DEL TRAMO HOMOGÉNEO

Con el objetivo de determinar un tramo homogéneo para realizar el estudio, se efectúa una medición de deflectometría entre el Km 14,500 y el Km 21,400, pues es el sector de la obra que se encuentra pavimentado al momento de iniciar el estudio. La medición de deflectometría se realiza en la pista externa de la calzada norte (pista 3) de la obra concesionada “Autopista Urbana Acceso Nor Oriente a Santiago” y consta de estaciones separadas por una distancia de 50 m.

Una medición de deflectometría consiste en aplicar un impacto de carga de 50 kN al pavimento y medir su deformación a una distancia de 0 cm, 20 cm, 30 cm, 45 cm, 60 cm, 90 cm y 120 cm desde el punto de impacto.

Luego de reunir los datos, los cuales se encuentran en el Anexo B bajo el nombre de Gauss-TC, se determina el área bajo la curva de cada cuenco y su radio de curvatura, y el módulo resiliente del suelo, los cuales corresponden a los parámetros de empleados para la tramificación.

El área bajo el cuenco y su radio de curvatura se determinan mediante las siguientes fórmulas:

$$A = \frac{6 \cdot (D_0 + 2 \cdot D_{30} + 2 \cdot D_{60} + D_{90})}{D_0} \quad (\text{Fórmula A-1})$$

$$RC = \frac{r^2}{2 \cdot D_0 \cdot \left(\frac{D_0}{D_r} - 1 \right)} \quad (\text{Fórmula A-2})$$

Donde:

A es el área bajo el cuenco.

D_i es la deflexión medida a una distancia i desde el punto de aplicación de la carga (m).

RC es el radio de curvatura del cuenco.

r es la distancia a la que se mide la deflexión (m), en este caso, su valor es 0,3 m.

El módulo resiliente del suelo se determina mediante el método AASHTO, el cual se describe en el Anexo K.

La tramificación se realiza en función de cada uno de los parámetros mencionados, en base a un estudio estadístico. Específicamente, la tramificación se realiza en base al coeficiente de variación de los parámetros, el cual corresponde al cociente entre la desviación estándar y la media de cada tramo.

Se considera un máximo del coeficiente de variación del 10% para el caso del área bajo la curva, del 30% para el caso del radio de curvatura y del 20% para el caso del módulo resiliente. Es necesario mencionar, sin embargo, que en la mayoría de los casos se logra obtener un coeficiente de variación significativamente por debajo de los valores mencionados.

En las siguientes tablas se muestra la tramificación para los tres casos mencionados:

Tabla A-1: “Tramificación según área bajo el cuenco”

Tramo (Km)		Área bajo el cuenco		
Inicio	Fin	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
14,500	14,650	410	9	2,2
14,700	15,020	435	17	4,0
15,050	15,533	402	19	4,9
15,551	15,950	428	25	6,0
16,001	16,251	397	7	1,9
16,300	16,352	396	15	3,7
16,401	16,900	418	18	4,2
16,954	17,351	454	23	5,1
17,400	18,950	433	28	6,5
19,003	20,151	398	19	4,7
20,200	20,701	433	17	3,9
20,784	21,340	403	17	4,3

Tabla A-2: “Tramificación según radio de curvatura del cuenco”

Tramo (Km)		Radio de curvatura del cuenco (m)		
Inicio	Fin	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
14,500	14,603	207	25	12,0
14,650	15,020	255	51	20,1
15,050	15,533	201	43	21,1
15,551	15,950	230	33	14,3
16,001	16,800	188	23	12,4
16,852	18,152	277	42	15,0
18,202	18,500	184	56	30,4
18,599	18,950	279	43	15,6
19,003	20,151	174	37	21,3
20,200	20,651	243	14	5,7
20,701	21,101	210	33	15,9
21,171	21,340	163	15	9,5

Tabla A-3: “Tramificación según módulo resiliente del suelo”

Tramo (Km)		Módulo resiliente del suelo (MPa)		
Inicio	Fin	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
14,500	16,300	278	33	11,8%
16,352	20,701	270	41	15,1%
20,784	21,249	309	38	12,1%
21,300	21,340	225	18	8,1%

En los siguientes gráficos se muestran los tres parámetros en función de los cuales se hace la tramificación, además se grafican los tramos.

Gráfico A-1: “Tramificación según área bajo el cuenco”

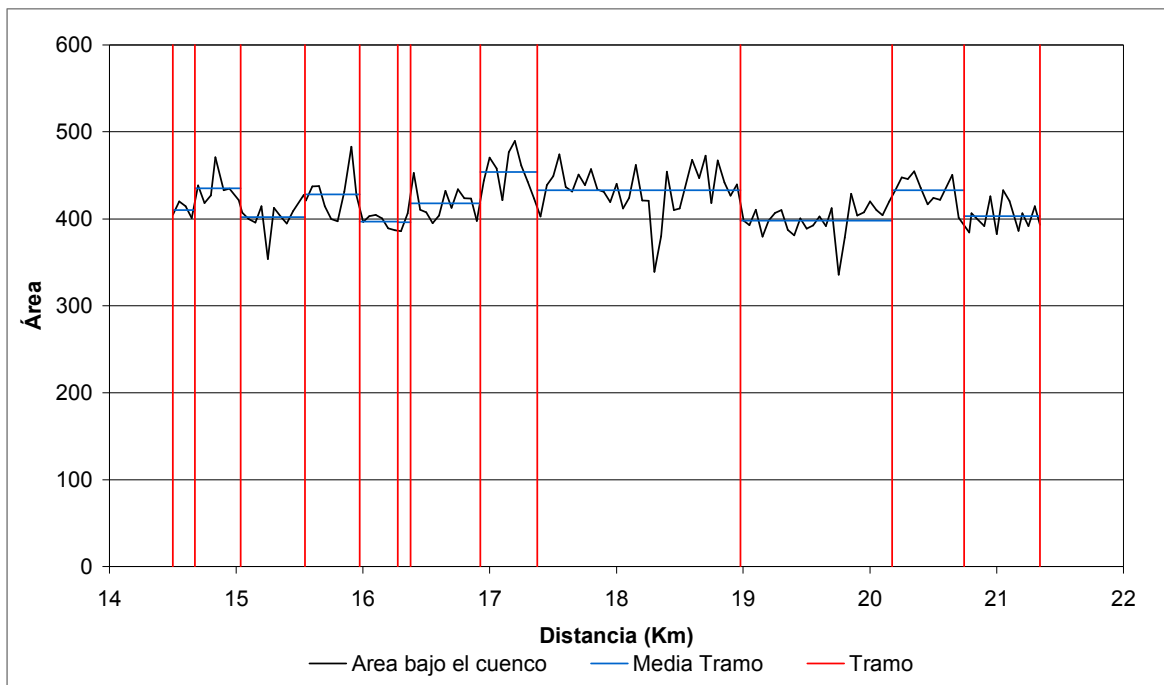


Gráfico A-2: “Tramificación según radio de curvatura del cuenco”

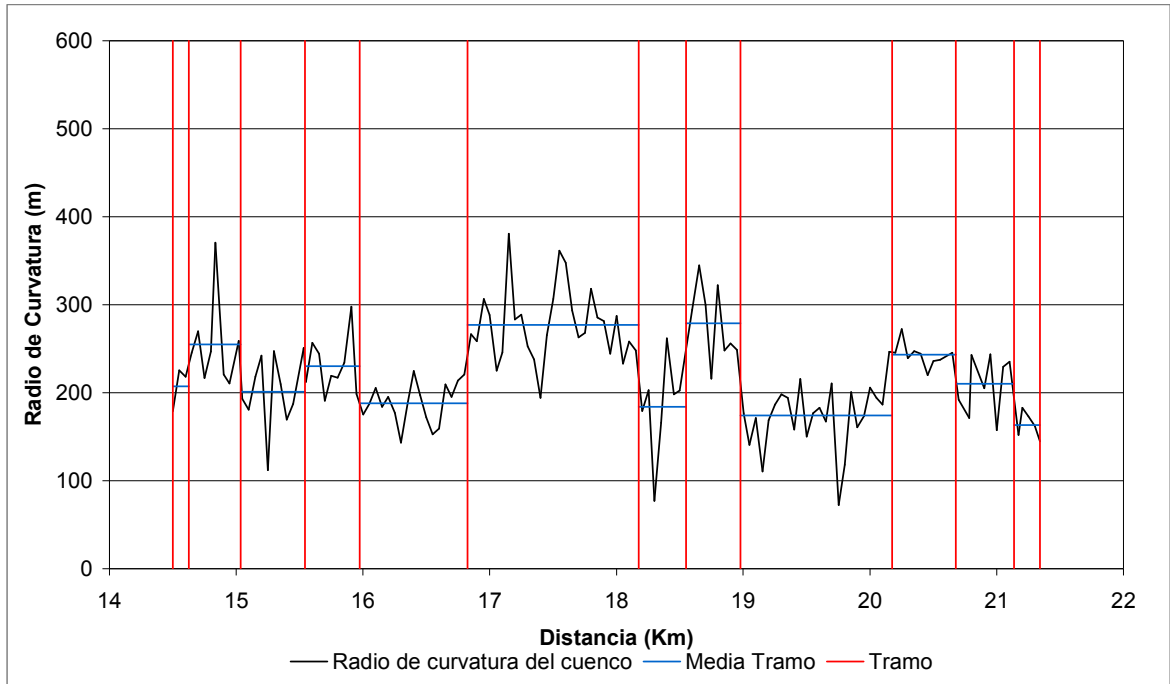
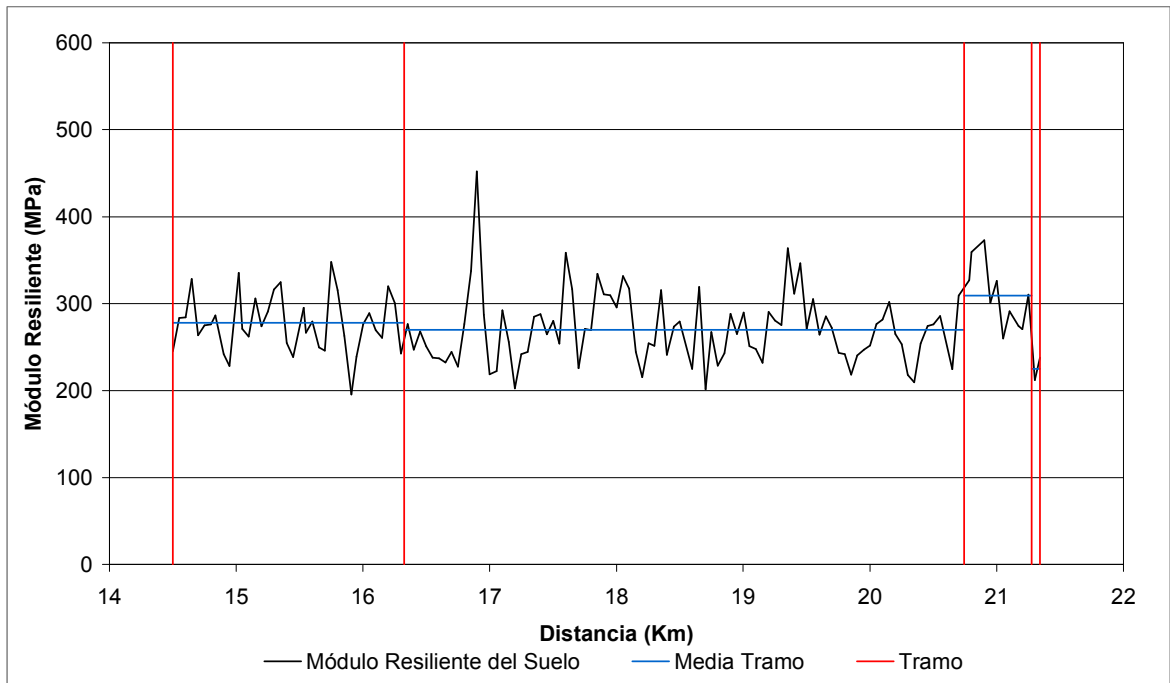


Gráfico A-3: “Tramificación según módulo resiliente del suelo”



Al superponer los gráficos anteriores se obtiene la tramificación definitiva, la que se ilustra en el siguiente gráfico.

Gráfico A-4: “Tramificación definitiva”

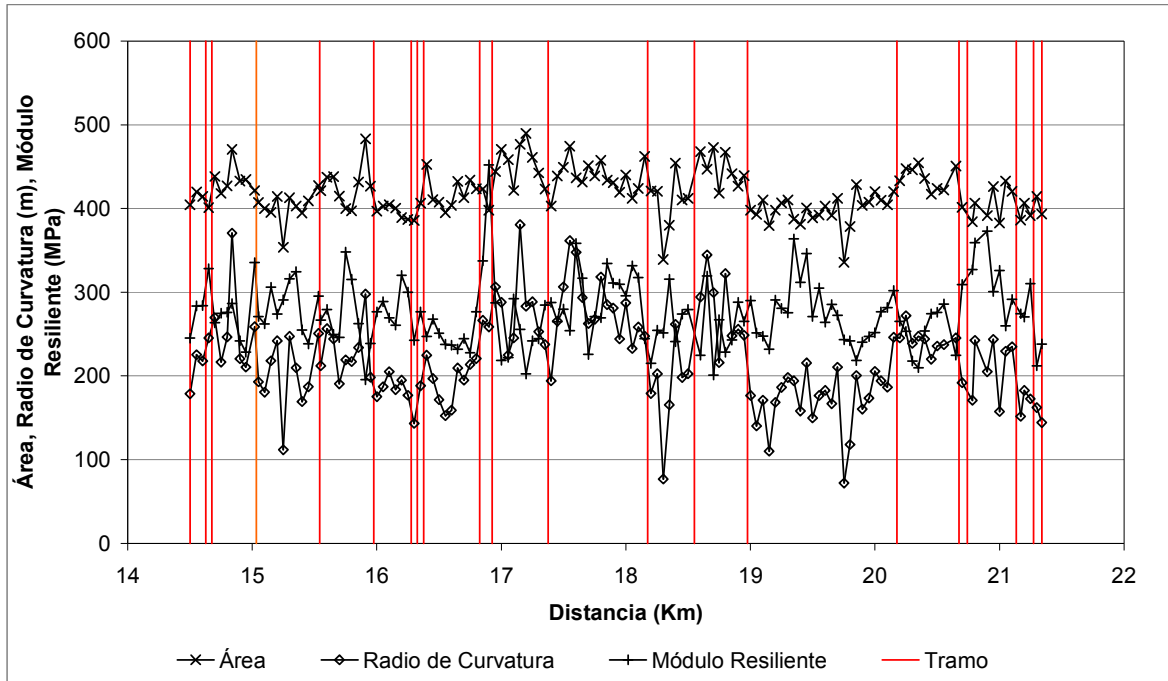


Tabla A-4: “Tramificación definitiva”

Tramo (Km)		Coeficiente de variación (%)		
Inicio	Fin	Área	Radio de curvatura	Módulo resiliente
14,500	14,603	1,9	12,0	8,2
14,650	14,650	2,2	12,9	11,9
14,700	15,020	4,0	21,5	12,7
15,050	15,533	4,9	21,1	9,8
15,551	15,950	6,0	14,3	16,6
16,001	16,251	1,9	6,1	7,6
16,300	16,300	2,0	10,8	9,2
16,352	16,352	3,7	19,2	9,3
16,401	16,800	4,3	13,8	6,6
16,852	16,900	4,4	2,1	20,5
16,954	17,351	5,1	16,9	13,1
17,400	18,152	4,2	15,1	12,4
18,202	18,500	9,0	30,4	12,2
18,599	18,950	4,5	15,6	14,9
19,003	20,151	4,7	21,3	12,6
20,200	20,651	3,1	5,7	11,0
20,701	20,701	3,9	8,7	12,4
20,784	21,101	5,1	16,6	12,3
21,171	21,249	2,7	9,3	7,7
21,300	21,340	3,7	8,2	8,1

En la tabla anterior se observa que el tramo con el menor coeficiente de variación para los tres parámetros es el comprendido entre el Km 16,000 y el Km 16,250, por lo tanto, este es el tramo que se escoge para realizar el estudio.

ANEXO B: DATOS DE DEFLECTOMETRÍA

Se cuenta con tres set de datos, dos de ellos son obtenidos con estaciones distanciadas 25 m entre sí, en el tramo comprendido entre el Km 16,000 y el Km 16,250, con dos deflectómetros de impacto distintos, uno perteneciente al Laboratorio Nacional de Vialidad (LNV) y el otro perteneciente a la empresa de asesoría vial Gauss S.A. (Gauss-TH –TH: Tramo Homogéneo–); el tercer set de datos es obtenido con estaciones distanciadas 50 m entre sí, en el tramo comprendido entre el Km 14,500 y el Km 21,400, con el deflectómetro de impacto perteneciente a Gauss S.A (Gauss-TC –TC: Tramo Completo–).

A continuación se presentan los datos obtenidos.

Tabla B-1: “Datos de deflectometría LNV”

Estación N°	Ubicación (Km)	Carga (kN)	Deformación (μm)							Temperatura (°C)	
			D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Aire	Superficie
1	16,000	49,5	689	230	179	134	95	47	28	19	29
2	16,025	49,9	353	226	174	126	89	43	26	20	31
3	16,050	49,9	370	200	152	121	89	43	26	20	31
4	16,075	49,9	360	200	166	113	79	40	24	20	31
5	16,100	50,0	229	182	143	107	73	39	25	20	31
6	16,125	50,0	259	182	138	102	69	36	20	20	31
7	16,150	49,9	319	208	168	116	79	39	23	20	31
8	16,175	49,9	377	219	174	119	81	40	25	20	31
9	16,200	50,0	243	148	119	83	60	35	25	20	31
10	16,225	50,0	307	156	124	91	67	40	30	20	31
11	16,250	50,0	263	156	128	88	63	33	22	19	30

Tabla B-2: “Datos de deflectometría Gauss-TH”

Estación N°	Ubicación (Km)	Carga (kN)	Deformación (μm)							Temperatura (°C)	
			D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Aire	Superficie
1	16,001	48,2	276	187	143	93	65	38	24	76	19
2	16,051	48,4	274	188	146	98	67	36	23	76	27
3	16,100	47,5	265	188	145	94	64	32	21	76	22
4	16,152	48,4	282	200	151	99	67	35	22	76	20
5	16,200	48,6	246	169	127	81	54	30	21	76	23
6	16,251	48,4	262	180	133	86	58	32	23	76	25

Tabla B-3: “Datos de deflectometría Gauss-TC”

Estación N°	Ubicación (Km)	Carga (kN)	Deformación (μm)							Temperatura (°C)	
			D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Aire	Superficie
1	14,500	48,3	296	207	160	105	72	38	27	76,0	20,6
2	14,553	48,2	255	183	143	98	68	37	26	76,0	21,9

Tabla B-3: “Datos de deflectometría Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	Ubicación (Km)	Carga (kN)	Deformación (µm)							Temperatura (°C)	
			D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Aire	Superficie
3	14,603	48,3	270	196	153	102	68	34	21	75,6	21,9
4	14,650	48,0	220	158	120	78	51	26	16	75,6	22,0
5	14,700	48,1	256	194	155	106	73	36	20	76,0	22,2
6	14,750	48,8	273	201	155	105	71	36	23	76,0	22,7
7	14,800	48,3	253	186	147	102	70	33	20	76,1	23,2
8	14,838	48,7	196	148	121	91	68	41	25	76,1	21,3
9	14,901	48,4	280	207	162	113	80	44	29	75,9	22,9
10	14,949	49,1	301	222	176	122	86	47	29	76,8	18,7
11	15,020	47,8	200	137	107	78	57	34	22	75,7	20,3
12	15,050	48,1	294	211	164	107	71	34	21	75,7	22,2
13	15,100	48,2	281	197	149	98	67	36	24	75,6	17,7
14	15,151	48,2	245	176	133	84	54	27	17	75,7	20,6
15	15,200	48,8	252	186	145	95	62	30	19	75,8	17,1
16	15,251	48,0	310	176	135	88	60	31	22	76,0	22,6
17	15,300	48,6	222	157	122	82	57	31	22	76,0	17,6
18	15,352	48,7	248	171	133	88	60	32	23	75,7	25,4
19	15,401	47,8	287	191	149	100	68	34	25	76,0	21,6
20	15,451	48,3	293	205	161	108	73	38	27	75,9	19,4
21	15,533	48,0	231	167	130	90	65	37	27	76,3	25,3
22	15,551	48,0	266	189	148	101	72	41	29	75,7	25,1
23	15,600	48,9	238	173	137	95	70	42	31	76,3	23,6
24	15,653	48,7	273	205	163	112	78	42	27	76,0	21,3
25	15,700	48,6	310	228	176	119	79	37	21	76,0	24,5
26	15,750	48,7	237	165	127	85	56	29	22	76,4	23,5
27	15,799	48,5	239	169	128	82	55	28	19	76,0	23,8
28	15,853	48,6	257	186	147	104	74	40	28	76,0	23,9
29	15,909	48,4	271	210	174	132	99	56	36	75,7	22,2
30	15,950	48,4	289	204	162	112	81	47	30	75,9	21,0
31	16,001	48,2	276	187	143	93	65	38	24	76,3	18,6
32	16,051	48,4	274	188	146	98	67	36	23	75,7	26,5
33	16,100	47,5	265	188	145	94	64	32	21	75,9	22,3
34	16,152	48,4	282	200	151	99	67	35	22	76,4	19,6
35	16,200	48,6	246	169	127	81	54	30	21	75,8	23,2
36	16,251	48,4	262	180	133	86	58	32	23	76,2	25,0
37	16,300	47,3	306	194	151	104	71	37	20	76,0	24,4
38	16,352	48,4	285	201	155	104	70	37	21	76,0	25,4
39	16,401	48,2	319	243	196	140	100	52	30	76,4	22,9
40	16,451	48,2	281	197	155	106	72	34	20	75,9	24,7
41	16,500	48,3	310	217	168	111	77	42	30	76,4	23,7
42	16,551	48,2	322	222	168	108	74	42	31	76,2	25,8
43	16,600	46,8	315	213	166	112	79	43	26	76,3	25,7
44	16,651	47,6	288	209	165	115	82	48	29	75,9	24,4
45	16,700	47,1	314	235	181	118	77	34	21	76,4	25,7
46	16,750	47,8	290	209	168	118	84	45	33	76,4	24,7
47	16,800	47,0	239	164	129	91	68	42	32	76,3	23,0
48	16,852	48,1	207	145	114	79	57	35	24	76,0	25,6
49	16,900	48,6	178	120	90	61	43	28	21	76,3	29,3
50	16,954	47,4	226	172	137	95	66	37	22	76,0	25,0

Tabla B-3: “Datos de deflectometría Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	Ubicación (Km)	Carga (kN)	Deformación (µm)							Temperatura (°C)	
			D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Aire	Superficie
51	17,000	48,1	256	198	159	118	88	53	31	75,8	25,5
52	17,056	47,5	313	230	191	139	102	57	39	76,0	23,6
53	17,100	47,5	246	181	141	96	65	33	21	76,3	24,5
54	17,151	48,6	221	175	144	103	76	41	25	75,8	24,4
55	17,199	47,8	328	263	221	162	119	63	35	76,3	25,6
56	17,251	48,4	243	179	148	107	80	48	34	76,4	26,3
57	17,300	48,3	262	195	156	108	79	41	26	75,8	27,6
58	17,351	48,4	246	176	139	97	68	34	20	76,4	27,4
59	17,400	47,5	267	184	143	97	66	32	19	76,0	29,4
60	17,450	49,0	256	192	154	106	74	37	24	75,9	29,1
61	17,500	49,0	226	170	137	98	70	37	25	76,1	29,0
62	17,550	48,3	224	175	144	104	76	44	28	76,0	26,4
63	17,600	48,4	190	144	113	77	54	29	18	76,0	27,9
64	17,651	48,3	218	161	128	88	61	31	19	75,8	28,8
65	17,700	48,0	278	216	172	121	85	44	24	75,8	27,4
66	17,751	48,1	241	178	142	100	71	38	23	75,7	27,2
67	17,800	48,5	226	171	139	100	72	41	26	76,0	27,2
68	17,850	48,5	194	136	107	75	58	37	26	75,9	30,8
69	17,900	48,2	228	171	134	90	62	35	26	76,2	27,7
70	17,951	48,0	244	180	139	89	62	36	25	76,0	28,5
71	18,000	48,8	229	173	136	94	66	39	23	76,0	29,0
72	18,051	48,1	230	164	125	82	58	36	24	76,0	29,2
73	18,100	48,4	224	163	126	85	61	35	25	75,8	29,4
74	18,152	48,6	306	236	192	137	100	53	33	75,7	33,6
75	18,202	46,8	316	216	176	123	87	45	29	76,6	33,1
76	18,252	47,1	266	184	145	104	74	42	28	76,4	28,5
77	18,300	47,6	374	184	146	101	71	37	25	76,4	29,2
78	18,351	49,1	257	162	125	83	57	30	21	76,4	31,7
79	18,398	47,6	245	177	144	102	79	51	38	76,4	31,7
80	18,452	48,6	278	196	153	103	71	34	20	76,5	30,9
81	18,500	47,5	261	183	141	98	68	38	24	76,4	30,2
82	18,599	48,9	258	199	162	118	87	49	29	76,4	29,8
83	18,653	48,7	200	151	121	85	61	32	19	75,9	29,5
84	18,704	48,3	282	222	184	134	96	47	27	75,5	31,5
85	18,750	48,8	283	207	163	109	73	34	22	76,0	30,5
86	18,800	48,0	253	199	163	116	84	41	20	76,4	31,0
87	18,852	48,6	273	202	164	114	80	43	23	76,0	30,4
88	18,901	46,8	237	172	136	93	65	35	21	76,4	31,2
89	18,950	48,4	239	173	136	98	73	43	30	76,4	33,5
90	19,003	47,1	274	184	142	94	65	39	29	76,4	29,3
91	19,051	47,1	304	187	148	104	75	46	34	76,6	37,6
92	19,101	48,3	309	217	167	113	78	46	35	76,6	32,4
93	19,152	48,3	342	199	156	111	81	49	35	76,3	28,8
94	19,201	48,7	273	182	138	93	67	41	27	76,4	32,0
95	19,250	48,4	277	193	148	98	69	40	28	76,0	34,5
96	19,301	48,2	278	196	153	102	70	36	22	76,4	35,2
97	19,350	49,1	249	176	129	82	54	28	18	76,4	35,0
98	19,402	48,3	304	212	157	98	62	30	18	75,8	34,9

Tabla B-3: “Datos de deflectometría Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	Ubicación (Km)	Carga (kN)	Deformación (µm)							Temperatura (°C)	
			D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Aire	Superficie
99	19,452	48,5	228	157	119	79	56	31	23	76,0	34,7
100	19,500	48,1	304	199	153	102	71	36	20	76,3	34,4
101	19,552	48,8	283	195	149	98	64	31	21	76,0	37,6
102	19,600	46,9	289	200	156	106	71	33	18	75,8	33,1
103	19,653	47,1	283	188	145	97	66	34	20	76,0	33,0
104	19,699	47,0	279	202	158	104	69	34	21	76,4	34,5
105	19,752	47,0	388	190	149	103	72	39	25	76,4	29,4
106	19,800	47,8	352	212	169	115	79	40	23	76,0	35,3
107	19,851	47,5	309	224	179	125	87	42	23	76,4	35,4
108	19,900	48,7	327	223	176	119	81	39	23	76,6	37,5
109	19,953	48,2	314	222	172	114	78	39	23	76,5	37,6
110	20,000	49,1	297	218	171	115	78	37	23	75,8	33,2
111	20,050	48,4	281	201	154	102	70	39	27	75,8	34,2
112	20,100	48,6	282	200	152	101	69	36	26	76,4	36,3
113	20,151	48,3	247	184	142	95	64	33	24	76,1	35,8
114	20,200	48,4	263	194	155	105	73	40	24	76,1	37,5
115	20,250	48,8	253	191	153	109	77	42	26	76,3	38,5
116	20,300	48,5	302	231	186	129	89	46	27	75,8	35,4
117	20,350	49,3	298	229	185	133	94	47	25	76,4	31,2
118	20400	48,9	267	196	158	109	77	39	23	76,7	36,4
119	20,453	48,0	268	199	152	103	70	33	18	76,2	36,3
120	20,500	48,3	254	182	145	100	70	34	18	76,1	36,1
121	20,553	48,6	251	182	143	98	68	33	16	76,4	35,7
122	20,651	48,3	275	208	165	119	86	49	31	76,4	37,2
123	20,701	48,7	250	168	129	88	63	35	20	76,4	31,4
124	20,784	47,4	253	161	124	84	58	31	18	75,7	39,8
125	20,802	48,5	217	154	117	78	54	29	20	76,6	33,8
126	20,902	46,6	205	130	99	67	50	32	23	76,6	36,7
127	20,951	48,9	238	174	134	93	65	40	30	76,3	36,9
128	21,000	47,3	249	150	116	79	58	38	26	76,1	37,4
129	21,051	48,7	261	192	149	104	75	44	30	76,5	37,7
130	21,101	48,8	253	188	144	98	67	34	22	76,1	37,8
131	21,171	49,4	343	241	184	116	72	28	14	76,7	36,5
132	21,200	48,7	289	202	156	105	72	38	23	76,5	38,1
133	21,249	48,9	272	184	139	93	63	34	21	76,2	37,9
134	21,300	47,2	341	240	188	129	89	47	29	76,5	39,2
135	21,340	48,8	360	254	193	124	82	34	19	75,8	38,0

En las tablas B-2 y B-3 se observa que la temperatura del aire es muy alta, claramente esto corresponde a un sensor defectuoso.

ANEXO C: DETERMINACIÓN DEL ESPESOR Y DEL DIÁMETRO DE LOS TESTIGOS

El espesor se determina de acuerdo al procedimiento 8.302.41 “Asfaltos: Método para determinar el espesor de muestras asfálticas compactadas”, perteneciente al Volumen N° 8 del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad.

Este método consiste en realizar 4 mediciones sobre el manto del cilindro, distanciadas entre ellas en un cuarto de circunferencia (90°). Cada medición consiste en determinar el espesor total del testigo y el espesor de la capa superior, cuya diferencia corresponde al espesor de la capa inferior. El espesor de cada capa corresponde a la media aritmética de los valores obtenidos en las 4 mediciones.

El diámetro de los testigos de terreno se mide de acuerdo al siguiente procedimiento: se realizan 2 mediciones sobre cada cara del cilindro, estas mediciones se efectúan sobre 2 diámetros perpendiculares entre sí, el diámetro del testigo corresponde a la media aritmética entre los valores obtenidos. En este caso, el diámetro de los testigos es medido antes y después de separar las capas, en ambos casos se obtiene un diámetro de 99 mm para todos los testigos.

En las siguientes tablas se muestra el espesor y el diámetro de los testigos.

Tabla C-1: “Espesor de testigos antes de separar las 2 capas”

Testigo N°	Ubicación (Km)	Espesor (mm)						Diámetro (mm)
		Total		Carpeta de Rodadura		Binder		
		Medido	Promedio	Medido	Promedio	Medido	Promedio	
1	16,025	130	130	52	52	78	78	99
		131		53		78		
		129		52		77		
		129		52		77		
2	16,075	131	132	61	61	70	71	99
		131		61		70		
		133		61		72		
		131		61		70		
3	16,125	134	135	61	60	73	75	99
		134		59		75		
		134		59		75		
		137		61		76		
4	16,175	137	137	59	59	78	79	99
		137		59		78		
		137		58		79		
		138		59		79		

Tabla C-1: “Espesor de testigos antes de separar las 2 capas (continuación)”

Testigo N°	Ubicación (Km)	Espesor (mm)						Diámetro (mm)
		Total		Carpeta de Rodadura		Binder		
		Medido	Promedio	Medido	Promedio	Medido	Promedio	
5	16,225	148	150	62	62	86	87	99
		152		63		89		
		149		62		87		
		149		62		87		

Tabla C-2: “Espesor de testigos después de separar las 2 capas”

Testigo N°	Ubicación (Km)	Espesor (mm)					Diámetro (mm)
		h1	h2	h3	h4	Promedio	
B1	16,025	47	45	45	46	46	99
B2	16,075	58	58	59	59	59	99
B3	16,125	59	61	61	59	60	99
B4	16,175	64	65	65	63	65	99
B5	16,225	75	75	73	74	75	99
C1	16,025	52	52	54	54	53	99
C2	16,075	60	61	60	59	60	99
C3	16,125	58	57	57	58	58	99
C4	16,175	55	54	55	56	55	99
C5	16,225	60	61	63	60	61	99

En la tabla anterior la letra C corresponde a Carpeta de Rodadura y la letra B, a Binder.

ANEXO D: CONFECCIÓN DE PROBETAS DE LABORATORIO

Las probetas son confeccionadas con 1100 gr de los áridos antes mencionados y la cantidad de asfalto requerida por cada tipo de mezcla.

La reproducción de ambas mezclas asfálticas se hace de acuerdo a los parámetros que a continuación se presentan.

Tabla D-1: “Granulometría de los áridos”

Tamiz ASTM	Fracción que pasa (%)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
¾”	100	100			
½”	19	99			
⅜”	2	75	100		
Nº 4	1	12	96		
Nº 8	1	4	64		
Nº 30	1	2	20	100	
Nº 50	1	2	11	99	100
Nº 100	1	2	5	93	92
Nº 200	1	1	3	74	87

Para fabricar 1 probeta se necesitan las siguientes cantidades de materiales.

Tabla D-2: “Cantidad de materiales para mezcla asfáltica de carpeta de rodadura”

Tamiz ASTM	Fracción retenida (g)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
½”	187,11	2,86			
⅜”	39,27	68,64			
Nº 4	2,31	180,18	20,68		
Nº 8	0,00	22,88	165,44		
Nº 30	0,00	5,72	227,48		
Nº 50	0,00	0,00	46,53	0,33	
Nº 100	0,00	0,00	31,02	1,98	2,64
Nº 200	0,00	2,86	10,34	6,27	1,65
Bajo Nº 200	2,31	2,86	15,51	24,42	28,71
Total	231,00	286,00	517,00	33,00	33,00

Tabla D-3: “Cantidad de materiales para mezcla asfáltica de binder”

Tamiz ASTM	Fracción retenida (g)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
½”	267,30	2,75			

Tabla D-3: “Cantidad de materiales para mezcla asfáltica de binder (continuación)”

Tamiz ASTM	Fracción retenida (g)				
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
3/8”	56,10	66,00			
Nº 4	3,30	173,25	18,04		
Nº 8	0,00	22,00	144,32		
Nº 30	0,00	5,50	198,44		
Nº 50	0,00	0,00	40,59	0,22	
Nº 100	0,00	0,00	27,06	1,32	1,76
Nº 200	0,00	2,75	9,02	4,18	1,10
Bajo Nº 200	3,30	2,75	13,53	16,28	19,14
Total	330,00	275,00	451,00	22,00	22,00

En ambos casos, la fracción bajo Nº 200 de las Muestras 1, 2 y 3 es reemplazada por Muestra 4.

En las siguientes tablas se presenta la dosificación y la granulometría de los áridos, así como la banda de trabajo de cada mezcla.

Tabla D-4: “Dosificación de los áridos”

Muestra	Fracción (%)	
	Carpeta de Rodadura	Binder
1	21	30
2	26	25
3	47	41
4	3	2
5	3	2

Tabla D-5: “Granulometría de los áridos y banda de trabajo”

Tamiz ASTM	Fracción que Pasa (%)		Banda de Trabajo	
	Carpeta de Rodadura	Binder	Carpeta de Rodadura	Binder
3/4”	100	100	100	100
1/2”	83	75	80 – 95	75 – 100
3/8”	73	64	70 – 85	60 – 85
Nº 4	54	47	43 – 58	35 – 55
Nº 8	37	32	28 – 42	20 – 35
Nº 30	16	13	13 – 24	10 – 22
Nº 50	12	9	8 – 17	6 – 16
Nº 100	9	7	6 – 12	4 – 12
Nº 200	7	5	4 – 8	2 – 8

ANEXO E: DETERMINACIÓN DEL ESPESOR Y EL DIÁMETRO DE LAS PROBETAS

El espesor de las probetas se determina de acuerdo al procedimiento 8.302.41 “Asfaltos: Método para determinar el espesor de muestras asfálticas compactadas”, perteneciente al Volumen N° 8 del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad. Este método consiste en realizar 4 mediciones sobre el manto del cilindro, distanciadas entre ellas en un cuarto de circunferencia (90°). Cada medición consiste en determinar el espesor total del testigo y el espesor de la capa superior, cuya diferencia corresponde al espesor de la capa inferior. El espesor de cada capa corresponde a la media aritmética de los valores obtenidos en las 4 mediciones.

El diámetro de las probetas se mide de acuerdo al siguiente procedimiento: se realizan 2 mediciones sobre cada cara del cilindro, estas mediciones se efectúan sobre 2 diámetros perpendiculares entre sí, el diámetro del testigo corresponde a la media aritmética entre los valores obtenidos.

Tabla E-1: “Espesor y diámetro de probetas”

Probeta N°	Espesor (mm)					Diámetro (mm)				
	h1	h2	h3	h4	Promedio	d1	d2	d3	d4	Promedio
B501	65	65	64	64	65	102	102	102	102	102
B502	64	64	64	64	64	102	102	102	102	102
B503	63	64	64	64	64	102	101	102	101	102
B504	63	63	64	63	64	102	102	102	102	102
B505	63	63	64	63	64	101	102	101	102	102
B751	63	63	63	63	63	101	102	101	102	102
B752	63	64	63	64	64	102	102	102	102	102
B753	64	63	63	63	64	101	102	101	102	102
B754	63	64	64	65	64	102	102	102	102	102
B755	65	65	65	65	65	102	102	102	102	102
C501	62	62	62	62	62	101	101	101	101	101
C502	63	63	63	63	63	101	102	101	102	102
C503	62	62	63	62	63	102	102	102	102	102
C504	63	63	63	63	63	101	101	101	101	101
C505	62	62	62	62	62	102	102	102	102	102
C751	62	61	61	62	62	102	101	102	101	102
C752	60	60	61	61	61	102	102	102	102	102
C753	62	61	62	62	62	102	102	102	102	102
C754	61	60	60	61	61	102	102	102	102	102
C755	62	62	62	62	62	101	101	101	101	101

ANEXO F: DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LOS TESTIGOS Y DE LAS PROBETAS

Tanto en el caso de los testigos de terreno como en el de las probetas confeccionadas en el laboratorio, la densidad real se determina según el método 8.302.38 “Asfaltos: Método para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas”, perteneciente al Volumen N° 8 del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad.

Este método consiste en determinar la masa y el volumen de la muestra, y luego calcular su densidad de acuerdo a la fórmula que se muestra más adelante. La masa de la muestra se determina por pesada al aire ambiente en condiciones seca y saturada superficialmente seca, el volumen se determina por diferencia entre pesadas al aire ambiente y sumergida en agua. Finalmente, la densidad real de la muestra se determina utilizando la siguiente fórmula:

$$G = \frac{A}{\frac{B-C}{\rho_w}} \times 1000 \left(\frac{Kg}{cm^3} \right) \quad (\text{Fórmula F-1})$$

Donde:

G es la densidad real de la muestra (Kg/cm²).

A es la masa de la muestra en aire (g).

B es la masa de la muestra en aire con superficie seca (g).

C es la masa de la probeta en agua (g).

ρ_w es la densidad del agua, su valor es 1 (g/cm³).

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para los testigos de terreno.

Tabla F-1: “Densidad real de los testigos”

Testigo N°	Ubicación (Km)	Peso (g)			Densidad (Kg/m ³)
		Al aire	En agua	Al aire con superficie seca	
C1	16,025	943,5	541,5	945,5	2.335
C2	16,075	1.057,9	603,0	1.059,8	2.316
C3	16,125	1.044,9	604,2	1.045,0	2.370
C4	16,175	965,2	546,0	966,2	2.297
C5	16,225	1.067,5	608,8	1.068,9	2.320
				Promedio	2.328

Tabla F-1: “Densidad real de los testigos (continuación)”

Testigo N°	Ubicación (Km)	Peso (g)			Densidad (Kg/m3)
		Al aire	En agua	Al aire con superficie seca	
B1	16,025	805,0	460,1	807,7	2.316
B2	16,075	1.029,5	589,0	1.034,1	2.313
B3	16,125	1.064,3	607,0	1.068,2	2.308
B4	16,175	1.154,0	664,3	1.157,4	2.340
B5	16,225	1.346,9	775,6	1.348,8	2.350
				Promedio	2.325

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para las probetas fabricadas en el laboratorio.

Tabla F-2: “Densidad real de las probetas”

Probeta N°	N° de golpes	Peso (g)			Densidad (Kg/m3)
		Al aire	En agua	Al aire con superficie seca	
B501	50	1.134,1	653,5	1.146,8	2.299
B502	50	1.132,5	654,2	1.144,9	2.308
B503	50	1.136,7	656,9	1.147,1	2.319
B504	50	1.136,0	660,0	1.147,4	2.331
B505	50	1.137,2	657,1	1.146,7	2.323
				Promedio	2.316
B751	75	1.135,1	654,9	1.142,9	2.326
B752	75	1.136,7	655,8	1.146,0	2.319
B753	75	1.135,6	656,0	1.144,1	2.327
B754	75	1.135,0	656,1	1.145,8	2.318
B755	75	1.130,2	655,6	1.144,7	2.311
				Promedio	2.320
C501	50	1.139,8	654,5	1.143,1	2.333
C502	50	1.142,8	654,6	1.146,4	2.324
C503	50	1.139,3	651,0	1.141,7	2.322
C504	50	1.139,1	651,7	1.142,3	2.322
C505	50	1.138,4	653,1	1.140,7	2.335
				Promedio	2.327
C751	75	1.141,3	657,9	1.143,1	2.352
C752	75	1.139,7	659,8	1.140,8	2.369
C753	75	1.138,2	654,6	1.140,3	2.343
C754	75	1.146,1	665,3	1.146,5	2.382
C755	75	1.141,9	656,6	1.145,0	2.338
				Promedio	2.357

ANEXO G: DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS TESTIGOS, MEDIANTE LA PRENSA MTS

El procedimiento de ensaye se efectúa de acuerdo a la norma AASHTO T294-92. Los testigos son sometidos a pulsos de carga axial, a una temperatura de 19 °C y se registra la tensión y la deformación.

Las siguientes figuras corresponden a los gráficos de Tensión vs. Deformación para cada testigo, en ellas las líneas negras corresponden a los ciclos de carga y las líneas rojas corresponden a las rectas que unen los pares $(\text{Deformación}, \text{Tensión})_{\min}$ y $(\text{Deformación}, \text{Tensión})_{\max}$, cuya pendiente corresponde al Módulo de Elasticidad. En todos los casos, han sido descartados los ciclos de carga con formas irregulares, las que se deben a un período de acomodamiento de la muestra.

Gráfico G-1: “Tensión vs. Deformación Testigo 1”

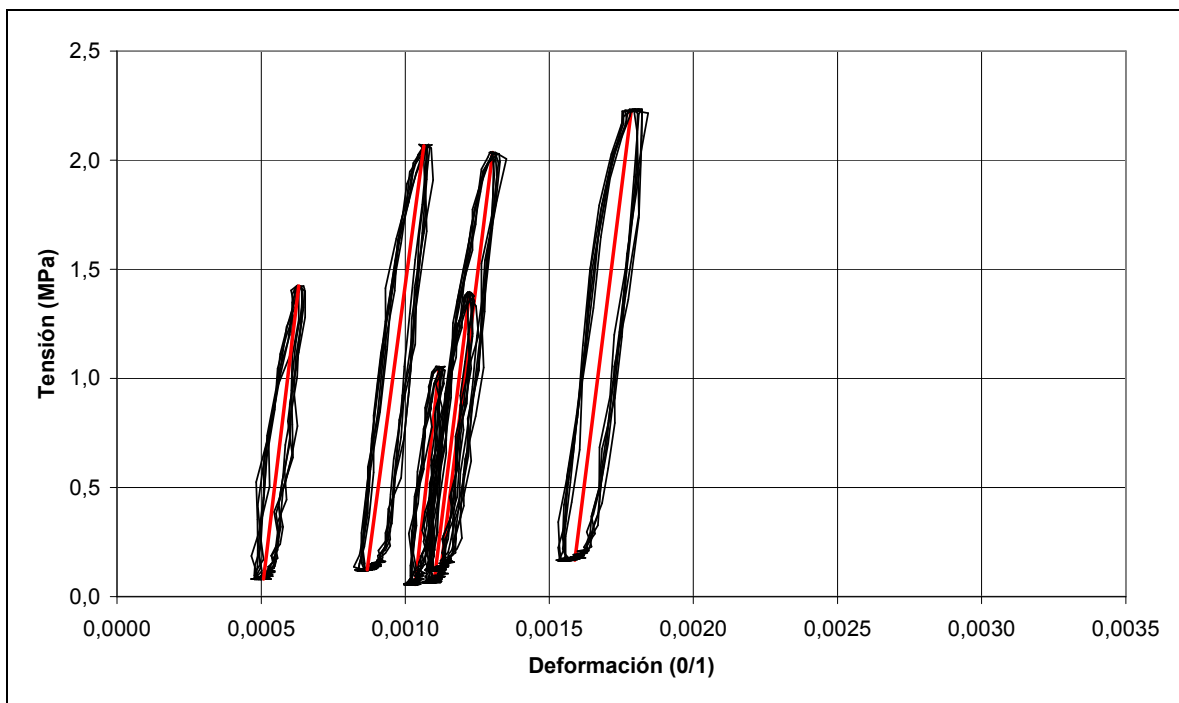


Gráfico G-2: "Tensión vs. Deformación Testigo 2"

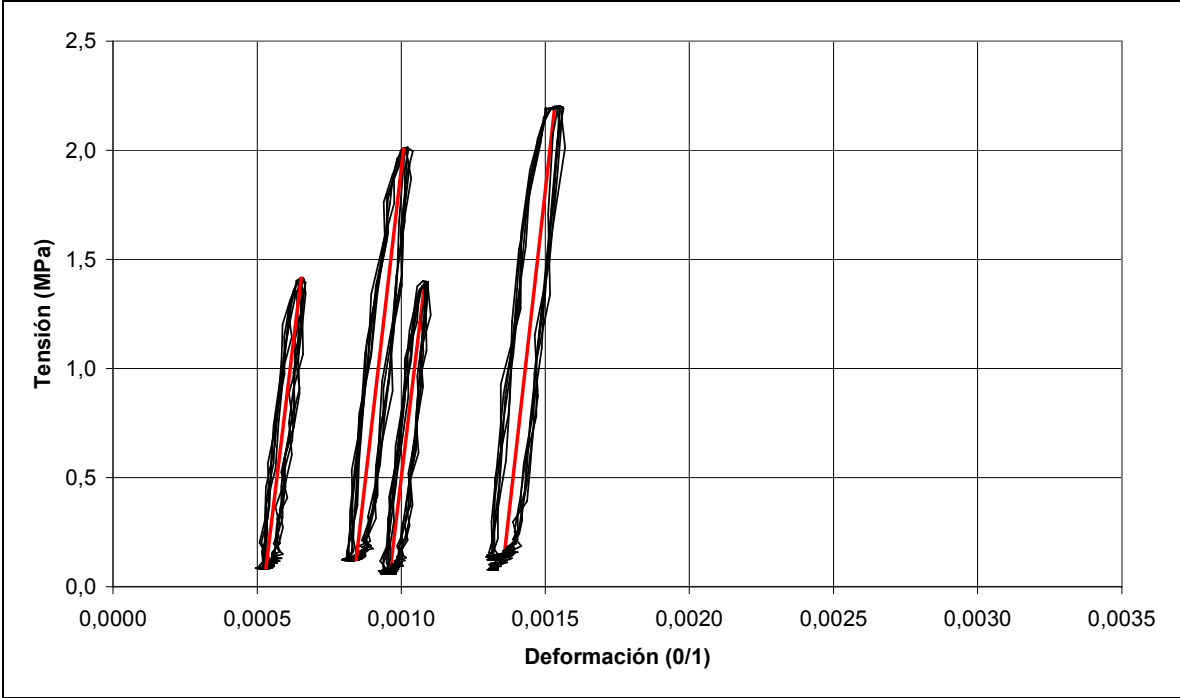


Gráfico G-3: "Tensión vs. Deformación Testigo 3"

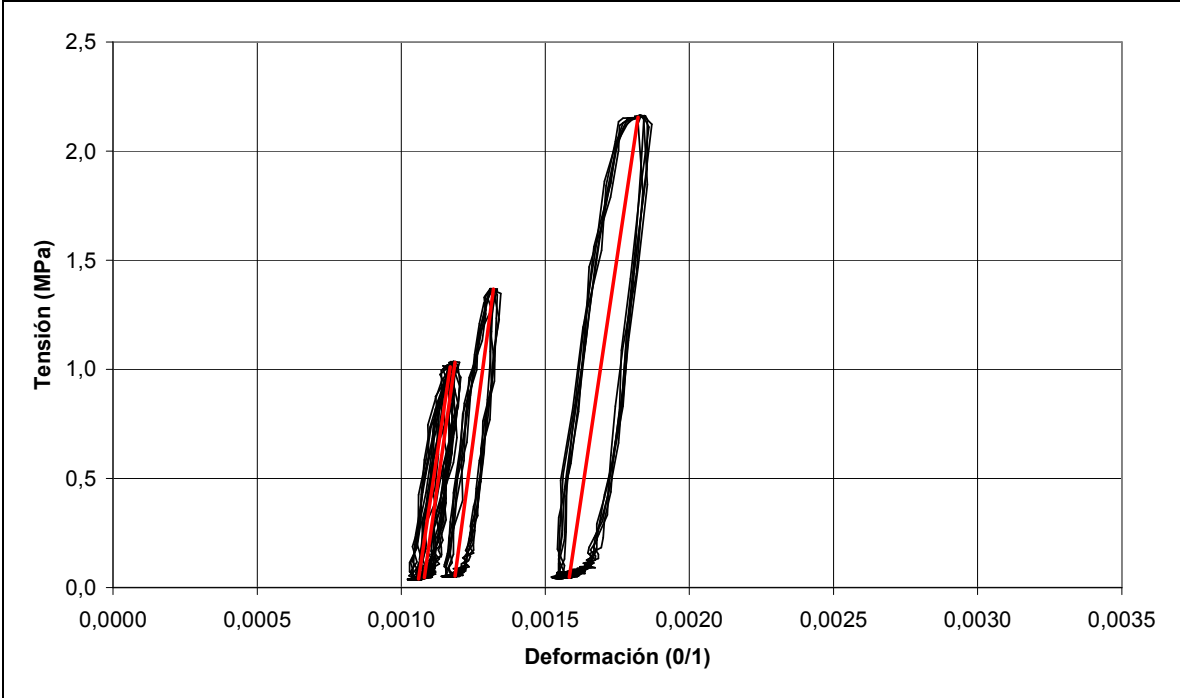


Gráfico G-4: “Tensión vs. Deformación Testigo 4”

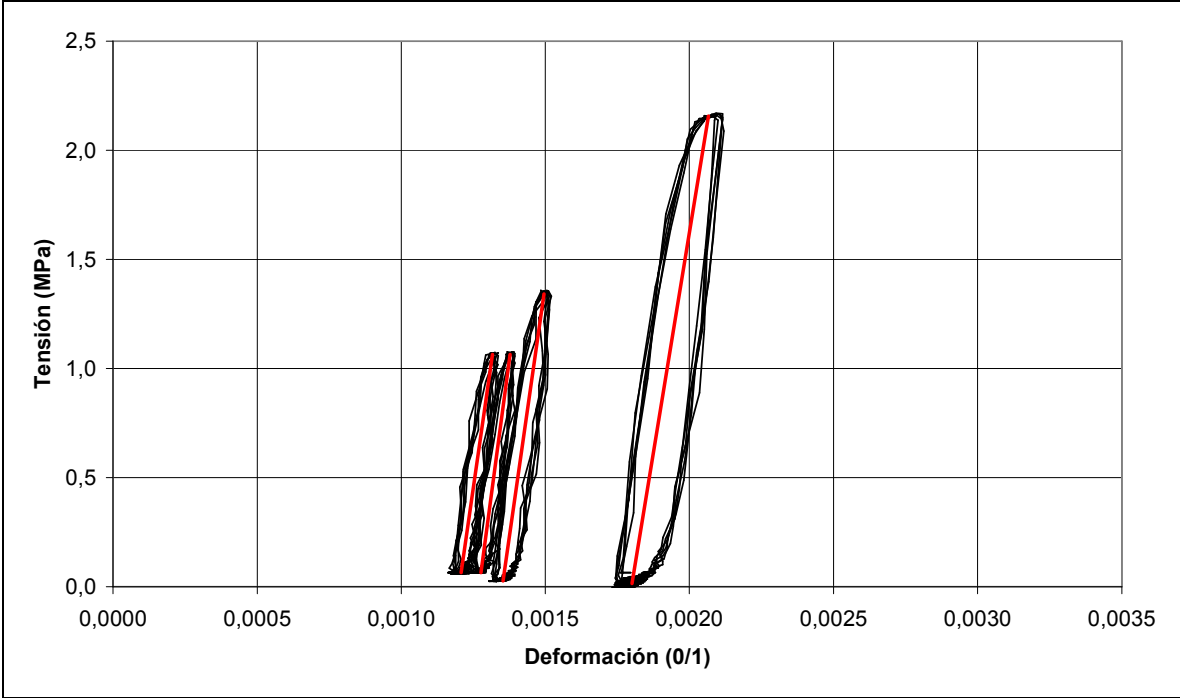
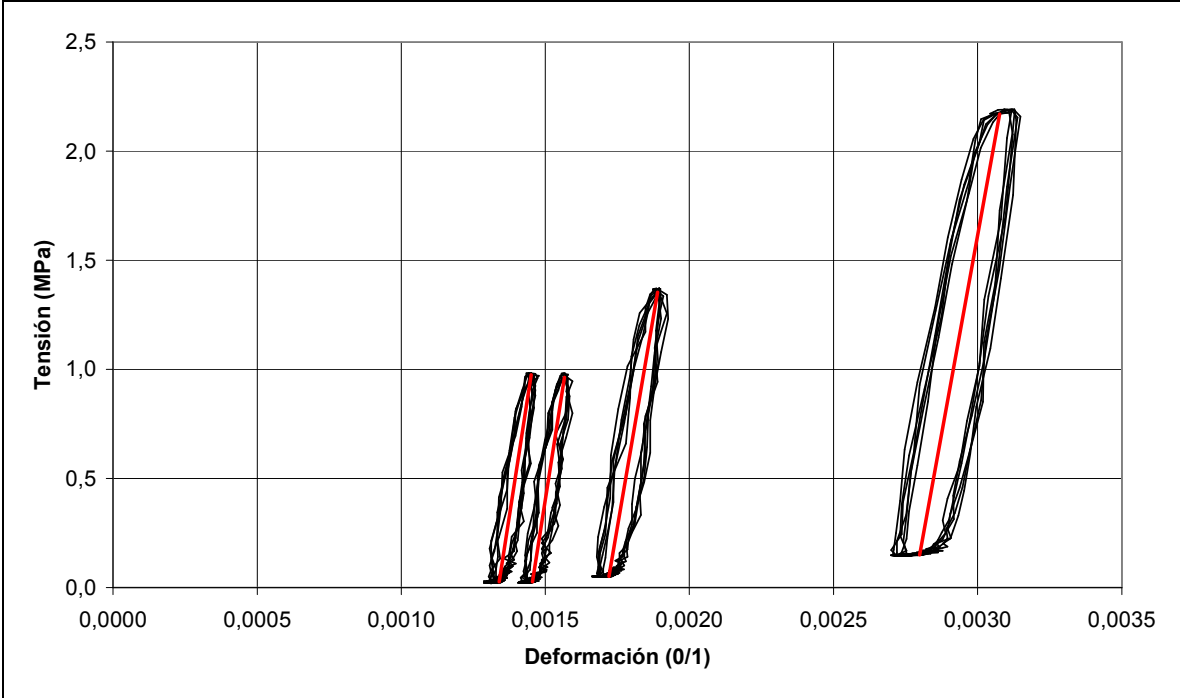


Gráfico G-5: “Tensión vs. Deformación Testigo 5”



En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos.

Tabla G-1: “Módulo de elasticidad para el Testigo 1”

Ciclo N°	Módulo de Elasticidad (MPa)
1	10.911
2	9.861
3	10.665
4	11.838
5	10.768
6	10.504
Promedio	10.758

Tabla G-2: “Módulo de elasticidad para el Testigo 2”

Ciclo N°	Módulo de Elasticidad (MPa)
1	10.979
2	11.389
3	10.985
4	11.697
Promedio	11.262

Tabla G-3: “Módulo de elasticidad para el Testigo 3”

Ciclo N°	Módulo de Elasticidad (Mpa)
1	8.838
2	9.230
3	9.808
4	8.818
Promedio	9.173

Tabla G-4: “Módulo de elasticidad para el Testigo 4”

Ciclo N°	Módulo de Elasticidad (MPa)
1	9.262
2	9.891
3	9.269
4	8.080
Promedio	9.126

Tabla G-5: “Módulo de elasticidad para el Testigo 5”

Ciclo N°	Módulo de Elasticidad (MPa)
1	8.547
2	8.447
3	7.747
4	7.288
Promedio	8.007

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los Módulos de Elasticidad obtenidos.

Tabla G-6: “Resumen de módulos de elasticidad”

Testigo N°	Módulo de Elasticidad (MPa)
1	10.758
2	11.262
3	9.173
4	9.126
5	8.007
Promedio	9.665

ANEXO H: DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD MEDIANTE LA PRENSA NAT

El procedimiento de ensaye se efectúa de acuerdo a la norma EN 12697-26. Las muestras son sometidas a pulsos de carga, a una temperatura de 19 °C. La carga se aplica sobre el manto de la muestra, induciendo sobre ésta una tracción indirecta. Esta prensa cuenta con un *software* asociado a ella, el cual entrega como resultado el módulo de elasticidad de la muestra ensayada.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos.

Tabla H-1: “Módulo de Elasticidad de los testigos de terreno”

Testigo N°	Ubicación (Km)	Módulo de Elasticidad (MPa)		
		Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio
C1	16,025	5.054	5.287	5.171
C2	16,075	4.590	4.837	4.714
C3	16,125	4.497	4.490	4.494
C4	16,175	4.707	4.595	4.651
C5	16,225	4.698	4.601	4.650
Promedio				4.736
B1	16,025	4.281	4.226	4.254
B2	16,075	4.325	4.414	4.370
B3	16,125	4.156	3.958	4.057
B4	16,175	4.306	4.312	4.309
B5	16,225	4.892	5.125	5.009
Promedio				4.400

Tabla H-2: “Módulo de Elasticidad de las probetas fabricadas en el laboratorio, correspondientes a la mezcla de binder”

Probeta N°	Módulo de Elasticidad (MPa)					
	Compactadas a 50 golpes			Compactadas a 75 golpes		
	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio
B501	3.721	3.986	3.854			
B502	3.116	3.138	3.127			
B503	3.510	3.472	3.491			
B504	3.692	3.526	3.609			
B505	4.108	4.184	4.146			
Promedio			3.645			
B751				4.239	3.993	4.116
B752				5.431	5.538	5.485
B753				3.933	3.866	3.900
B754				3.909	4.146	4.028

Tabla H-2: “Módulo de Elasticidad de las probetas fabricadas en el laboratorio, correspondientes a la mezcla de binder (continuación)”

Probeta N°	Módulo de Elasticidad (MPa)					
	Compactadas a 50 golpes			Compactadas a 75 golpes		
	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio
B755				3.678	3.947	3.813
Promedio						4.268

Tabla H-3: “Módulo de Elasticidad de las probetas fabricadas en el laboratorio, correspondientes a la mezcla de carpeta de rodadura”

Probeta N°	Módulo de Elasticidad (MPa)					
	Compactadas a 50 golpes			Compactadas a 75 golpes		
	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio
C501	4.450	4.187	4.319			
C502	3.958	4.135	4.047			
C503	4.169	4.017	4.093			
C504	4.587	4.061	4.324			
C505	4.149	3.905	4.027			
Promedio			4.162			
C751				4.496	4.276	4.386
C752				4.380	4.627	4.504
C753				4.240	4.066	4.153
C754				3.717	3.287	3.502
C755				4.651	4.232	4.442
Promedio						4.197

Tabla H-4: “Módulo de Elasticidad de los testigos y de las probetas fabricadas en el laboratorio”

Muestra	Número de Golpes	Capa	Densidad (Kg/m3)	Módulo de Elasticidad (MPa)
Testigos		Carpeta de Rodadura	2.328	4.736
		Binder	2.325	4.400
Probetas	50	Carpeta de Rodadura	2.327	4.162
		Binder	2.316	3.645
	75	Carpeta de Rodadura	2.357	4.197
		Binder	2.320	4.268

ANEXO I: CORRECCIÓN POR DENSIDAD DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS PROBETAS

Los resultados obtenidos corresponden a densidades distintas al valor de terreno, es decir, de los testigos, por lo tanto, se debe determinar cuál sería el valor del módulo de elasticidad si la densidad de las probetas fuera igual a la de los testigos.

Esto se hace confeccionando un gráfico de Módulo de Elasticidad vs. Densidad para las mezclas correspondiente a Carpeta de Rodadura y Binder. En ambos casos se determina la recta que une los puntos de compactación a 50 y 75 golpes, posteriormente esta recta se utiliza para determinar el módulo de elasticidad de ambas mezclas, teniendo como parámetro de entrada la densidad de los testigos.

Lo expuesto, se ilustra en la siguiente tabla y en el siguiente gráfico.

Gráfico I-1: “Corrección por temperatura del módulo de elasticidad de las probetas”

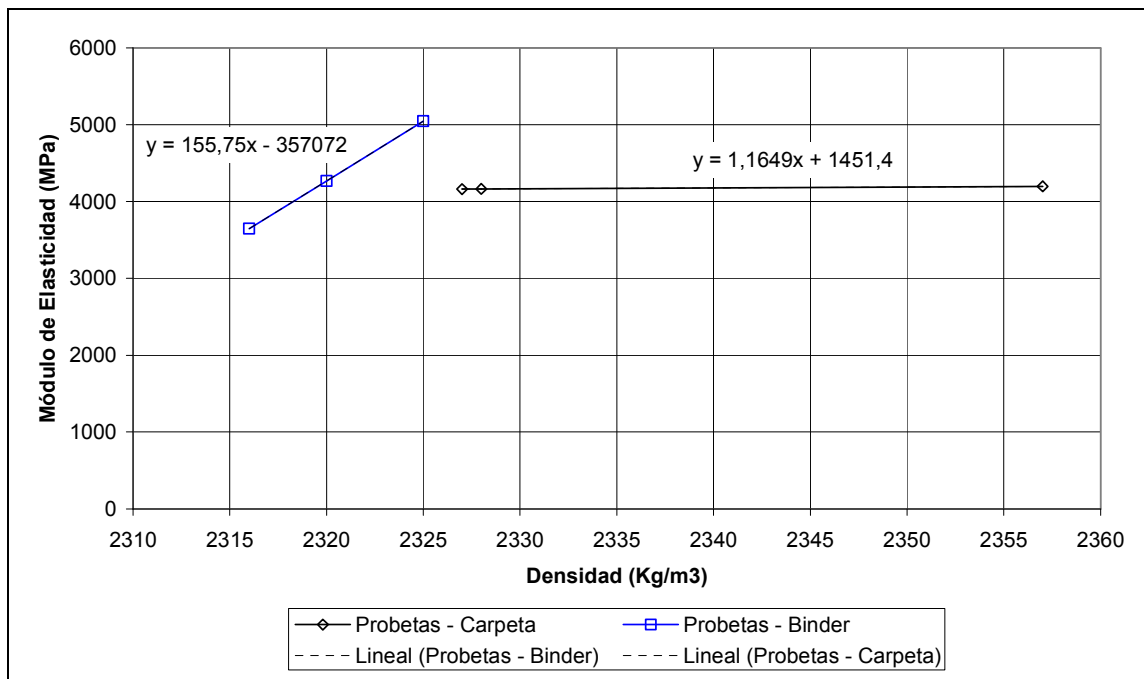


Tabla I-1: “Corrección por temperatura del módulo de elasticidad de las probetas”

Muestra	Capa	Número de Golpes	Densidad (Kg/m3)	Módulo de Elasticidad (MPa)
Probeta	Carpeta	50	2.327	4.162
		75	2.357	4.197
		Interpolación	2.328	4.163

Tabla I-1: “Corrección por temperatura del módulo de elasticidad de las probetas (continuación)”

Muestra	Capa	Número de Golpes	Densidad (Kg/m3)	Módulo de Elasticidad (MPa)
Probeta	Binder	50	2.316	3.645
		75	2.320	4.268
		Extrapolación	2.325	5.047
Testigo	Carpeta		2.328	4.736
	Binder		2.325	4.400

ANEXO J: DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO

De acuerdo a lo establecido por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), el valor correspondiente a la deflexión bajo el plato de carga, es decir, D0, se corrige por temperatura.

En primer lugar, se determina la temperatura del pavimento al momento de realizar las mediciones a una profundidad igual a un tercio de su espesor, para ello se utiliza la fórmula BELLS2:

$$T_d = 2,9 + 0,935 \cdot IR + \log\left(\frac{d}{17,8}\right) \cdot [-0,487 \cdot IR + 0,626 \cdot (1 - day) + 3,29 \cdot \sin\left(\frac{(hr_{11} - 15,5) \cdot 2\pi}{18}\right)] + 0,037 \cdot IR \cdot \sin\left(\frac{(hr_9 - 13,5) \cdot 2\pi}{18}\right) \quad (\text{Fórmula J-1})$$

$$d = \frac{h}{3} \quad (\text{Fórmula J-2})$$

Donde:

T_d es la temperatura a la profundidad d (°C).

IR es la temperatura de la superficie del pavimento (°C).

d es la profundidad a la que se calcula la T_d (mm).

$(1 - day)$ es la temperatura media del día anterior a la toma de datos (14 °C).

hr_{11} es la hora del día en un sistema de 24 hrs., pero llevado a sistema decimal entre las 11:00 y las 5:00.

$hr_{11} = 11$ si $5 < hr_{11} < 11$ y $hr_{11} = hr_{11} + 24$ si $0 < hr_{11} < 5$.

hr_9 es la hora del día en un sistema de 24 hrs., pero llevado a sistema decimal entre las 9:00 y las 3:00.

$hr_9 = 9$ si $3 < hr_9 < 9$ y $hr_9 = hr_9 + 24$ si $0 < hr_9 < 3$.

h es el espesor del pavimento (mm).

**ANEXO K: DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN TERRENO –
CÁLCULO DIRECTO**

El cálculo directo se lleva a cabo de acuerdo los procedimientos establecidos por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), por el *Washington State Department of Transportation* (WSDOT) y por la *Federal Highway Administration* (FHWA).

K.1. AASHTO

El módulo resiliente del suelo y el módulo de elasticidad del pavimento son inferidos de las siguientes fórmulas.

$$M_R = \frac{P \cdot (1 - \mu^2)}{\pi \cdot D_{r_0} \cdot r_0} \quad \text{(Fórmula K-1)}$$

$$r_0 \equiv 0,7 \cdot \frac{r}{a_e} \quad \text{(Fórmula K-2)}$$

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(\sum_{i=1}^n H_i \cdot \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2} \quad \text{(Fórmula K-3)}$$

$$d_0 = 1,5 \cdot p \cdot a \cdot \left(\frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{H}{a} \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{H}{a} \right)^2}}}{E_p} \right) \quad \text{(Fórmula K-4)}$$

Donde:

M_R es el módulo resiliente del suelo (psi).

P es la carga aplicada (lbs).

μ es el coeficiente de Poisson, su valor es 0,5.

D_{r_0} es la deflexión a una distancia r_0 del centro del plato de carga (plg).

r es la distancia desde el centro del plato de carga al punto donde se mide la deflexión (plg).

a_e es el radio del bulbo de tensión en la interface suelo-pavimento (plg).

n es la cantidad de capas del pavimento.

H_i es el espesor de la capa i del pavimento (plg).

E_p es el módulo de elasticidad del pavimento (psi). Corresponde a pavimento asfáltico más base.

d_0 es la deflexión medida en el centro del plato de carga, corregida a 68 °F (20 °C).

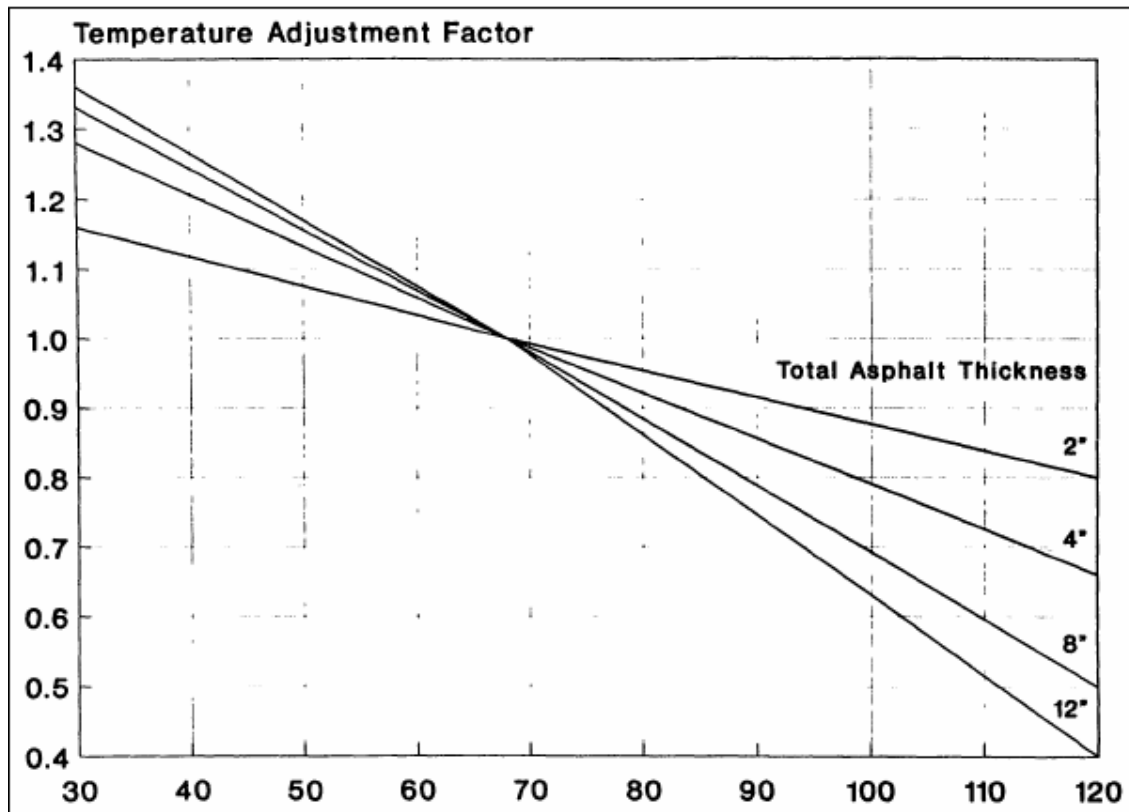
p es la presión producida por el plato de carga (psi).

a es el radio del plato de carga (plg).

H es el espesor total del pavimento (plg).

El factor de ajuste por el cual se multiplica d_0 para corregirlo a 68 °F (20 °C), se determina mediante el siguiente gráfico.

Gráfico K-1: “Factor de ajuste”



K.2. WSDOT

Este procedimiento se realiza mediante la utilización de las siguientes fórmulas.

$$E_{SG} = -346 + 0,00676 \cdot \frac{2 \cdot P}{D_{90} + D_{120}} \quad (\text{Fórmula K-5})$$

$$\log(E_{AC}) = -4,13164 + 0,25726 \cdot \frac{5,9}{h_{AC}} + 0,92874 \cdot \sqrt{\frac{5,9}{h_B}} - 0,69727 \cdot \sqrt{\frac{h_{AC}}{h_B}} +$$
$$- 0,96687 \cdot \log(E_{SG}) + 1,88298 \cdot \log\left(\frac{P \cdot A_1}{D_0^2}\right) \quad (\text{Fórmula K-6})$$

$$\log(E_B) = 0,50634 + 0,03474 \cdot \frac{5,9}{h_{AC}} + 0,12541 \cdot \sqrt{\frac{5,9}{h_B}} - 0,09416 \cdot \sqrt{\frac{h_{AC}}{h_B}} +$$
$$+ 0,51386 \cdot \log(E_{SG}) + 0,25424 \cdot \log\left(\frac{P \cdot A_1}{D_0^2}\right) \quad (\text{Fórmula K-7})$$

$$A_1 = 4 \cdot D_0 + 6 \cdot D_{20} + 8 \cdot D_{30} + 12 \cdot D_{60} + 6 \cdot D_{90} \quad (\text{Fórmula K-8})$$

Donde:

E_{SG} es el módulo de elasticidad del suelo (psi).

P es la carga aplicada (lbs).

D_i es la deflexión medida a i cm del punto de aplicación de la carga (plg).

E_{AC} es el módulo de elasticidad del pavimento asfáltico (psi).

h_{AC} es el espesor del pavimento asfáltico (plg).

h_B es el espesor de la base (plg).

A_1 es el área aproximada bajo el cuenco de deflexión, hasta 90 cm del punto de aplicación de la carga.

E_B es el módulo de elasticidad de la base (psi).

K.3. FHWA

Este procedimiento se realiza mediante la utilización de las siguientes fórmulas.

$$E_S = I \cdot \frac{(1 + \mu_0) \cdot (3 - 4 \cdot \mu_0)}{2 \cdot (1 - \mu_0)} \cdot \left(\frac{S_0}{S} \right) \cdot \left(\frac{p}{\Delta_0 \cdot l} \right) \quad (\text{Fórmula K-10})$$

$$r_{50} = r \cdot \frac{(1/\alpha)^{1/\beta} - B}{\left[\frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{\Delta_0}{\Delta_r} - 1 \right) \right]^{1/\beta} - B} \quad (\text{Fórmula K-11})$$

$$\alpha = \begin{cases} 0,3804 & \text{si } \Delta_r/\Delta_0 > 0,43 \\ 4,3795 \times 10^{-4} & \text{si } \Delta_r/\Delta_0 < 0,43 \end{cases} \quad (\text{Fórmula K-12})$$

$$\beta = \begin{cases} 1,8246 & \text{si } \Delta_r/\Delta_0 > 0,43 \\ 4,9903 & \text{si } \Delta_r/\Delta_0 < 0,43 \end{cases} \quad (\text{Fórmula K-13})$$

$$B = \begin{cases} 0 & \text{si } \Delta_r/\Delta_0 > 0,43 \\ 3 & \text{si } \Delta_r/\Delta_0 < 0,43 \end{cases} \quad (\text{Fórmula K-14})$$

$$l = \begin{cases} y_0 \cdot \frac{r_{50}}{2} + \left[(y_0 \cdot r_{50})^2 - 4 \cdot m \cdot a \cdot r_{50} \right]^{1/2} & \text{si } \frac{a}{l} \geq 0,2 \\ (y_0 - 0,2 \cdot m) \cdot r_{50} & \text{si } \frac{a}{l} < 0,2 \end{cases} \quad (\text{Fórmula K-15})$$

$$\frac{S_0}{S} = \begin{cases} 1 - m \cdot \left(\frac{a}{l} - 0,2 \right) & \text{si } \frac{a}{l} \geq 0,2 \\ 1 & \text{si } \frac{a}{l} < 0,2 \end{cases} \quad (\text{Fórmula K-16})$$

$$E_0 = \frac{1,5 \cdot a \cdot \sigma_0}{d_0} \quad (\text{Fórmula K-17})$$

$$A_{12} = 2 \cdot \left[2 + 3 \cdot \left(\frac{d_8}{d_0} \right) + \left(\frac{d_{12}}{d_0} \right) \right] \quad (\text{Fórmula K-18})$$

$$AF_{AC} = \left(\frac{k_2 - 1}{k_2 - \frac{A_{12}}{k_1}} \right)^{1,35} \quad (\text{Fórmula K-19})$$

$$E_{AC} = \frac{E_0 \cdot AF_{AC} \cdot k_3^{1/AF_{AC}}}{k_3^2} \quad (\text{Fórmula K-20})$$

$$k_3 = \frac{h_1}{2 \cdot a} \quad (\text{Fórmula K-21})$$

$$E_B = 0,2 \cdot h_2^{0,45} \cdot E_S \quad (\text{Fórmula K-22})$$

Donde:

E_s es el módulo del suelo (psi).

I es el factor de influencia.

μ_0 es el coeficiente de Poisson del Suelo.

S_0 es la rigidez teórica del punto de aplicación de la carga.

S es la rigidez del pavimento.

p es la carga aplicada (lb).

Δ_0 es la deflexión bajo el centro del plato de carga (").

l es el largo característico (").

r_{50} es la distancia desde el centro del plato de carga, donde $\Delta_r/\Delta_0 = 0,5$ (").

r es la distancia desde el centro del plato de carga (").

α es un coeficiente de la curva de ajuste.

β es un coeficiente de la curva de ajuste.

B es un coeficiente de la curva de ajuste.

Δ_r es la deflexión a la distancia r desde el centro del plato de carga (").

y_0 es un coeficiente del largo característico.

m es un coeficiente del largo característico.

a es el radio del plato de carga (").

\bar{m} es un coeficiente del cociente de rigidez.

E_0 es el módulo compuesto del paquete estructural completo bajo el plato de carga (psi).

σ_0 es el *peak* de la presión que produce la carga de impacto bajo el plato de carga (psi).

d_0 es el *peak* de la deflexión bajo el plato de carga (").

A_{12} es el área bajo los primeros 305 mm (12") del cuenco de deflexión.

d_8 es la deflexión medida a 203 mm (8") desde el centro del plato de carga (").

d_{12} es la deflexión medida a 305 mm (12") desde el centro del plato de carga (").

AF_{AC} es el factor de área, es decir, el aumento del área a la potencia de 1,35.

$k_1 = 6,85$ es el área cuando la rigidez de la capa de asfalto es la igual a las capas inferiores.

$k_2 = 12/6,85 = 1,752$ es el máximo aumento posible en área.

E_{AC} Módulo de elasticidad combinado de las capas del pavimento asfáltico (psi).

k_3 es la razón entre el espesor de la capa de pavimento asfáltico y el diámetro del plato de carga.

h_1 es el espesor total de las capas de pavimento asfáltico (”).

E_B es el módulo de elasticidad de la base (MPa). E_S se ingresa en (MPa).

h_2 es el espesor de la capa de base (mm).

En las siguientes tablas se muestran los parámetros de entrada.

Tabla K-1: “Parámetros constantes”

Parámetro	Valor
Espesor de la base	30 cm
Radio del plato de carga	15 cm
Coefficiente de Poisson del suelo	0,4
Factor de influencia	0,1689
y_0	0,603
\bar{m}	0,108
$\bar{\bar{m}}$	0,208

Los datos de deflectometría se encuentran en el Anexo B. El espesor del pavimento asfáltico se encuentra en el Anexo C.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos mediante los métodos mencionados.

Tabla K-2: “Resultados preliminares – LNV”

Estación N°	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)							
		FHWA			WSDOT			AASHTO	
		Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Pavimento
1	28	130	339	452	112	180	384	195	286
2	30	139	363	2.982	119	246	2.837	220	748
3	30	173	451	1.819	122	240	2.116	220	696
4	30	145	379	2.054	133	255	2.097	231	705
5	30	156	406	10.181	145	321	7.692	274	1.370
6	30	176	457	5.132	153	310	4.629	290	1.075
7	30	144	375	3.358	131	267	3.228	248	820
8	30	139	361	2.029	128	247	2.020	242	643
9	30	204	531	3.354	184	335	3.516	333	1.096
10	29	222	578	1.659	166	288	1.843	299	816
11	29	190	494	2.749	174	314	2.833	317	979
Promedio	30	170	442	2.501	145	274	2.561	264	813

En la tabla anterior se observa que el resultado correspondiente a la estación n° 1 es muy bajo, y los resultados correspondientes a las estaciones n° 5 y n° 6 son muy altos, por lo tanto, estas estaciones se eliminan. De esta manera se obtienen los siguientes resultados:

Tabla K-3: “Resultados obtenidos mediante Cálculo Directo – LNV”

Estación N°	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)							
		FHWA			WSDOT			AASHTO	
		Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Pavimento
2	30	139	363	2.982	119	246	2.837	220	748
3	30	173	451	1.819	122	240	2.116	220	696
4	30	145	379	2.054	133	255	2.097	231	705
7	30	144	375	3.358	131	267	3.228	248	820
8	30	139	361	2.029	128	247	2.020	242	643
9	30	204	531	3.354	184	335	3.516	333	1.096
10	29	222	578	1.659	166	288	1.843	299	816
11	29	190	494	2.749	174	314	2.833	317	979
Promedio	30	170	442	2.501	145	274	2.561	264	813

Tabla K-4: “Resultados preliminares – Gauss-TH”

Estación N°	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)							
		FHWA			WSDOT			AASHTO	
		Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Pavimento
1	20	164	536	4.376	159	305	3.397	275	726
2	26	161	419	4.610	152	299	3.697	287	821
3	23	158	413	5.080	156	305	3.769	267	797
4	21	155	405	4.645	152	297	3.536	259	738
5	23	186	484	4.395	187	335	3.214	316	855
6	25	177	460	3.797	175	315	2.789	331	780
Promedio	23	167	453	4.484	164	309	3.400	289	786

En la tabla anterior se observa que el resultado correspondiente a la estación n° 6 es muy bajo, por lo tanto, esta estación se elimina. De esta manera se obtienen los siguientes resultados:

Tabla K-5: “Resultados obtenidos mediante Cálculo Directo – Gauss-TH”

Estación N°	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)							
		FHWA			WSDOT			AASHTO	
		Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Pavimento
1	20	164	536	4.376	159	305	3.397	275	726
2	26	161	419	4.610	152	299	3.697	287	821
3	23	158	413	5.080	156	305	3.769	267	797
4	21	155	405	4.645	152	297	3.536	259	738
5	23	186	484	4.395	187	335	3.214	316	855
Promedio	23	165	451	4.621	161	308	3.523	281	787

Tabla K-6: “Resultados preliminares – Gauss-TC”

Estación Nº	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)							
		FHWA			WSDOT			AASHTO	
		Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Pavimento
1	22	146	381	4.589	143	285	3.487	245	718
2	22	163	423	5.891	152	309	4.662	284	852
3	22	152	396	5.821	149	300	4.199	284	780
4	23	194	504	6.672	196	360	4.422	328	981
5	23	149	387	7.451	141	299	5.424	264	884
6	23	152	395	6.090	145	297	4.395	275	806
7	23	157	410	6.598	147	305	5.074	276	895
8	22	190	494	9.910	161	350	9.165	286	1.295
9	23	143	373	6.061	131	282	4.846	242	820
10	20	134	348	5.727	123	269	4.628	228	724
11	21	217	564	6.302	186	363	5.947	335	1.087
12	23	142	369	5.079	141	284	3.601	271	703
13	20	157	409	4.791	153	298	3.529	262	717
14	22	175	457	5.999	184	339	3.780	306	849
15	19	162	421	6.723	163	321	4.480	274	837
16	23	189	491	2.371	170	295	1.973	291	631
17	19	193	502	6.434	184	351	4.950	316	938
18	25	177	462	5.280	173	329	4.063	325	892
19	22	156	406	3.990	149	290	3.276	255	739
20	21	145	378	4.698	140	283	3.698	239	725
21	25	178	463	6.640	162	329	5.415	295	1.018
22	25	157	408	5.427	145	298	4.479	267	864
23	24	171	446	6.799	155	322	5.766	279	1.009
24	22	142	370	6.769	134	288	5.140	250	828
25	24	133	346	5.323	128	269	3.809	246	720
26	24	186	484	5.671	181	341	4.185	348	890
27	24	184	478	5.850	186	344	3.970	315	924
28	24	159	414	6.143	143	301	5.205	263	918
29	23	123	319	8.135	109	266	7.529	196	979
30	22	144	375	4.970	131	278	4.381	239	763
31	20	164	426	4.376	160	306	3.410	276	725
32	26	161	419	4.665	154	301	3.724	289	818
33	23	158	413	5.299	158	307	3.805	270	810
34	21	155	405	4.990	153	298	3.563	261	740
35	23	186	484	5.123	189	342	3.552	320	873
36	25	177	460	4.737	177	325	3.329	300	837
37	24	152	396	3.190	141	275	2.838	243	707
38	25	151	394	4.914	146	291	3.732	277	775
39	23	114	298	6.187	181	306	1.938	247	661
40	24	150	391	4.931	142	288	3.955	268	793
41	24	139	363	4.402	134	273	3.439	251	695
42	25	139	363	3.947	139	273	2.927	238	695
43	25	137	356	3.746	128	263	3.209	237	690
44	24	139	361	5.421	126	273	4.579	232	804
45	25	125	325	5.458	126	264	3.547	245	689
46	24	136	355	5.340	124	270	4.656	228	814

Tabla K-6: “Resultados preliminares – Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)							
		FHWA			WSDOT			AASHTO	
		Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Pavimento
47	23	176	460	5.242	155	315	4.958	276	934
48	25	204	531	6.656	186	361	5.708	338	1.129
49	28	262	683	6.645	246	428	5.255	452	1.317
50	25	164	427	8.452	154	324	6.260	287	1.045
51	25	136	354	8.216	122	283	7.134	219	1.047
52	24	114	296	5.465	180	305	1.948	222	712
53	24	162	422	6.615	155	313	4.837	292	902
54	24	158	410	11.073	142	320	8.458	256	1.208
55	25	99	257	8.032	155	284	2.357	202	728
56	26	150	392	7.218	135	301	6.808	242	1.093
57	27	146	381	6.773	135	292	5.516	245	980
58	26	168	437	6.112	154	314	5.031	285	988
59	28	161	419	4.772	153	301	3.800	288	874
60	28	151	394	7.282	143	303	5.541	265	1.023
61	28	166	433	8.390	153	326	6.839	280	1.201
62	26	155	404	10.145	140	316	8.146	254	1.210
63	27	204	532	9.942	194	382	7.021	359	1.320
64	27	180	470	7.840	170	343	5.947	317	1.151
65	26	132	343	7.650	122	274	5.653	226	924
66	26	162	421	7.086	147	311	5.791	271	1.045
67	26	161	420	8.590	148	321	7.160	269	1.173
68	29	219	570	7.185	192	376	6.660	334	1.408
69	27	172	448	7.878	166	335	5.591	311	1.064
70	27	166	433	6.762	167	327	4.627	310	964
71	28	171	446	8.214	160	331	6.141	296	1.135
72	28	186	485	6.243	180	344	4.637	332	1.030
73	28	185	482	7.042	174	343	5.389	317	1.117
74	31	118	308	6.942	186	316	2.128	245	866
75	30	128	334	3.997	116	252	3.758	215	824
76	27	157	409	4.860	138	289	4.483	255	913
77	28	179	465	1.453	145	255	1.411	251	562
78	29	191	497	3.858	184	332	3.184	316	967
79	29	153	399	6.418	138	301	6.218	241	1.167
80	29	154	400	5.098	146	295	3.981	274	896
81	28	163	425	5.154	150	302	4.241	279	931
82	28	138	360	8.294	125	287	7.003	225	1.134
83	28	189	491	9.526	175	360	7.404	319	1.355
84	29	120	314	8.437	109	262	6.688	201	1.063
85	29	144	374	5.822	140	289	4.217	267	880
86	29	138	360	9.187	125	288	6.969	229	1.145
87	29	140	364	6.466	131	285	5.278	243	981
88	29	165	431	6.486	155	317	5.108	288	1.062
89	31	171	446	6.554	148	314	5.925	265	1.219
90	28	161	419	4.209	155	300	3.412	290	822
91	34	154	402	2.964	138	273	2.996	251	885
92	30	140	365	4.448	132	272	3.568	248	816

Tabla K-6: “Resultados preliminares – Gauss-TC (continuación)”

Estación Nº	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)							
		FHWA			WSDOT			AASHTO	
		Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Base	Pavimento Asfáltico	Suelo	Pavimento
93	27	150	390	2.322	132	257	2.438	232	678
94	30	171	446	4.219	160	307	3.569	291	910
95	31	159	413	4.823	152	300	3.783	281	944
96	32	152	397	5.056	147	294	3.907	275	954
97	32	185	481	5.546	190	343	3.548	364	997
98	32	149	389	4.293	158	294	2.712	312	775
99	32	198	515	5.592	189	351	4.316	346	1.145
100	31	153	398	3.566	146	282	2.958	271	823
101	34	159	414	4.569	158	302	3.313	305	937
102	30	146	379	4.428	139	280	3.509	264	848
103	30	158	411	3.935	151	292	3.185	285	840
104	31	143	373	5.435	142	288	3.878	272	904
105	28	171	445	1.364	141	247	1.303	243	532
106	32	137	357	2.463	129	252	2.308	242	701
107	32	127	331	5.071	117	257	4.221	218	911
108	34	134	349	3.897	127	262	3.237	240	846
109	34	136	353	4.497	131	269	3.429	247	875
110	31	138	359	5.642	133	279	4.146	252	897
111	31	152	396	5.223	147	295	3.873	277	926
112	33	155	403	5.034	150	296	3.718	282	954
113	32	163	425	6.991	159	319	4.816	302	1.111
114	34	149	389	6.508	142	299	5.007	265	1.127
115	34	149	387	7.541	137	299	6.060	254	1.274
116	32	124	323	6.689	116	262	5.023	218	981
117	29	123	321	7.061	113	262	5.636	210	969
118	33	148	385	6.399	138	293	5.180	254	1.126
119	33	152	396	6.265	145	297	4.406	274	1.026
120	33	160	417	5.983	149	306	4.878	276	1.129
121	32	163	426	6.306	153	312	4.885	286	1.125
122	33	135	351	6.862	123	277	5.733	225	1.154
123	29	183	477	4.765	169	324	4.043	309	1.000
124	35	186	483	3.884	175	323	3.299	327	1.071
125	31	201	523	6.543	193	361	4.793	359	1.189
126	33	228	595	4.634	210	373	4.146	373	1.272
127	33	176	458	6.799	162	327	5.304	301	1.231
128	34	197	514	3.390	181	329	3.206	326	1.044
129	34	157	409	6.368	142	300	5.167	260	1.172
130	34	163	425	6.783	155	314	4.827	291	1.155
131	33	130	339	4.082	137	268	2.635	274	735
132	34	151	394	4.727	144	289	3.710	271	973
133	34	171	445	4.445	164	311	3.430	310	997
134	35	121	316	4.022	113	244	3.357	212	842
135	34	123	319	3.886	124	251	2.701	238	746
Promedio	27	158	413	5.811	151	303	4.492	274	941

La temperatura del pavimento se obtiene mediante el método BELLS2, descrito en el Anexo J.

Los resultados anteriores deben ser corregidos por temperatura, pues se debe determinar cuál es valor del Módulo de Elasticidad del Pavimento Asfáltico a 19 °C. Más adelante se efectúa una corrección por temperatura a este valor.

Los resultados correspondientes a AASHTO ya se encuentran corregidos a 20 °C.

ANEXO L: DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN TERRENO – RETROCÁLCULO

Con el objetivo de determinar el módulo de elasticidad del pavimento asfáltico mediante Retrocálculo, se utiliza el programa computacional MODTAG.

Para determinar el Módulo de Elasticidad, se deben ingresar como parámetros de entrada los datos correspondientes a las mediciones de deflectometría, la carga que se aplica sobre la superficie del pavimento y la composición estratigráfica del tramo seleccionado para el estudio; esto último incluye el espesor de cada capa, su coeficiente de Poisson y su módulo semilla, es decir, el módulo con el que se inician los cálculos.

En las siguientes tablas se presentan los parámetros de entrada utilizados.

Tabla L-1: “Composición estratigráfica”

Capa	Espesor (mm)	Coefficiente de Poisson	Módulo Semilla (MPa)
Superficie	137	0,35	4.000
Base	300	0,4	400
Pedraplén	1.500	0,45	250
Suelo	1.437	0,45	150
Capa Rígida	1	0,2	45.000

Además, se necesitan los datos de deflectometría, los cuales se encuentran en el Anexo B.

Los resultados que se obtienen se presentan en las siguientes tablas:

Tabla L-2: “Módulo de elasticidad – LNV – Resultados preliminares”

Estación Nº	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)					Error
		Pavimento Asfáltico	Base	Pedraplén	Suelo	Capa Rígida	
1	28	223	742	145	208	45.000	6,24
2	30	4.330	259	196	187	45.000	3,46
3	30	1.260	720	129	290	45.000	6,42
4	30	1.770	500	182	235	45.000	4,90
5	30	31.300	23	2.860	524	45.000	27,97
6	30	13.300	46	344.000	1	45.000	8,67
7	30	5.910	177	300	170	45.000	1,06
8	30	2.370	341	206	193	45.000	4,22
9	30	4.430	477	387	147	45.000	2,40

Tabla L-2: “Módulo de elasticidad – LNV – Resultados preliminares (continuación)”

Estación Nº	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)					Error
		Pavimento Asfáltico	Base	Pedraplén	Suelo	Capa Rígida	
10	29	1.500	676	347	120	45.000	4,54
11	29	3.460	536	284	208	45.000	4,45
Promedio	30	6.350	409	31.731	208	45.000	6,76

En la tabla anterior se observa que el módulo de elasticidad del pavimento asfáltico en la estación 1 es excesivamente bajo, además, en las estaciones 5 y 6 el módulo de elasticidad tanto del pavimento asfáltico como del pedraplén son excesivamente altos. Por lo tanto, estas estaciones son eliminadas, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla L-3: “Módulo de elasticidad – LNV – Resultados”

Estación Nº	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)					Error
		Pavimento Asfáltico	Base	Pedraplén	Suelo	Capa Rígida	
2	30	4.330	258	195	213	45.000	3,40
3	30	1.270	711	137	613	45.000	6,61
4	30	1.770	498	185	317	45.000	4,96
7	30	5.900	180	284	159	45.000	0,98
8	30	2.370	341	205	217	45.000	4,22
9	30	4.460	477	368	113	45.000	2,20
10	29	1.480	693	320	95	45.000	4,32
11	29	3.450	541	276	213	45.000	4,40
Promedio	30	3.129	462	246	243	45.000	3,89

Tabla L-4: “Módulo de Elasticidad – Gauss-TH – Resultados preliminares”

Estación Nº	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)					Error
		Pavimento Asfáltico	Base	Pedraplén	Suelo	Capa Rígida	
1	20	2.970	296	321	105	45.000	1,44
2	26	5.950	152	468	71	45.000	1,87
3	23	6.070	122	594	62	45.000	2,06
4	21	4.170	195	347	109	45.000	1,26
5	23	6.050	138	900	44	45.000	3,52
6	25	6.960	82	6.340	6	45.000	6,24
Promedio	23	5.362	164	1.495	66	45.000	2,73

En la tabla anterior se observa que los valores obtenidos para la estación 6 se encuentran fuera de los rangos aceptables, por lo tanto, esta estación es eliminada. Los resultados que se obtienen son los siguientes.

Tabla L-5: “Módulo de Elasticidad – Gauss-TH – Resultados”

Estación Nº	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)					Error
		Pavimento Asfáltico	Base	Pedraplén	Suelo	Capa Rígida	
1	20	2.970	296	322	93	45.000	1,43
2	26	5.950	152	469	63	45.000	1,87
3	23	6.070	122	595	55	45.000	2,06
4	21	4.170	195	348	98	45.000	1,26
5	23	6.050	138	901	39	45.000	3,52
Promedio	23	5.042	181	527	70	45.000	2,03

Tabla L-6: “Módulo de Elasticidad – Gauss-TC – Resultados”

Estación Nº	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)					Error
		Pavimento Asfáltico	Base	Pedraplén	Suelo	Capa Rígida	
1	22	3.100	242	311	100	45.000	2,49
2	22	3.900	292	321	107	45.000	2,16
3	22	4.110	235	290	180	45.000	1,31
4	23	4.980	247	430	194	45.000	0,96
5	23	5.420	226	252	236	45.000	0,70
6	23	4.500	208	312	138	45.000	1,11
7	23	4.370	312	235	279	45.000	3,63
8	22	5.510	610	240	193	45.000	0,64
9	23	4.130	254	263	107	45.000	0,98
10	20	3.800	258	224	135	45.000	0,58
11	21	3.290	632	313	169	45.000	1,03
12	23	3.620	213	273	184	45.000	1,85
13	20	3.340	244	324	120	45.000	0,71
14	22	4.720	183	480	146	45.000	1,42
15	19	5.200	180	402	147	45.000	0,92
16	23	1.150	446	298	169	45.000	5,99
17	19	4.190	350	383	128	45.000	2,29
18	25	3.390	325	362	123	45.000	3,10
19	22	2.320	342	280	133	45.000	6,05
20	21	3.070	261	293	107	45.000	3,48
21	25	4.310	339	352	91	45.000	2,08
22	25	3.470	305	308	89	45.000	1,60
23	24	4.280	347	352	71	45.000	1,48
24	22	4.820	217	286	112	45.000	0,74
25	24	3.900	194	232	227	45.000	1,37
26	24	3.840	296	419	114	45.000	4,08
27	24	4.200	258	403	156	45.000	1,67
28	24	3.840	346	269	119	45.000	3,00
29	23	4.750	402	165	132	45.000	2,23
30	22	2.940	343	236	115	45.000	0,84
31	20	2.770	309	314	127	45.000	1,34
32	26	2.900	326	282	159	45.000	1,69
33	23	3.680	252	311	160	45.000	2,09
34	21	3.570	229	312	149	45.000	0,62
35	23	3.600	266	446	115	45.000	0,65

Tabla L-6: “Módulo de Elasticidad – Gauss-TC – Resultados (continuación)”

Estación N°	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)					Error
		Pavimento Asfáltico	Base	Pedraplén	Suelo	Capa Rígida	
36	25	3.370	248	424	100	45.000	0,96
37	24	1.570	446	193	388	45.000	2,43
38	25	3.290	272	256	209	45.000	1,07
39	23	4.120	245	166	180	45.000	1,08
40	24	3.040	335	215	307	45.000	3,75
41	24	2.960	235	300	84	45.000	2,02
42	25	2.780	200	357	64	45.000	0,95
43	25	2.130	333	207	170	45.000	1,34
44	24	3.510	287	231	122	45.000	1,43
45	25	4.550	106	372	111	45.000	1,40
46	24	3.280	302	247	86	45.000	4,28
47	23	2.890	443	344	63	45.000	2,22
48	25	3.950	458	381	108	45.000	0,88
49	28	4.190	467	635	84	45.000	1,04
50	25	6.230	229	336	136	45.000	1,95
51	25	5.340	338	200	139	45.000	1,75
52	24	3.010	358	173	95	45.000	3,45
53	24	4.750	243	316	158	45.000	1,34
54	24	7.960	263	263	156	45.000	1,22
55	25	5.530	210	130	193	45.000	0,99
56	26	4.030	442	259	82	45.000	2,14
57	27	4.330	327	221	173	45.000	2,61
58	26	3.740	396	231	294	45.000	2,57
59	28	2.910	356	237	291	45.000	3,11
60	28	5.020	263	268	160	45.000	2,82
61	28	5.450	356	280	147	45.000	2,99
62	26	6.960	291	279	112	45.000	0,64
63	27	7.450	269	429	164	45.000	1,32
64	27	5.160	352	288	245	45.000	1,95
65	26	5.890	173	239	168	45.000	1,39
66	26	4.490	360	241	203	45.000	1,10
67	26	5.500	365	266	142	45.000	0,81
68	29	3.940	594	372	101	45.000	1,17
69	27	6.150	173	596	53	45.000	0,77
70	27	5.310	167	561	60	45.000	2,60
71	28	6.050	240	357	123	45.000	3,18
72	28	4.340	284	429	92	45.000	2,62
73	28	4.800	306	394	95	45.000	1,43
74	31	4.680	242	184	131	45.000	1,76
75	30	2.040	392	175	176	45.000	4,54
76	27	2.720	409	247	122	45.000	2,28
77	28	561	598	229	185	45.000	6,43
78	29	2.080	454	331	172	45.000	4,52
79	29	3.600	426	303	53	45.000	1,24
80	29	3.230	323	227	287	45.000	2,92
81	28	3.260	333	277	145	45.000	0,80
82	28	5.330	338	196	172	45.000	0,31

Tabla L-6: “Módulo de Elasticidad – Gauss-TC – Resultados (continuación)”

Estación N°	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)					Error
		Pavimento Asfáltico	Base	Pedraplén	Suelo	Capa Rígida	
83	28	6.270	401	280	271	45.000	1,23
84	29	5.770	256	161	266	45.000	2,95
85	29	4.100	227	267	183	45.000	3,69
86	29	6.400	285	162	708	45.000	1,25
87	29	4.040	327	197	266	45.000	1,31
88	29	4.150	342	262	208	45.000	0,83
89	31	3.900	421	281	98	45.000	1,49
90	28	2.650	294	376	68	45.000	1,88
91	34	1.390	452	287	69	45.000	3,62
92	30	3.040	219	354	51	45.000	1,44
93	27	995	492	252	82	45.000	3,43
94	30	2.490	368	316	104	45.000	0,81
95	31	3.190	273	340	86	45.000	0,57
96	32	3.290	292	257	190	45.000	1,39
97	32	4.280	211	457	147	45.000	1,77
98	32	3.300	175	350	179	45.000	1,17
99	32	3.610	358	409	108	45.000	2,66
100	31	1.930	392	205	347	45.000	1,79
101	34	3.110	259	314	165	45.000	3,53
102	30	2.680	330	198	432	45.000	3,16
103	30	2.260	366	237	258	45.000	2,04
104	31	3.870	214	281	172	45.000	1,40
105	28	535	556	221	185	45.000	5,05
106	32	1.090	453	175	332	45.000	4,29
107	32	3.160	303	165	331	45.000	2,63
108	34	2.240	327	188	278	45.000	3,83
109	34	3.020	246	227	194	45.000	1,15
110	31	3.980	222	244	187	45.000	2,77
111	31	3.710	222	347	89	45.000	0,63
112	33	3.550	231	340	99	45.000	2,55
113	32	5.550	161	513	72	45.000	1,47
114	34	4.370	270	264	159	45.000	1,12
115	34	5.090	291	251	149	45.000	0,73
116	32	4.930	176	236	135	45.000	0,61
117	29	4.790	264	163	322	45.000	1,05
118	33	4.000	338	212	243	45.000	2,24
119	33	4.690	217	256	277	45.000	1,37
120	33	3.650	392	204	465	45.000	2,30
121	32	4.010	366	205	656	45.000	0,79
122	33	4.560	280	229	113	45.000	0,53
123	29	2.660	464	256	262	45.000	0,58
124	35	2.030	490	264	299	45.000	2,03
125	31	4.470	329	402	146	45.000	1,65
126	33	2.420	568	442	96	45.000	0,89
127	33	4.870	242	482	52	45.000	0,75
128	34	1.620	549	367	95	45.000	2,15
129	34	4.300	278	308	86	45.000	0,79

Tabla L-6: “Módulo de Elasticidad – Gauss-TC – Resultados (continuación)”

Estación N°	Temperatura del Pavimento (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)					Error
		Pavimento Asfáltico	Base	Pedraplén	Suelo	Capa Rígida	
130	34	5.170	205	354	130	45.000	1,33
131	33	3.040	178	233	484	45.000	2,79
132	34	3.060	292	254	179	45.000	0,80
133	34	2.830	326	298	182	45.000	0,82
134	35	2.520	255	197	139	45.000	1,66
135	34	2.770	191	203	313	45.000	4,03
Promedio	27	3.836	314	293	173	45.000	1,94

La temperatura del pavimento se obtiene mediante el método BELLS2, descrito en el Anexo J.

Los resultados anteriores deben ser corregidos por temperatura, pues se debe determinar cuál es valor del Módulo de Elasticidad del Pavimento Asfáltico a 19 °C. Más adelante se efectúa una corrección por temperatura a este valor.

ANEXO M: RECUPERACIÓN DE ASFALTO

M.1. Obtención de la solución de asfalto y tricloroetileno (LNV 11).

La obtención de la solución de asfalto y tricloroetileno desde los testigos de terreno se realiza de acuerdo al método 8.302.36 “Asfaltos: Método para determinar el contenido de ligante de mezclas asfálticas por centrifugación – Ensaye de extracción (LNV 11)”, perteneciente al Volumen N° 8 del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad.

Este procedimiento consiste en calentar el testigo de modo que éste pueda ser disgregado, luego se vierte en un recipiente y se mezcla con el solvente (tricloroetileno). Después de reposar por un período de 1 hr., la muestra es llevada a la centrífuga para separar la solución de tricloroetileno y asfalto de los áridos gruesos. La solución obtenida en este proceso aún contiene áridos finos.

Debido a que la cantidad de asfalto que se requiere para efectuar los ensayos es de 75 g a 100 g, se escogen los 2 testigos contiguos de mayor masa combinada, es decir, los testigos 2C1 y 3C1.

M.2. Recuperación de asfalto (LNV 43).

La recuperación del asfalto desde la solución de asfalto y tricloroetileno se realiza de acuerdo al método 8.302.34 “Asfaltos: Método Abson para la recuperación de asfalto (LNV 43)”, perteneciente al Volumen N° 8 del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad.

Este procedimiento consiste en centrifugar la solución hasta que no se encuentren residuos de áridos finos en los tubos centrífugos y, luego, destilar la solución. Cuando se obtienen 200 ml de solución en el proceso de destilación, se mide la temperatura de ésta en forma continua, de modo que al alcanzar los 135 °C se le añade CO₂ a una tasa baja. Cuando la temperatura de la solución alcanza los 158,5 ± 1,5 °C, se aumenta el flujo de CO₂ y se mantiene constante a una temperatura de 160 °C a 166 °C por 15 minutos. El residuo que queda en el matraz corresponde al asfalto recuperado.

ANEXO N: DETERMINACIÓN DE LA PENETRACIÓN

La determinación de la Penetración se realiza de acuerdo al método 8.302.3 “Asfaltos: Método de ensaye de penetración (LNV 34)”, perteneciente al Volumen N° 8 del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad.

La muestra se coloca en un baño de agua a 25 °C durante 1 hr a 1,5 hrs. Luego se le aplica una carga de 100 g, a una temperatura de 25 °C, a través de una aguja normal que penetra verticalmente dentro de la muestra durante 5 s.

Los resultados de este ensaye se presentan en la siguiente tabla:

Tabla N-1: “Penetración”

Asfalto	Penetración (0,1 mm)	
	Medida	Promedio
Original (*)	54	54
Recuperado	34	33
	32	
	32	

(*) Los resultados correspondientes al asfalto original provienen del Certificado de Ensaye N° 129 del Laboratorio Nacional de la Dirección de Vialidad.

ANEXO O: DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE ABLANDAMIENTO

La determinación del Punto de Ablandamiento se realiza se acuerdo al método 8.302.16 “Asfaltos: Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de Anillo y Bola (LNV 48)”, perteneciente al Volumen N° 8 del Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad.

Se calienta la muestra hasta que esté fluida y se vierte en dos anillos. Después de enfriarse por a lo menos 30 minutos, los anillos con las muestras se colocan en el soporte y se introducen en un baño de agua. Luego se ponen las guías y las bolas sobre los anillos. La temperatura del baño se mantiene a 5 °C durante 15 minutos, posteriormente se aplica calor de tal manera que la temperatura del líquido aumente con una velocidad uniforme de 5 °C por minuto.

Finalmente, se registra para cada anillo y bola la temperatura a la cual la muestra que rodea la bola toca la placa inferior del soporte; el Punto de Ablandamiento corresponde a la media aritmética de los valores registrados.

En la siguiente tabla se muestran los resultados.

Tabla O-1: “Punto de Ablandamiento”

Asfalto	Punto de Ablandamiento (°C)	
	Medida	Promedio
Original (*)	53	53
Recuperado	60	60
	60	

(*) Los resultados correspondientes al asfalto original provienen del Certificado de Ensaye N° 129 del Laboratorio Nacional de la Dirección de Vialidad.

ANEXO P: DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD TEÓRICO

El módulo de elasticidad se estima mediante los gráficos y fórmulas establecidos por el *Asphalt Institute* y por *Shell*.

P.1. *Asphalt Institute*

Este método contempla la utilización de fórmulas para determinar el módulo de elasticidad de las mezclas asfálticas de Carpeta de Rodadura y Binder. Estas fórmulas están basadas en la frecuencia de carga, la temperatura, la fracción en peso de material granular que pasa la malla ASTM N° 200, el volumen de huecos de la mezcla, la viscosidad del asfalto original a 21 °C (70 °F) y el volumen de asfalto original presente en la mezcla.

Las fórmulas son las siguientes:

$$E = 100.000 \cdot 10^{\beta_1} \quad (\text{Fórmula P-1})$$

$$\beta_1 = \beta_3 + 0,000005 \cdot \beta_2 - 0,00189 \cdot \beta_2 \cdot f^{-1,1} \quad (\text{Fórmula P-2})$$

$$\beta_2 = \beta_4^{0,5} \cdot T^{\beta_5} \quad (\text{Fórmula P-3})$$

$$\beta_3 = 0,553833 + 0,028829 \cdot P_{200} \cdot f^{-0,1703} - 0,03476 \cdot V_v + 0,070377 \cdot \lambda + 0,931757 \cdot f^{-0,02774} \quad (\text{Fórmula P-4})$$

$$\beta_4 = 0,483 \cdot V_b \quad (\text{Fórmula P-5})$$

$$\beta_5 = 1,3 + 0,49825 \cdot \log f \quad (\text{Fórmula P-6})$$

Donde:

E es el módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica (psi).

f es la frecuencia de carga (Hz).

T es la temperatura (°C).

P_{200} es la fracción de material granular que pasa la malla ASTM N° 200 (%).

V_v es el volumen de vacíos presentes en la mezcla (%).

λ es la viscosidad del asfalto original a 21 °C (70 °F) (10^6 poise).

V_b es el volumen de asfalto original presente en la mezcla (%).

La viscosidad a 21 °C (70 °F) se puede estimar mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda = 29.508,2 \cdot P_{25^{\circ}\text{C}}^{-2,1939} \quad (\text{Fórmula P-7})$$

Donde:

$P_{25^{\circ}\text{C}}$ es la penetración a 25 °C (77 °F) (0,1 mm).

En las siguientes tablas se muestran los parámetros utilizados.

Tabla P-1: “Datos para estimar el módulo de elasticidad de la mezcla de Carpeta de Rodadura y Binder”

Parámetro	Carpeta de Rodadura	Binder
Frecuencia de Carga (Hz)	8	8
Temperatura de Operación (°C (°F))	19 (66,2)	19 (66,2)
Fracción Bajo N° 200 (%)	6,7	5
Volumen de Vacíos (%)	4,9	5,9
Volumen de Asfalto (%)	13,3	12,3
Penetración a 25 °C (77 °F) (0,1 mm)	54	54

La frecuencia de carga que se utiliza es de 8 Hz pues representa a las cargas que ocurren en la práctica y que equivalen a un vehículo desplazándose a una velocidad de 48 Km/hr a 64 Km/hr (30 mph a 40 mph).

En la siguiente tabla se presentan los valores obtenidos para el Módulo de Elasticidad de la Carpeta de Rodadura y del Binder.

Tabla P-2: “Módulo de Elasticidad de la carpeta de rodadura y del binder”

Parámetro	Módulo de Elasticidad (MPa)
Carpeta de Rodadura	6.887
Binder	6.263

P.2. *Shell*.

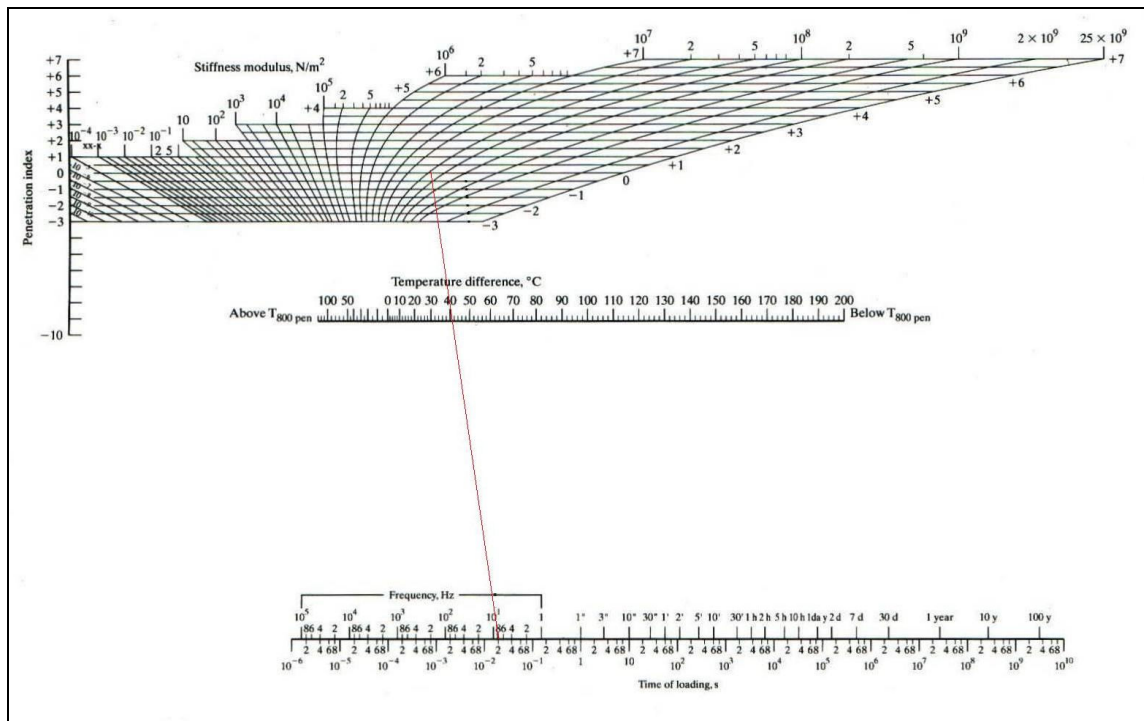
Este método se puede llevar a cabo de tres maneras: mediante la utilización del programa computacional BANDS 2.0 desarrollado en 1998 por *Shell International Oil Products BV*, mediante la utilización de dos gráficos o mediante el uso de fórmulas.

El primer gráfico es usado para determinar el módulo de elasticidad del asfalto recuperado basado en la temperatura, el tiempo de carga y las características del asfalto recuperado de la mezcla. El segundo gráfico es usado para determinar el módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica basado en el módulo de elasticidad del asfalto recuperado, el porcentaje en volumen del asfalto y el porcentaje en volumen del agregado mineral presentes en la mezcla.

En forma alternativa a la utilización del segundo gráfico, este método plantea que el módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica se puede estimar mediante la aplicación de las siguientes fórmulas basadas en el módulo de elasticidad del asfalto recuperado, el porcentaje en volumen del asfalto y el porcentaje en volumen del agregado mineral presentes en la mezcla.

El gráfico que se utiliza para determinar el módulo de elasticidad del asfalto es el siguiente:

Gráfico P-1: “Módulo de elasticidad del asfalto recuperado”



Las características del asfalto se expresan a través del Índice de Penetración, definido de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (\text{Fórmula P-8})$$

$$A = \frac{\log(P_{25^{\circ}C}) - \log(800)}{25 - T_{R\&B}}$$

(Fórmula P-9)

Donde:

PI es el índice de penetración.

A es la susceptibilidad térmica.

P_T es la penetración a la temperatura T (0,1 mm).

$T_{R\&B}$ es el punto de ablandamiento del asfalto ($^{\circ}C$).

En la siguiente tabla se muestran los parámetros utilizados.

Tabla P-3: “Datos para estimar el módulo de elasticidad del asfalto”

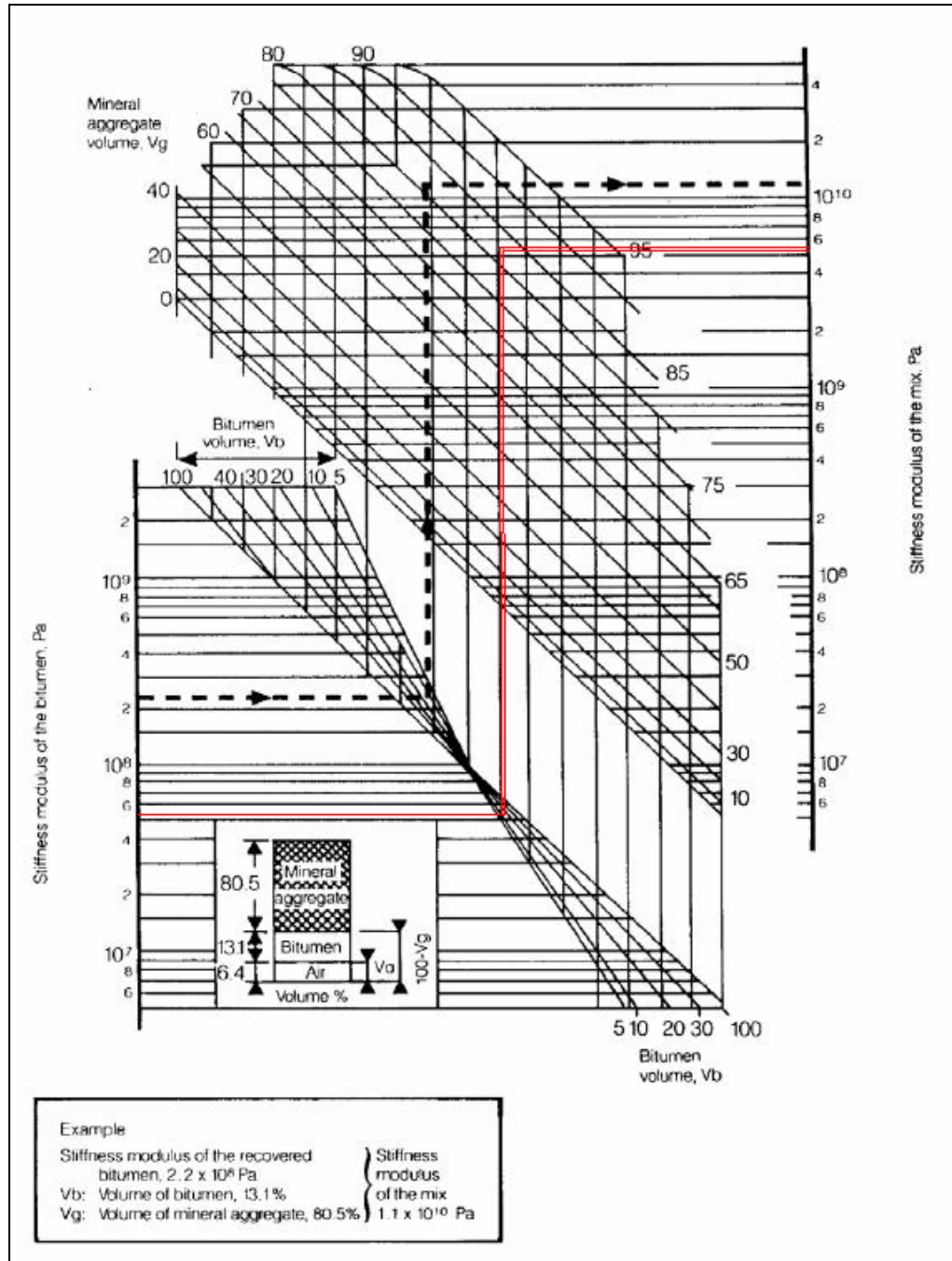
Parámetro	Valor	Unidad
Penetración a 25 $^{\circ}C$	33	0,1 mm
Punto de Ablandamiento	60	$^{\circ}C$
Tiempo de Carga	0,02	s

El tiempo de carga que se utiliza es de 0,02 s pues representa a las cargas que ocurren en la práctica y que equivalen a un vehículo desplazándose a una velocidad de 48 Km/hr a 64 Km/hr (30 mph a 40 mph).

El módulo de elasticidad del asfalto obtenido es 52.500.000 N/m², lo que equivale a 52,5 MPa.

El gráfico que se utiliza para determinar el Módulo de Elasticidad de las mezclas asfálticas de Carpeta de Rodadura y de Binder es la siguiente:

Gráfico P-2: “Módulo de elasticidad de las mezclas asfálticas de Carpeta de Rodadura y Binder”



Las fórmulas que se utilizan en forma alternativa al gráfico anterior, son las siguientes:

$$\beta_1 = 10,82 - \frac{1,342 \cdot (100 - V_g)}{V_g + V_b} \quad (\text{Fórmula P-10})$$

$$\beta_2 = 8 + 0,00568 \cdot V_g + 0,0002135 \cdot V_g^2 \quad (\text{Fórmula P-11})$$

$$\beta_3 = 0,6 \cdot \log\left(\frac{1,37 \cdot V_b^2 - 1}{1,33 \cdot V_b - 1}\right) \quad (\text{Fórmula P-12})$$

$$\beta_4 = 0,7582 \cdot (\beta_1 - \beta_2) \quad (\text{Fórmula P-13})$$

$$\log E = \frac{\beta_4 + \beta_3}{2} (\log E_b - 8) + \frac{\beta_4 - \beta_3}{2} |\log E_b - 8| + \beta_2 \quad (\text{Fórmula P-14})$$

Donde:

V_g es el volumen de agregado mineral (%).

V_b es el volumen de asfalto (%).

E_b es el módulo de elasticidad del asfalto (N/m²).

E es el módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica (N/m²).

En las siguientes tablas se muestran los parámetros utilizados.

Tabla P-4: “Datos para estimar el módulo de elasticidad de la mezcla de Carpeta de Rodadura y de Binder”

Parámetro	Carpeta de Rodadura	Binder
Volumen de Agregado Mineral (%)	81,8	81,8
Volumen de Asfalto (%)	13,3	12,3
Volumen de Vacíos (%)	4,9	5,9
Punto de Ablandamiento (°C)	60	60
Penetración a 25 °C (0,1 mm)	33	33
Módulo de Elasticidad Asfalto (N/m ²)	52.500.000	52.500.000

En la siguiente tabla se presentan los valores obtenidos para el Módulo de Elasticidad de la Carpeta de Rodadura y del Binder a través del programa computacional BANDS 2.0 y a través de las fórmulas.

Tabla P-5: “Módulo de Elasticidad de la carpeta de rodadura y del binder”

Parámetro	Módulo de Elasticidad (MPa)	
	BANDS 2.0	Fórmulas
Carpeta de Rodadura	5.030	4.993
Binder	5.090	5.056

ANEXO Q: DETERMINACIÓN DEL ERROR

En los casos correspondientes a la determinación del módulo de elasticidad de probetas y testigos mediante las prensas NAT y MTS, se determina el Coeficiente de Variación, el cual corresponde al cociente entre la desviación estándar de una muestra y su media aritmética.

En los casos correspondientes a la determinación del módulo de elasticidad mediante los procedimientos del *Asphalt Institute* y de *Shell* no se determina error alguno pues se determina sólo un valor para procedimiento.

En los procedimientos en que se determina el Módulo de Elasticidad en terreno, es decir, en los casos de la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), el *Washington State Department of Transportation* (WSDOT), la *Federal Highway Administration* (FHWA) y el programa computacional MODTAG, se determina el error cuadrático medio o RMS. En el caso del último, el RMS es calculado por el mismo programa y entregado como parte del resultado. En cada caso se determina un cuenco de deflexión de acuerdo a los resultados obtenidos y mediante la utilización del programa Everstress 5.0. El RMS se determina punto a punto de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$RMS_d = \left(\frac{\Delta_d^m - \Delta_d^c}{\Delta_d^m} \right)^2 \quad \text{(Fórmula Q-1)}$$

$$RMS_e = \sqrt{\frac{\sum RMS_d}{7}} \quad \text{(Fórmula Q-2)}$$

Donde:

RMS_d es el error cuadrático medio correspondiente a los módulos medidos a una distancia d de la aplicación de la carga.

Δ_d^m es la deflexión medida a la distancia d de la aplicación de la carga.

Δ_d^c es la deflexión calculada a la distancia d de la aplicación de la carga.

RMS_e es el error cuadrático medio correspondiente a la estación e .

El error cuadrático medio de cada procedimiento corresponde a la media aritmética de los errores cuadráticos medios de las estaciones.

En las siguientes tablas se presentan los valores de las deflexiones calculadas (las deflexiones medidas se encuentran en el Anexo B). D_i corresponde a la deflexión medida a i cm del punto de aplicación de la carga.

Tabla Q-1: “Deflexiones calculadas para AASHTO – Datos LNV”

Estación N°	Deflexiones (μm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
2	358	205	161	126	104	73	55
3	374	210	163	127	104	73	55
4	364	203	157	122	99	70	52
7	322	183	143	112	92	65	49
8	379	203	154	118	95	66	50
9	240	135	106	83	68	48	36
10	300	161	123	94	76	54	40
11	261	145	112	88	72	51	38

Tabla Q-2: “Deflexiones calculadas para WSDOT – Datos LNV”

Estación N°	Deflexiones (μm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
2	486	377	313	241	191	132	99
3	516	386	314	238	188	128	96
4	486	360	291	219	172	118	88
7	428	335	281	218	174	120	90
8	493	367	299	227	179	122	92
9	324	249	207	159	126	86	64
10	410	295	238	178	139	95	71
11	349	265	219	168	133	91	68

Tabla Q-3: “Deflexiones medidas y calculadas para FHWA – Datos LNV”

Estación N°	Deflexiones (μm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
2	397	304	253	198	160	113	85
3	372	261	210	161	130	91	69
4	413	302	247	191	154	108	82
7	367	286	241	190	154	109	82
8	421	311	256	198	160	113	85
9	273	206	171	134	109	77	58
10	299	202	162	125	101	71	54
11	296	221	183	144	117	83	63

Tabla Q-4: “Deflexiones medidas y calculadas para AASHTO – Datos Gauss-TH”

Estación N°	Deflexiones (μm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
1	325	174	132	101	81	56	42
2	297	162	124	96	78	54	41
3	304	168	129	100	82	57	43

Tabla Q-4: “Deflexiones medidas y calculadas para AASHTO – Datos Gauss-TH (continuación)”

Estación N°	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
4	329	179	137	106	86	60	45
5	278	150	114	87	71	49	37

Tabla Q-5: “Deflexiones medidas y calculadas para WSDOT – Datos Gauss-TH”

Estación N°	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
1	369	282	232	177	140	95	71
2	371	288	240	184	146	100	75
3	351	274	228	176	140	96	72
4	367	286	238	184	146	100	75
5	320	243	200	153	120	82	61

Tabla Q-6: “Deflexiones medidas y calculadas para FHWA – Datos Gauss-TH”

Estación N°	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
1	290	228	193	155	128	92	70
2	311	246	208	165	134	94	71
3	298	240	205	164	133	94	71
4	312	250	213	170	138	98	74
5	267	210	178	142	116	82	62

Tabla Q-7: “Deflexiones medidas y calculadas para AASHTO – Datos Gauss-TC”

Estación N°	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
1	342	188	145	112	91	64	48
2	290	161	124	96	78	55	41
3	307	166	127	97	78	55	41
4	250	139	107	83	67	47	35
5	290	166	130	102	83	59	44
6	307	169	130	101	82	57	43
7	284	161	125	98	80	56	42
8	226	139	113	91	76	55	42
9	316	181	142	111	91	65	48
10	355	200	155	121	99	70	52
11	232	131	102	80	65	46	34
12	333	178	134	102	82	57	43
13	333	180	137	105	85	59	44
14	283	154	117	90	73	51	38
15	301	167	129	101	82	57	43
16	349	177	130	97	77	53	39
17	264	146	113	87	71	50	37
18	271	147	112	86	69	48	36
19	327	180	138	106	86	60	45
20	343	190	147	114	93	65	49
21	254	146	115	90	74	53	39

Tabla Q-7: “Deflexiones medidas y calculadas para AASHTO – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
22	293	165	129	101	82	58	43
23	266	155	122	97	80	57	43
24	312	178	139	109	89	63	47
25	343	189	145	112	91	64	48
26	265	141	106	81	65	45	34
27	267	147	113	87	71	50	37
28	287	165	130	103	84	60	45
29	310	195	160	131	110	80	61
30	332	187	146	114	93	65	49
31	325	174	131	100	81	56	42
32	297	162	124	95	77	54	40
33	300	167	128	100	81	57	42
34	328	179	137	106	85	60	45
35	276	149	113	87	70	49	37
36	289	157	120	92	74	52	39
37	339	186	143	111	90	63	47
38	312	170	130	100	81	56	42
39	359	193	146	112	90	63	47
40	310	171	132	102	83	58	43
41	346	188	143	110	89	62	46
42	352	194	149	115	93	65	49
43	344	189	145	112	91	64	48
44	320	184	145	114	94	66	50
45	342	186	142	110	89	62	46
46	321	186	147	116	95	68	51
47	269	154	121	95	78	55	41
48	227	129	101	79	65	46	34
49	187	103	79	61	49	35	26
50	250	146	115	91	75	53	40
51	282	176	144	117	98	71	54
52	350	198	154	120	98	69	52
53	273	152	118	92	75	52	39
54	246	153	125	101	85	61	46
55	360	209	165	131	108	76	57
56	266	163	133	107	90	65	49
57	282	168	134	108	89	64	48
58	265	152	120	94	77	55	41
59	279	155	120	93	76	53	40
60	270	160	127	101	84	60	45
61	240	145	117	95	79	57	43
62	245	152	124	101	85	62	47
63	203	118	94	74	61	44	33
64	231	134	106	84	69	49	37
65	300	180	144	116	96	69	52
66	259	153	122	97	80	57	43
67	245	149	121	97	81	58	44
68	201	121	98	79	65	47	35
69	244	140	110	86	71	50	38

Tabla Q-7: “Deflexiones medidas y calculadas para AASHTO – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
70	258	145	112	87	71	50	37
71	242	143	114	90	75	53	40
72	242	135	105	82	66	47	35
73	236	136	107	85	70	49	37
74	306	177	139	110	90	64	48
75	319	188	150	119	99	70	53
76	282	164	129	102	84	60	45
77	392	201	148	111	88	61	45
78	262	146	113	88	71	50	37
79	252	157	129	105	88	64	48
80	287	163	127	99	81	57	43
81	272	155	121	95	78	55	41
82	271	171	140	115	96	70	53
83	210	127	103	83	69	49	37
84	292	186	153	126	106	78	59
85	294	167	130	102	84	59	44
86	263	165	136	111	93	68	51
87	284	170	136	109	90	65	49
88	244	143	113	90	74	53	39
89	240	148	121	98	82	59	45
90	287	157	120	92	75	52	39
91	289	167	132	104	85	61	45
92	314	178	139	109	89	63	47
93	361	199	153	118	96	67	50
94	278	156	121	94	77	54	40
95	274	156	122	96	79	56	42
96	273	157	124	97	80	57	42
97	244	132	101	77	62	43	32
98	299	158	118	89	72	50	37
99	225	128	100	78	64	45	34
100	301	167	129	100	82	57	43
101	269	150	116	90	73	52	39
102	290	164	128	100	81	57	43
103	285	157	121	94	76	53	40
104	277	157	123	97	79	56	42
105	406	207	152	113	90	62	46
106	345	189	145	112	91	64	48
107	303	183	147	118	98	71	53
108	313	181	143	113	92	66	49
109	300	174	137	108	89	63	47
110	299	173	137	108	89	63	47
111	279	159	124	98	80	56	42
112	273	156	122	96	79	56	42
113	240	140	111	88	73	52	39
114	252	152	123	99	82	59	45
115	240	151	124	102	85	62	47
116	296	182	148	119	100	72	54
117	308	190	155	126	105	76	57

Tabla Q-7: “Deflexiones medidas y calculadas para AASHTO – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación Nº	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
118	259	158	128	104	86	62	47
119	260	153	121	96	79	57	43
120	247	148	119	95	79	57	43
121	245	146	116	93	77	55	41
122	265	168	138	113	95	69	53
123	256	145	113	88	72	51	38
124	234	133	104	81	66	47	35
125	217	123	96	76	62	44	33
126	197	113	88	70	57	40	30
127	229	137	110	88	73	53	40
128	238	134	104	81	66	47	35
129	249	153	124	101	84	61	46
130	241	143	115	92	76	54	41
131	331	178	135	103	83	58	43
132	274	159	126	99	82	58	44
133	258	145	113	88	72	51	38
134	319	190	152	122	101	72	54
135	340	191	148	115	94	66	50

Tabla Q-8: “Deflexiones medidas y calculadas para WSDOT – Datos Gauss-TC”

Estación Nº	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
1	393	306	254	195	155	106	79
2	348	277	233	182	145	100	75
3	364	287	241	187	149	102	76
4	298	229	189	144	113	77	57
5	350	285	243	193	155	108	80
6	369	294	247	193	154	106	79
7	348	281	238	187	150	104	77
8	281	237	206	167	137	96	72
9	381	309	264	208	168	116	87
10	409	332	283	224	181	126	94
11	282	226	190	148	118	81	60
12	392	306	255	197	156	107	80
13	374	289	239	183	145	99	74
14	325	248	203	154	121	82	61
15	340	268	224	173	138	94	70
16	410	290	229	168	131	88	66
17	304	239	199	154	122	83	62
18	335	260	215	164	130	88	66
19	386	296	244	187	147	101	75
20	393	308	257	199	158	108	81
21	318	256	216	170	136	93	70
22	361	288	243	189	151	104	78
23	328	267	227	179	144	100	74
24	372	303	259	205	165	115	86
25	415	330	277	217	173	119	89

Tabla Q-8: “Deflexiones medidas y calculadas para WSDOT – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
26	323	249	206	157	124	85	63
27	321	245	202	153	120	82	61
28	354	287	244	193	155	107	80
29	383	327	289	238	197	141	106
30	392	315	267	210	168	116	87
31	367	281	231	176	139	95	71
32	369	286	238	182	144	99	74
33	354	275	228	175	138	94	71
34	375	290	240	184	145	99	74
35	328	248	202	152	119	81	60
36	347	262	214	161	126	86	64
37	411	313	257	195	154	105	79
38	382	298	248	192	152	104	78
39	398	279	219	160	123	83	62
40	381	300	252	195	155	107	80
41	412	322	268	207	165	113	85
42	420	321	264	202	159	109	81
43	419	327	272	210	167	115	86
44	391	317	270	213	172	119	89
45	415	327	275	214	171	118	88
46	395	321	274	217	175	122	91
47	329	263	222	174	139	96	71
48	287	229	192	150	119	81	61
49	247	189	155	118	92	62	46
50	313	256	219	174	140	97	73
51	358	302	264	215	177	125	94
52	393	276	216	158	122	83	62
53	335	267	225	176	140	97	72
54	312	263	230	188	154	108	81
55	412	303	244	182	142	97	72
56	341	284	246	199	162	113	85
57	360	295	253	201	163	113	84
58	339	272	230	180	144	99	74
59	361	281	234	180	143	98	73
60	351	286	244	194	156	108	81
61	317	261	225	180	146	101	76
62	316	266	233	189	155	109	82
63	265	215	182	143	115	79	59
64	303	244	207	163	130	90	67
65	381	315	272	218	178	124	93
66	334	273	233	185	149	103	77
67	317	263	228	183	149	104	77
68	272	219	186	145	116	80	59
69	312	251	212	166	133	92	68
70	326	257	215	166	132	90	67
71	316	257	219	173	139	96	72
72	311	243	202	156	123	84	63
73	307	245	206	160	128	88	65

Tabla Q-8: “Deflexiones medidas y calculadas para WSDOT – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
74	384	271	214	156	121	82	61
75	429	343	290	228	183	127	95
76	366	293	248	194	156	107	80
77	495	342	267	195	152	103	77
78	348	260	210	158	123	84	62
79	339	280	241	193	156	109	81
80	376	296	247	192	152	105	78
81	355	280	235	182	145	100	74
82	360	303	264	214	176	124	93
83	282	231	198	158	127	88	66
84	395	334	293	240	198	140	105
85	382	304	256	199	159	110	82
86	353	297	259	210	173	121	91
87	374	306	262	208	168	117	88
88	325	261	220	173	138	95	71
89	333	272	233	185	149	103	77
90	366	281	232	177	140	95	71
91	409	314	259	198	157	107	80
92	412	324	271	210	167	115	86
93	458	345	282	213	168	115	86
94	366	282	233	178	140	96	71
95	370	288	240	184	146	100	75
96	374	293	245	189	150	103	77
97	331	249	203	153	120	81	60
98	395	295	239	180	141	96	72
99	310	239	197	151	119	81	60
100	405	308	253	192	151	103	77
101	378	288	237	180	142	97	72
102	389	303	252	195	155	106	79
103	379	290	239	182	143	98	73
104	373	294	246	190	152	104	78
105	510	349	272	198	154	105	78
106	467	350	285	216	170	116	87
107	419	339	289	228	184	128	96
108	437	342	285	220	175	121	90
109	418	327	273	211	168	116	86
110	400	319	269	210	168	116	87
111	376	295	246	190	151	104	77
112	377	294	244	188	149	102	76
113	335	267	224	175	139	96	71
114	358	289	246	193	155	107	80
115	351	290	249	199	162	113	84
116	411	338	291	233	189	132	99
117	412	343	297	240	196	138	103
118	366	297	253	200	161	112	84
119	363	289	243	190	151	104	78
120	349	280	236	185	148	102	76
121	345	276	233	182	145	100	75

Tabla Q-8: “Deflexiones medidas y calculadas para WSDOT – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación Nº	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
122	379	314	271	218	177	124	93
123	341	265	219	168	133	91	68
124	343	259	211	159	125	85	63
125	297	231	192	147	116	79	59
126	282	214	174	132	103	70	52
127	327	262	221	173	138	95	71
128	338	253	205	154	121	82	61
129	357	289	246	194	156	108	81
130	344	275	231	181	144	99	74
131	447	338	276	210	166	113	85
132	388	303	253	195	155	106	79
133	366	279	229	174	137	94	70
134	454	360	303	237	190	131	98
135	468	360	297	227	180	124	92

Tabla Q-9: “Deflexiones medidas y calculadas para FHWA – Datos Gauss-TC”

Estación Nº	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
1	336	269	228	181	147	104	78
2	292	236	202	161	131	93	70
3	309	252	216	173	141	100	75
4	247	199	170	135	110	78	59
5	296	247	214	174	143	102	77
6	309	253	217	174	143	101	76
7	293	241	207	167	136	97	73
8	233	195	169	138	113	81	61
9	322	264	228	183	150	106	80
10	348	286	247	199	163	115	87
11	228	181	153	121	98	69	52
12	335	271	231	185	151	106	80
13	314	250	212	168	137	96	73
14	274	221	189	150	122	86	65
15	288	236	203	163	134	95	71
16	316	227	184	141	114	80	60
17	250	202	172	137	112	79	60
18	283	225	190	151	122	86	65
19	326	255	214	168	136	96	73
20	336	270	229	182	148	105	79
21	264	214	184	147	120	85	64
22	305	246	209	167	136	96	72
23	276	225	194	155	127	90	68
24	318	264	229	185	152	108	81
25	352	288	247	198	162	115	87
26	268	214	181	143	116	82	62
27	268	214	182	144	117	83	62
28	297	242	207	166	136	96	72
29	338	288	254	209	174	124	94

Tabla Q-9: “Deflexiones medidas y calculadas para FHWA – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
30	335	270	230	183	149	106	80
31	310	244	205	161	131	92	70
32	311	247	208	165	134	94	71
33	301	242	206	164	134	94	71
34	316	253	215	171	139	98	74
35	274	216	182	143	116	82	62
36	288	227	191	150	122	86	65
37	346	265	220	172	139	98	74
38	323	259	220	175	142	101	76
39	380	319	278	227	187	133	100
40	323	260	221	176	143	101	76
41	352	282	239	190	154	109	82
42	360	285	241	190	154	109	82
43	358	282	238	188	152	107	81
44	332	271	232	186	152	108	81
45	356	293	253	204	167	118	89
46	340	277	238	191	156	110	83
47	274	218	185	146	119	84	63
48	238	191	162	129	105	74	56
49	198	155	130	102	83	58	44
50	263	220	191	155	128	91	69
51	310	263	230	189	156	111	84
52	386	320	278	225	185	131	99
53	281	230	198	159	130	92	69
54	261	223	197	163	135	97	73
55	396	343	305	254	213	153	116
56	298	248	215	174	143	101	77
57	308	255	221	179	147	104	78
58	284	230	197	157	128	90	68
59	304	241	204	162	131	93	70
60	300	249	216	175	144	102	77
61	270	225	196	159	131	93	70
62	268	228	201	166	137	98	74
63	219	182	158	128	105	75	56
64	253	209	180	145	119	84	64
65	322	272	238	195	161	115	86
66	281	231	200	161	132	93	70
67	272	228	199	162	133	95	72
68	223	179	152	121	98	70	52
69	262	217	187	151	124	88	66
70	277	227	195	157	128	91	69
71	264	219	190	154	126	90	68
72	259	208	177	141	115	81	61
73	255	207	178	142	116	82	62
74	363	307	269	220	182	130	98
75	372	297	252	200	163	115	87
76	306	244	207	164	133	94	71
77	365	246	195	149	120	84	64

Tabla Q-9: “Deflexiones medidas y calculadas para FHWA – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
78	288	220	182	142	115	81	61
79	296	243	210	169	138	98	74
80	317	255	217	172	140	99	75
81	296	236	201	159	130	91	69
82	311	263	231	189	156	112	84
83	236	197	171	139	114	81	61
84	340	291	257	213	177	127	96
85	326	267	229	184	150	106	80
86	298	254	224	185	153	110	83
87	324	268	232	188	154	109	82
88	274	224	192	154	126	89	67
89	275	224	192	154	126	89	67
90	310	243	204	161	130	92	69
91	346	262	217	169	136	96	73
92	350	280	238	189	153	108	82
93	382	282	231	179	144	101	77
94	305	238	199	157	127	89	67
95	312	249	211	167	135	96	72
96	318	256	218	173	141	100	75
97	273	217	184	145	118	83	63
98	336	266	225	178	144	102	77
99	255	202	170	134	109	77	58
100	341	264	221	173	140	99	75
101	318	252	213	168	137	96	73
102	330	262	222	176	143	101	76
103	319	249	209	164	133	94	71
104	320	261	223	179	146	103	78
105	379	255	202	154	124	87	66
106	401	301	249	193	156	110	83
107	360	295	253	203	166	117	89
108	376	298	252	199	162	114	86
109	357	286	244	194	158	111	84
110	341	279	240	193	158	112	84
111	317	256	218	174	141	100	75
112	317	254	216	171	139	98	74
113	281	231	199	160	131	93	70
114	307	253	218	176	144	102	77
115	299	250	217	176	145	103	78
116	352	295	258	210	173	123	93
117	356	300	262	214	177	126	95
118	313	258	222	179	147	104	78
119	302	248	213	171	140	99	75
120	295	240	205	164	134	95	72
121	289	236	202	162	132	94	71
122	327	273	237	193	158	113	85
123	282	221	186	146	118	84	63
124	284	217	180	141	114	80	60
125	244	195	166	132	107	76	57

Tabla Q-9: “Deflexiones medidas y calculadas para FHWA – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	Deflexiones (µm)						
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120
126	228	174	145	113	91	64	48
127	270	220	189	151	123	87	66
128	278	208	171	133	107	76	57
129	298	244	210	168	138	97	74
130	286	234	202	162	133	94	71
131	386	309	262	208	169	119	90
132	328	262	222	176	143	101	76
133	303	238	200	157	127	90	68
134	391	314	268	213	173	122	92
135	403	322	274	217	177	125	94

En las siguientes tablas se muestra el error cuadrático medio calculado en las distancias indicadas anteriormente.

Tabla Q-10: “Error Cuadrático Medio para AASHTO – Datos LNV”

Estación N°	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
2	0,0	0,9	0,6	0,0	2,8	48,7	124,4	50,3
3	0,0	0,3	0,5	0,2	2,8	48,7	124,4	50,3
4	0,0	0,0	0,3	0,6	6,4	56,3	136,1	53,4
7	0,0	1,4	2,2	0,1	2,7	44,4	127,8	50,5
8	0,0	0,5	1,3	0,0	3,0	42,3	100,0	45,8
9	0,0	0,8	1,2	0,0	1,8	13,8	19,4	23,0
10	0,1	0,1	0,0	0,1	1,8	12,3	11,1	19,1
11	0,0	0,5	1,6	0,0	2,0	29,8	52,9	35,2

Tabla Q-11: “Error Cuadrático Medio para WSDOT – Datos LNV”

Estación N°	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
2	14,2	44,6	63,8	83,3	131,3	428,4	788,3	149,0
3	15,6	86,5	113,6	93,5	123,7	390,8	724,9	148,7
4	12,3	64,0	56,7	88,0	138,6	380,3	711,1	144,0
7	11,7	37,3	45,2	77,3	144,6	431,4	848,6	151,0
8	9,5	45,7	51,6	82,4	146,4	420,3	718,2	145,1
9	11,1	46,6	54,7	83,8	121,0	212,3	243,4	105,1
10	11,3	79,4	84,5	91,4	115,5	189,1	186,8	104,1
11	10,7	48,8	50,5	82,6	123,5	308,9	437,2	123,2

Tabla Q-12: “Error Cuadrático Medio para FHWA – Datos LNV”

Estación N°	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
2	1,6	11,9	20,6	32,7	63,6	265,0	514,9	114,0
3	0,0	9,3	14,6	10,9	21,2	124,6	273,5	80,5

Tabla Q-12: “Error Cuadrático Medio para FHWA – Datos LNV (continuación)”

Estación Nº	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
4	2,2	26,0	23,8	47,6	90,1	289,0	584,0	123,2
7	2,3	14,1	18,9	40,7	90,1	322,2	658,0	128,0
8	1,4	17,6	22,2	44,1	95,1	333,1	576,0	124,8
9	1,5	15,4	19,1	37,8	66,7	144,0	174,2	80,9
10	0,1	8,7	9,4	14,0	25,8	60,1	64,0	51,0
11	1,6	17,4	18,5	40,5	73,5	229,6	347,3	102,0

Tabla Q-13: “Error Cuadrático Medio para MODTAG – Datos LNV”

Estación Nº	2	3	4	7	8	9	10	11
RMS (%)	3,4	6,6	5,0	1,0	4,2	2,2	4,3	4,4

Tabla Q-14: “Error Cuadrático Medio para AASHTO – Datos Gauss-TH”

Estación Nº	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
1	3,2	0,5	0,6	0,7	6,1	22,4	56,3	35,8
2	0,7	1,9	2,3	0,0	2,7	25,0	61,2	36,6
3	2,2	1,1	1,2	0,4	7,9	61,0	109,8	51,2
4	2,8	1,1	0,9	0,5	8,0	51,0	109,3	49,8
5	1,7	1,3	1,0	0,5	9,9	40,1	58,0	40,1

Tabla Q-15: “Error Cuadrático Medio para WSDOT – Datos Gauss-TH”

Estación Nº	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
1	11,4	25,8	38,7	81,6	133,1	225,0	383,5	113,3
2	12,5	28,3	41,5	77,0	139,0	316,0	511,2	126,8
3	10,5	20,9	32,8	76,1	141,0	400,0	589,8	134,8
4	9,1	18,5	33,2	73,7	139,0	344,9	580,4	130,9
5	9,0	19,2	33,0	79,0	149,4	300,4	362,8	116,7

Tabla Q-16: “Error Cuadrático Medio para FHWA – Datos Gauss-TH”

Estación Nº	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
1	0,3	4,8	12,2	44,4	93,9	201,9	367,4	101,8
2	1,8	9,5	18,0	46,7	100,0	259,6	435,5	111,6
3	1,6	7,7	17,1	55,5	116,2	375,4	566,9	127,6
4	1,1	6,3	16,9	51,4	112,3	324,0	558,7	123,7
5	0,7	5,9	16,1	56,7	131,8	300,4	381,2	112,9

Tabla Q-17: “Error Cuadrático Medio para MODTAG – Datos Gauss-TH”

Estación Nº	1	3	3	4	5
RMS (%)	1,4	1,9	2,1	1,3	3,5

Tabla Q-18: “Error Cuadrático Medio para AASHTO – Datos Gauss-TC”

Estación Nº	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
1	2,4	0,8	0,9	0,4	7,0	46,8	60,5	41,2
2	1,9	1,4	1,8	0,0	2,2	23,7	33,3	30,3
3	1,9	2,3	2,9	0,2	2,2	38,1	90,7	44,5
4	1,9	1,4	1,2	0,4	9,8	65,2	141,0	56,2
5	1,8	2,1	2,6	0,1	1,9	40,8	144,0	52,5
6	1,6	2,5	2,6	0,1	2,4	34,0	75,6	41,2
7	1,5	1,8	2,2	0,2	2,0	48,6	121,0	50,3
8	2,3	0,4	0,4	0,0	1,4	11,7	46,2	29,9
9	1,7	1,6	1,5	0,0	1,9	22,8	42,9	32,2
10	3,2	1,0	1,4	0,0	2,3	23,9	62,9	36,8
11	2,6	0,2	0,2	0,1	2,0	12,5	29,8	26,0
12	1,8	2,4	3,3	0,2	2,4	45,8	109,8	48,7
13	3,4	0,7	0,6	0,5	7,2	40,8	69,4	41,9
14	2,4	1,6	1,4	0,5	12,4	79,0	152,6	59,8
15	3,8	1,0	1,2	0,4	10,4	81,0	159,6	60,6
16	1,6	0,0	0,1	1,0	8,0	50,4	59,7	41,6
17	3,6	0,5	0,5	0,4	6,0	37,6	46,5	36,9
18	0,9	2,0	2,5	0,1	2,3	25,0	31,9	30,4
19	1,9	0,3	0,5	0,4	7,0	58,5	64,0	43,5
20	2,9	0,5	0,8	0,3	7,5	50,5	66,4	42,9
21	1,0	1,6	1,3	0,0	1,9	18,7	19,8	25,1
22	1,0	1,6	1,6	0,0	1,9	17,2	23,3	25,8
23	1,4	1,1	1,2	0,0	2,0	12,8	15,0	21,9
24	2,0	1,7	2,2	0,1	2,0	25,0	54,9	35,4
25	1,1	2,9	3,1	0,3	2,3	53,3	165,3	57,1
26	1,4	2,1	2,7	0,2	2,6	30,4	29,8	31,5
27	1,4	1,7	1,4	0,4	8,5	61,7	89,8	48,5
28	1,4	1,3	1,3	0,0	1,8	25,0	36,9	31,1
29	2,1	0,5	0,6	0,0	1,2	18,4	48,2	31,9
30	2,2	0,7	1,0	0,0	2,2	14,7	40,1	29,5
31	3,2	0,5	0,7	0,6	6,1	22,4	56,3	35,8
32	0,7	1,9	2,3	0,1	2,2	25,0	54,6	35,2
33	1,7	1,2	1,4	0,4	7,1	61,0	100,0	49,7
34	2,7	1,1	0,9	0,5	7,2	51,0	109,3	49,7
35	1,5	1,4	1,2	0,5	8,8	40,1	58,0	39,9
36	1,1	1,6	1,0	0,5	7,6	39,1	48,4	37,6
37	1,2	0,2	0,3	0,5	7,2	49,4	182,3	58,7
38	0,9	2,4	2,6	0,1	2,5	26,4	100,0	43,9
39	1,6	4,2	6,5	4,0	1,0	4,5	32,1	27,7
40	1,1	1,7	2,2	0,1	2,3	49,8	132,3	52,0
41	1,3	1,8	2,2	0,0	2,4	22,7	28,4	29,0
42	0,9	1,6	1,3	0,4	6,6	30,0	33,7	32,6
43	0,8	1,3	1,6	0,0	2,3	23,9	71,6	38,1
44	1,2	1,4	1,5	0,0	2,1	14,1	52,4	32,2
45	0,8	4,3	4,6	0,5	2,4	67,8	141,7	56,3
46	1,1	1,2	1,6	0,0	1,7	26,1	29,8	29,6
47	1,6	0,4	0,4	0,2	2,2	9,6	7,9	17,8
48	0,9	1,2	1,3	0,0	2,0	9,9	17,4	21,6

Tabla Q-18: “Error Cuadrático Medio para AASHTO – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
49	0,3	2,0	1,5	0,0	1,9	6,3	5,7	15,9
50	1,1	2,3	2,6	0,2	1,9	18,7	66,9	36,6
51	1,0	1,2	0,9	0,0	1,3	11,5	55,0	31,9
52	1,4	1,9	3,8	1,9	0,2	4,4	11,1	18,8
53	1,2	2,6	2,7	0,2	2,4	33,1	73,5	40,6
54	1,3	1,6	1,7	0,0	1,4	23,8	70,6	37,9
55	1,0	4,2	6,4	3,7	0,9	4,3	39,5	29,2
56	0,9	0,8	1,0	0,0	1,6	12,5	19,5	22,8
57	0,6	1,9	2,0	0,0	1,6	31,5	71,6	39,5
58	0,6	1,9	1,9	0,1	1,8	38,1	110,3	47,0
59	0,2	2,5	2,6	0,2	2,3	43,1	122,2	49,7
60	0,3	2,8	3,1	0,2	1,8	38,6	76,6	42,0
61	0,4	2,2	2,1	0,1	1,7	29,2	51,8	35,4
62	0,9	1,7	1,9	0,1	1,4	16,7	46,0	31,4
63	0,5	3,3	2,8	0,2	1,7	26,8	69,4	38,7
64	0,4	2,8	3,0	0,2	1,7	33,7	89,8	43,3
65	0,6	2,8	2,7	0,2	1,7	32,3	136,1	50,2
66	0,6	2,0	2,0	0,1	1,6	25,0	75,6	39,1
67	0,7	1,7	1,7	0,1	1,6	17,2	47,9	31,8
68	0,1	1,2	0,7	0,3	1,5	7,3	12,0	18,2
69	0,5	3,3	3,2	0,2	2,1	18,4	21,3	26,4
70	0,3	3,8	3,8	0,1	2,1	15,1	23,0	26,2
71	0,3	3,0	2,6	0,2	1,9	12,9	54,6	32,8
72	0,3	3,1	2,6	0,0	1,9	9,3	21,0	23,4
73	0,3	2,7	2,3	0,0	2,2	16,0	23,0	25,8
74	0,0	6,3	7,6	3,9	1,0	4,3	20,7	25,0
75	0,0	1,7	2,2	0,1	1,9	30,9	68,5	38,8
76	0,4	1,2	1,2	0,0	1,8	18,4	36,9	29,2
77	0,2	0,9	0,0	1,0	5,7	42,1	64,0	40,3
78	0,0	1,0	0,9	0,4	6,0	44,4	58,0	39,8
79	0,1	1,3	1,1	0,1	1,3	6,5	6,9	15,7
80	0,1	2,8	2,9	0,2	2,0	45,8	132,3	51,5
81	0,2	2,3	2,0	0,1	2,2	20,0	50,2	33,2
82	0,3	2,0	1,8	0,1	1,1	18,4	68,5	36,3
83	0,3	2,5	2,2	0,1	1,7	28,2	89,8	42,2
84	0,1	2,6	2,8	0,4	1,1	43,5	140,5	52,2
85	0,2	3,7	4,1	0,4	2,3	54,1	100,0	48,5
86	0,2	2,9	2,7	0,2	1,1	43,4	240,3	64,5
87	0,2	2,5	2,9	0,2	1,6	26,2	127,8	48,0
88	0,1	2,8	2,9	0,1	1,9	26,4	73,5	39,2
89	0,0	2,1	1,2	0,0	1,5	13,8	25,0	25,0
90	0,2	2,2	2,4	0,0	2,4	11,1	11,9	20,8
91	0,2	1,1	1,2	0,0	1,8	10,6	10,5	19,1
92	0,0	3,2	2,8	0,1	2,0	13,7	11,8	21,9
93	0,3	0,0	0,0	0,4	3,4	13,5	18,4	22,7
94	0,0	2,0	1,5	0,0	2,2	10,1	23,2	23,6
95	0,0	3,7	3,1	0,0	2,1	16,0	25,0	26,7
96	0,0	4,0	3,6	0,2	2,0	34,0	82,6	42,5

Tabla Q-18: “Error Cuadrático Medio para AASHTO – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación Nº	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
97	0,0	6,3	4,7	0,4	2,2	28,7	60,5	38,3
98	0,0	6,5	6,2	0,8	2,6	44,4	111,4	49,6
99	0,0	3,4	2,5	0,0	2,0	20,4	22,9	27,1
100	0,0	2,6	2,5	0,0	2,4	34,0	132,3	49,8
101	0,2	5,3	4,9	0,7	2,0	45,9	73,5	43,5
102	0,0	3,2	3,2	0,3	2,0	52,9	192,9	60,3
103	0,0	2,7	2,7	0,1	2,3	31,2	100,0	44,6
104	0,0	5,0	4,9	0,5	2,1	41,9	100,0	46,9
105	0,2	0,8	0,0	0,9	6,3	34,8	70,6	40,3
106	0,0	1,2	2,0	0,1	2,3	36,0	118,1	47,8
107	0,0	3,4	3,2	0,3	1,6	47,7	170,1	56,9
108	0,2	3,5	3,5	0,3	1,8	47,9	127,8	51,4
109	0,2	4,7	4,1	0,3	2,0	37,9	108,9	47,5
110	0,0	4,3	4,0	0,4	2,0	49,4	108,9	49,1
111	0,0	4,4	3,8	0,2	2,0	19,0	30,9	29,3
112	0,1	4,8	3,9	0,2	2,1	30,9	37,9	33,8
113	0,1	5,7	4,8	0,5	2,0	33,1	39,1	34,9
114	0,2	4,7	4,3	0,3	1,5	22,6	76,6	39,7
115	0,3	4,4	3,6	0,4	1,1	22,7	65,2	37,3
116	0,0	4,5	4,2	0,6	1,5	31,9	100,0	45,2
117	0,1	2,9	2,6	0,3	1,4	38,1	163,8	54,7
118	0,1	3,8	3,6	0,2	1,4	34,8	108,9	46,7
119	0,1	5,3	4,2	0,5	1,7	52,9	192,9	60,7
120	0,1	3,5	3,2	0,3	1,7	45,8	192,9	59,4
121	0,1	3,9	3,6	0,3	1,8	44,4	244,1	65,3
122	0,1	3,7	2,7	0,3	1,1	16,7	50,4	32,7
123	0,1	1,9	1,5	0,0	2,0	20,9	81,0	39,2
124	0,6	3,0	2,6	0,1	1,9	26,6	89,2	42,1
125	0,0	4,1	3,2	0,1	2,2	26,8	42,3	33,5
126	0,2	1,7	1,2	0,2	2,0	6,3	9,3	17,2
127	0,1	4,5	3,2	0,3	1,5	10,6	11,1	21,2
128	0,2	1,1	1,1	0,1	1,9	5,6	12,0	17,7
129	0,2	4,1	2,8	0,1	1,4	14,9	28,4	27,3
130	0,2	5,7	4,1	0,4	1,8	34,6	74,6	41,6
131	0,1	6,8	7,1	1,3	2,3	114,8	429,1	89,6
132	0,3	4,5	3,7	0,3	1,9	27,7	83,4	41,7
133	0,3	4,5	3,5	0,3	2,0	25,0	65,5	38,0
134	0,4	4,3	3,7	0,3	1,8	28,3	74,3	40,2
135	0,3	6,2	5,4	0,5	2,1	88,6	266,2	72,6

Tabla Q-19: “Error Cuadrático Medio para WSDOT – Datos Gauss-TC”

Estación Nº	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
1	10,7	22,9	34,5	73,5	132,9	320,2	370,9	117,5
2	13,3	26,4	39,6	73,5	128,2	289,9	355,2	115,0
3	12,1	21,6	33,1	69,4	141,9	400,0	685,9	139,6
4	12,6	20,2	33,1	71,6	147,8	384,8	656,6	137,7

Tabla Q-19: “Error Cuadrático Medio para WSDOT – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación Nº	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
5	13,5	22,0	32,2	67,4	126,2	400,0	900,0	149,3
6	12,4	21,4	35,2	70,2	136,7	378,1	592,8	133,5
7	14,1	26,1	38,3	69,4	130,6	462,9	812,3	149,0
8	18,8	36,2	49,3	69,8	103,0	180,0	353,4	107,6
9	13,0	24,3	39,6	70,7	121,0	267,8	400,0	115,7
10	12,9	24,6	37,0	69,9	122,0	282,5	502,4	122,5
11	16,8	42,2	60,2	80,5	114,5	191,1	298,3	107,2
12	11,1	20,3	30,8	70,7	143,3	461,0	789,3	147,7
13	11,0	21,8	36,5	75,2	135,5	306,3	434,0	120,7
14	10,7	16,7	27,7	69,4	153,9	415,0	669,9	139,6
15	12,2	19,4	29,7	67,4	150,3	455,1	720,5	144,2
16	10,4	42,0	48,5	82,6	140,0	338,1	400,0	123,1
17	13,6	27,3	39,8	77,1	130,0	281,4	330,6	113,4
18	12,3	27,1	38,0	74,6	136,1	306,3	349,5	116,1
19	11,9	30,2	40,7	75,7	135,0	388,3	400,0	124,3
20	11,6	25,2	35,6	71,0	135,6	339,3	400,0	120,6
21	14,2	28,4	43,8	79,0	119,3	229,1	253,6	104,7
22	12,8	27,4	41,2	75,9	120,4	236,1	285,5	106,9
23	14,3	29,5	43,2	78,2	111,8	190,7	192,4	97,1
24	13,2	22,9	34,7	68,9	124,4	302,1	477,5	122,1
25	11,5	20,0	32,9	67,8	141,6	491,2	1.048,5	161,0
26	13,2	25,9	38,7	71,8	147,4	372,9	347,3	120,5
27	11,8	20,2	33,4	75,0	139,7	371,9	488,6	127,7
28	14,2	29,5	43,5	73,2	119,8	280,6	344,9	113,8
29	17,1	31,0	43,7	64,5	98,0	230,4	378,1	111,0
30	12,7	29,6	42,0	76,6	115,4	215,5	361,0	110,4
31	10,9	25,3	37,9	79,7	129,6	225,0	383,5	112,9
32	12,0	27,2	39,7	73,5	132,1	306,3	491,7	124,3
33	11,3	21,4	32,8	74,3	133,7	375,4	566,9	131,8
34	10,9	20,3	34,7	73,7	135,5	334,4	558,7	129,2
35	11,1	21,9	34,9	76,8	144,9	289,0	344,9	114,9
36	10,5	20,8	37,1	76,1	137,5	284,8	317,8	112,4
37	11,8	37,6	49,3	76,6	136,7	337,8	870,3	147,4
38	11,6	23,3	36,0	71,6	137,2	327,9	736,7	138,6
39	6,1	2,2	1,4	2,0	5,3	35,5	113,8	48,7
40	12,7	27,3	39,2	70,5	132,9	461,0	900,0	153,2
41	10,8	23,4	35,4	74,8	130,6	285,8	336,1	113,2
42	9,3	19,9	32,7	75,8	131,9	254,5	260,1	105,8
43	10,9	28,6	40,8	76,6	124,1	280,4	532,5	125,0
44	12,8	26,7	40,5	72,6	120,5	218,8	428,1	114,6
45	10,3	15,3	27,0	66,2	149,0	610,4	1.017,9	164,6
46	13,1	28,7	39,8	70,4	117,4	292,8	308,9	111,6
47	14,2	36,4	52,0	83,2	109,0	165,3	148,5	93,2
48	14,9	33,6	46,8	80,8	118,3	172,7	237,7	100,3
49	15,0	33,1	52,2	87,3	129,9	147,4	141,7	93,1
50	14,8	23,9	35,8	69,2	125,7	263,0	537,4	123,6
51	15,9	27,6	43,6	67,6	102,3	184,5	413,0	110,5
52	6,5	4,0	1,7	1,9	3,8	20,8	34,8	32,4

Tabla Q-19: “Error Cuadrático Medio para WSDOT – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación Nº	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
53	13,1	22,6	35,5	69,4	133,1	376,1	589,8	133,1
54	17,0	25,3	35,7	68,1	105,3	267,0	501,8	120,7
55	6,6	2,3	1,1	1,5	3,7	29,1	111,8	47,2
56	16,3	34,4	43,8	73,9	105,1	183,4	225,0	98,7
57	14,0	26,3	38,7	74,2	113,1	308,4	497,6	123,8
58	14,3	29,8	42,9	73,2	124,9	365,5	729,0	140,4
59	12,4	27,8	40,5	73,2	136,1	425,4	807,8	147,5
60	13,8	24,0	34,2	68,9	122,8	368,2	564,1	130,7
61	16,2	28,7	41,3	70,0	117,9	299,2	416,2	118,9
62	16,9	27,0	38,2	66,8	108,1	218,2	371,9	110,0
63	15,6	24,3	37,3	73,5	127,6	297,3	518,8	125,0
64	15,2	26,6	38,1	72,6	127,9	362,2	638,2	135,3
65	13,7	21,0	33,8	64,3	119,7	330,6	826,6	141,9
66	14,9	28,5	41,1	72,3	120,7	292,6	551,2	126,6
67	16,2	28,9	41,0	68,9	114,4	236,1	384,8	112,8
68	16,2	37,2	54,5	87,1	100,0	135,1	161,1	91,9
69	13,6	21,9	33,9	71,3	131,1	265,2	260,9	106,8
70	11,3	18,3	29,9	74,9	127,5	225,0	282,2	104,8
71	14,4	23,6	37,2	70,6	122,3	213,6	453,9	115,6
72	12,4	23,2	37,9	81,4	125,6	177,8	264,1	101,6
73	13,7	25,3	40,3	77,9	120,6	229,3	256,0	104,4
74	6,5	2,2	1,3	1,9	4,4	29,9	72,0	41,1
75	12,8	34,6	42,0	72,9	121,8	332,0	518,0	127,3
76	14,1	35,1	50,5	74,9	122,8	239,5	344,9	112,2
77	10,5	73,7	68,7	86,6	130,2	318,2	432,6	126,5
78	12,5	36,6	46,2	81,7	134,1	324,0	381,2	120,5
79	14,7	33,9	45,4	79,6	95,0	129,3	128,0	86,7
80	12,4	26,0	37,7	74,7	130,2	436,1	841,0	149,2
81	13,0	28,1	44,4	73,5	128,2	266,2	434,0	118,8
82	15,6	27,3	39,6	66,2	104,7	234,3	487,0	118,0
83	16,8	28,1	40,5	73,8	117,1	306,3	611,9	130,6
84	16,1	25,5	35,1	62,6	112,9	391,5	834,6	145,3
85	12,2	22,0	32,6	68,2	138,8	499,7	743,8	147,2
86	15,6	24,3	34,7	65,7	112,3	380,7	1.260,3	164,5
87	13,7	26,5	35,7	68,0	121,0	296,2	798,7	139,4
88	13,8	26,8	38,1	74,0	126,1	293,9	566,9	127,6
89	15,5	32,7	50,9	78,8	108,4	194,7	245,4	101,9
90	11,3	27,8	40,2	78,0	133,1	206,2	209,8	100,4
91	11,9	46,1	56,3	81,7	119,5	175,9	183,0	98,2
92	11,1	24,3	38,8	73,7	130,2	225,0	212,3	101,1
93	11,5	53,8	65,2	84,4	115,4	181,4	212,3	101,7
94	11,6	30,2	47,4	83,5	118,7	180,0	265,6	102,6
95	11,3	24,2	38,6	77,0	124,5	225,0	281,8	105,7
96	11,9	24,5	36,2	72,8	130,6	346,4	625,0	133,5
97	10,8	17,2	32,9	75,0	149,4	358,3	544,4	130,3
98	9,0	15,3	27,3	70,0	162,4	484,0	900,0	154,4
99	12,9	27,3	43,0	83,1	126,6	260,1	258,8	107,7
100	11,0	30,0	42,7	77,9	127,0	346,4	812,3	143,8

Tabla Q-19: “Error Cuadrático Medio para WSDOT – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación Nº	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
101	11,3	22,7	34,9	70,0	148,5	453,3	589,8	137,9
102	12,0	26,5	37,9	70,5	140,0	489,3	1.148,5	165,8
103	11,5	29,4	42,0	76,8	136,1	354,3	702,3	139,0
104	11,4	20,7	31,0	68,4	144,7	423,9	736,7	143,3
105	9,9	70,0	68,1	85,1	129,7	286,4	449,4	125,3
106	10,7	42,4	47,1	77,1	132,7	361,0	774,3	143,7
107	12,7	26,4	37,8	67,9	124,3	419,3	1.007,4	155,6
108	11,3	28,5	38,4	72,0	134,7	442,1	848,6	150,0
109	11,0	22,4	34,5	72,4	133,1	389,8	750,3	142,1
110	12,0	21,5	32,8	68,2	133,1	455,9	774,3	146,3
111	11,4	21,9	35,7	74,4	133,9	277,8	342,9	113,3
112	11,3	22,1	36,6	74,2	134,4	336,1	369,8	118,6
113	12,7	20,3	33,3	70,9	137,3	364,5	383,5	120,9
114	13,0	24,0	34,5	70,2	126,2	280,6	544,4	125,0
115	15,0	26,9	39,4	68,2	121,9	285,8	497,6	122,7
116	13,0	21,5	31,9	65,0	126,2	349,5	711,1	137,2
117	14,6	24,8	36,7	64,7	117,7	374,9	973,4	151,5
118	13,7	26,6	36,2	69,7	119,0	350,4	703,4	137,3
119	12,6	20,5	35,8	71,3	133,9	462,9	1.111,1	162,5
120	14,0	29,0	39,4	72,3	124,2	400,0	1.038,3	156,6
121	14,0	26,7	39,6	73,5	128,2	412,2	1.359,8	171,3
122	14,3	26,0	41,3	69,2	112,0	234,3	400,0	113,2
123	13,2	33,3	48,7	82,6	123,5	256,0	576,0	127,2
124	12,7	37,1	49,2	79,7	133,4	303,4	625,0	133,1
125	13,6	25,0	41,1	78,3	131,8	297,3	380,3	117,6
126	14,1	41,8	57,4	94,1	112,4	141,0	159,0	94,1
127	14,0	25,6	42,2	74,0	126,1	189,1	186,8	96,9
128	12,8	47,2	58,9	90,1	118,0	134,1	181,2	95,8
129	13,5	25,5	42,4	74,9	116,6	211,6	289,0	105,1
130	12,9	21,4	36,5	71,7	132,1	365,5	558,7	130,9
131	9,2	16,2	25,0	65,7	170,4	921,6	2571,9	232,4
132	11,7	25,0	38,7	73,5	132,9	320,2	592,8	130,6
133	11,9	26,7	41,9	75,9	138,0	311,4	544,4	128,2
134	11,0	25,0	37,4	70,1	128,8	319,4	566,1	128,6
135	9,0	17,4	29,0	69,0	142,8	700,7	1.476,2	186,9

Tabla Q-20: “Error Cuadrático Medio para FHWA – Datos Gauss-TC”

Estación Nº	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
1	1,8	9,0	18,1	52,4	108,5	301,7	356,8	110,1
2	2,1	8,4	17,0	41,3	85,8	229,1	286,4	97,8
3	2,1	8,2	17,0	48,5	115,2	376,8	661,2	132,5
4	1,5	6,7	17,4	53,4	133,8	400,0	722,3	138,1
5	2,4	7,5	14,5	41,2	91,9	336,1	812,3	136,6
6	1,7	6,7	16,0	43,2	102,8	326,0	531,0	121,2
7	2,5	8,7	16,7	40,6	88,9	376,1	702,3	132,9
8	3,6	10,1	15,7	26,7	43,8	95,2	207,4	75,8

Tabla Q-20: “Error Cuadrático Medio para FHWA – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación Nº	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
9	2,3	7,6	16,6	38,4	76,6	198,6	309,3	96,3
10	2,4	8,3	16,3	39,8	80,2	209,3	400,0	103,9
11	2,0	10,3	18,5	30,4	51,7	106,0	186,0	76,0
12	1,9	8,1	16,7	53,1	127,0	448,4	789,3	143,7
13	1,4	7,2	17,9	51,0	109,2	277,8	416,8	112,2
14	1,4	6,5	17,7	61,7	158,6	477,5	797,2	147,4
15	2,0	7,2	16,0	51,2	134,9	469,4	749,0	142,9
16	0,0	8,4	13,2	36,3	81,0	249,8	298,3	99,1
17	1,6	8,2	16,8	45,0	93,1	239,8	298,3	100,2
18	2,0	10,0	18,4	51,3	106,8	284,8	333,5	107,3
19	1,8	11,2	19,0	46,2	100,0	332,5	368,6	112,1
20	2,2	10,1	17,8	46,9	105,6	310,9	370,9	111,1
21	2,0	7,9	17,3	40,1	71,6	168,3	187,8	84,1
22	2,1	9,1	17,0	42,7	79,0	180,0	219,9	88,6
23	2,5	9,0	17,3	39,9	66,3	130,6	142,5	76,4
24	2,7	8,3	16,4	42,5	90,0	246,9	400,0	107,4
25	1,8	6,9	16,3	44,1	110,4	444,4	987,8	151,7
26	1,7	8,8	18,1	46,6	114,8	334,0	330,6	110,5
27	1,5	7,1	17,8	57,2	127,1	385,8	512,2	125,8
28	2,4	9,1	16,7	35,5	70,2	196,0	246,9	90,8
29	6,1	13,8	21,1	34,0	57,4	147,4	259,6	87,8
30	2,5	10,5	17,6	40,2	70,5	157,6	277,8	90,8
31	1,5	9,3	18,8	53,5	103,1	201,9	367,4	103,9
32	1,8	9,8	18,0	46,7	100,0	259,6	435,5	111,6
33	1,8	8,3	17,7	55,5	119,6	375,4	566,9	127,9
34	1,5	7,0	18,0	52,9	115,5	324,0	558,7	124,1
35	1,3	7,7	18,8	58,6	131,8	300,4	381,2	113,4
36	1,0	6,8	19,0	55,4	121,8	284,8	333,5	108,4
37	1,7	13,4	20,9	42,8	91,7	271,8	729,0	129,4
38	1,8	8,3	17,6	46,6	105,8	299,2	685,9	129,0
39	3,7	9,8	17,5	38,6	75,7	242,6	544,4	115,4
40	2,2	10,2	18,1	43,6	97,2	388,3	784,0	138,6
41	1,8	9,0	17,9	50,7	100,0	254,5	300,4	102,4
42	1,4	8,1	18,9	57,6	116,9	254,5	270,7	102,0
43	1,9	10,5	18,8	46,0	85,4	221,5	447,5	109,0
44	2,3	8,8	16,5	38,1	72,9	156,3	321,5	93,8
45	1,8	6,1	15,8	53,1	136,6	610,4	1.048,5	163,5
46	3,0	10,6	17,4	38,3	73,5	208,6	229,6	91,1
47	2,1	10,8	18,8	36,5	56,3	100,0	93,8	67,4
48	2,2	10,1	17,7	40,1	70,9	124,2	177,8	79,5
49	1,3	8,5	19,8	45,2	86,5	114,8	120,0	75,2
50	2,7	7,8	15,5	39,9	88,2	213,0	456,4	108,5
51	4,4	10,8	19,9	36,2	59,7	119,8	292,3	88,1
52	5,4	15,3	20,7	38,3	66,2	168,5	236,7	88,7
53	2,0	7,3	16,3	43,1	100,0	319,7	522,4	120,2
54	3,3	7,5	13,5	33,9	60,3	186,6	368,6	98,1
55	4,3	9,3	14,4	32,3	62,4	204,1	535,6	111,0
56	5,1	14,9	20,5	39,2	62,0	121,9	159,9	77,8

Tabla Q-20: “Error Cuadrático Medio para FHWA – Datos Gauss-TC”

Estación Nº	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
57	3,1	9,5	17,4	43,2	74,1	236,1	400,0	105,8
58	2,4	9,4	17,4	38,3	77,9	271,3	576,0	119,1
59	1,9	9,6	18,2	44,9	97,0	363,4	720,5	133,9
60	3,0	8,8	16,2	42,4	89,5	308,6	487,7	116,9
61	3,8	10,5	18,5	38,7	75,9	229,1	324,0	100,0
62	3,9	9,2	15,7	35,5	64,4	150,6	269,9	88,6
63	2,3	7,0	15,9	43,9	89,2	251,6	445,7	110,6
64	2,6	8,9	16,5	42,0	90,4	292,3	560,9	120,3
65	2,5	6,7	14,7	37,4	79,9	260,4	667,4	123,6
66	2,8	8,9	16,7	37,2	73,8	209,5	417,6	104,6
67	4,1	11,1	18,6	38,4	71,8	173,5	313,0	94,9
68	2,2	10,0	17,7	37,6	47,6	79,5	100,0	64,9
69	2,2	7,2	15,6	45,9	100,0	229,3	236,7	95,4
70	1,8	6,8	16,2	58,4	113,3	233,4	309,8	102,8
71	2,3	7,1	15,8	40,7	82,6	171,0	382,8	100,2
72	1,6	7,2	17,3	51,8	96,6	156,3	237,7	90,1
73	1,9	7,3	17,0	45,0	81,3	180,3	219,0	88,8
74	3,5	9,1	16,1	36,7	67,2	211,1	388,0	102,2
75	3,1	14,1	18,6	39,2	76,3	242,0	400,0	106,5
76	2,3	10,6	18,3	33,3	63,6	153,3	235,8	86,0
77	0,1	11,4	11,3	22,6	47,6	161,4	243,4	84,3
78	1,5	12,8	20,8	50,5	103,5	289,0	362,8	109,6
79	4,3	13,9	21,0	43,1	55,8	84,9	89,8	66,9
80	2,0	9,1	17,5	44,9	94,4	365,5	756,3	135,7
81	1,8	8,4	18,1	38,7	83,1	194,5	351,6	99,7
82	4,2	10,3	18,1	36,2	62,9	165,3	359,7	96,9
83	3,2	9,3	17,1	40,4	75,5	234,5	488,6	111,4
84	4,2	9,7	15,7	34,8	71,2	289,7	653,1	124,1
85	2,3	8,4	16,4	47,3	111,3	448,4	695,0	137,8
86	3,2	7,6	14,0	35,4	67,5	283,2	992,3	141,6
87	3,5	10,7	17,2	42,1	85,6	235,6	658,0	122,6
88	2,4	9,1	17,0	43,0	88,1	238,0	479,8	112,0
89	2,3	8,7	17,0	32,7	52,7	114,4	152,1	73,7
90	1,7	10,3	19,1	50,8	100,0	184,7	190,2	89,2
91	1,9	16,1	21,7	39,1	66,2	118,1	131,6	75,1
92	1,8	8,4	18,1	45,2	92,5	181,7	180,3	86,8
93	1,4	17,4	23,1	37,5	60,5	112,6	144,0	75,3
94	1,4	9,5	19,5	47,4	80,2	137,1	219,5	85,7
95	1,6	8,4	18,1	49,6	91,5	196,0	246,9	93,5
96	2,1	9,4	18,0	48,5	102,9	316,0	580,4	124,1
97	0,9	5,4	18,2	59,0	140,5	385,8	625,0	132,8
98	1,1	6,5	18,8	66,6	174,9	576,0	1.074,4	165,5
99	1,4	8,2	18,4	48,5	89,6	220,2	231,6	93,9
100	1,5	10,7	19,8	48,5	94,4	306,3	756,3	133,0
101	1,5	8,5	18,4	51,0	130,1	439,6	613,2	134,3
102	2,0	9,6	17,9	43,6	102,8	424,6	1.038,3	153,0
103	1,6	10,5	19,5	47,7	103,1	311,4	650,3	127,8
104	2,2	8,5	16,9	52,0	124,5	411,9	736,7	139,0

Tabla Q-20: “Error Cuadrático Medio para FHWA – Datos Gauss-TC”

Estación N°	Error Cuadrático Medio (%)							
	D0	D20	D30	D45	D60	D90	D120	Promedio
105	0,1	11,7	12,7	24,5	52,2	151,5	269,0	86,3
106	1,9	17,6	22,4	46,0	95,0	306,3	680,5	129,3
107	2,7	10,0	17,1	38,9	82,5	318,9	823,4	135,9
108	2,2	11,3	18,6	45,2	100,0	369,8	750,3	136,1
109	1,9	8,3	17,5	49,2	105,2	340,8	703,4	132,4
110	2,2	7,8	16,3	46,0	105,2	410,9	703,4	135,8
111	1,6	7,5	17,3	49,8	102,9	244,6	316,0	102,8
112	1,5	7,3	17,7	48,0	102,9	296,6	340,8	107,9
113	1,9	6,5	16,1	46,8	109,6	330,6	367,4	112,1
114	2,8	9,2	16,5	45,7	94,6	240,3	487,7	113,2
115	3,3	9,5	17,5	37,8	78,0	210,9	400,0	104,0
116	2,7	7,7	15,0	39,4	89,1	280,2	597,5	121,4
117	3,8	9,6	17,3	37,1	78,0	282,5	784,0	131,6
118	3,0	10,0	16,4	41,2	82,6	277,8	571,8	119,7
119	1,6	6,1	16,1	43,6	100,0	400,0	1.002,8	149,8
120	2,6	10,2	17,1	41,0	83,6	321,9	900,0	140,2
121	2,3	8,8	17,0	42,6	88,6	341,7	1.181,6	155,0
122	3,6	9,8	19,0	38,7	70,1	170,6	303,4	93,7
123	1,6	10,0	19,5	43,4	76,2	196,0	462,3	107,5
124	1,5	12,1	20,4	46,0	93,2	249,8	544,4	117,6
125	1,5	7,1	17,5	47,9	96,3	262,7	342,3	105,2
126	1,3	11,5	21,6	47,1	67,2	100,0	118,1	72,4
127	1,8	7,0	16,8	38,9	79,6	138,1	144,0	78,0
128	1,4	15,0	22,5	46,7	71,4	100,0	142,2	75,5
129	2,0	7,3	16,8	37,9	70,6	145,1	215,1	84,1
130	1,7	6,0	16,2	42,6	97,0	311,4	496,1	117,8
131	1,6	8,0	18,0	62,9	181,5	1056,3	2.946,9	247,1
132	1,8	8,8	17,9	45,7	97,2	274,9	531,0	118,2
133	1,3	8,6	19,3	47,4	103,2	271,3	500,9	116,6
134	2,1	9,5	18,1	42,4	89,1	254,6	471,9	112,6
135	1,4	7,2	17,6	56,3	134,2	716,3	1.558,2	188,6

Tabla Q-21: “Error Cuadrático Medio para MODTAG – Datos Gauss-TC”

Estación N°	RMS (%)	Estación N°	RMS (%)	Estación N°	RMS (%)
1	2,5	14	1,4	27	1,7
2	2,2	15	0,9	28	3,0
3	1,3	16	6,0	29	2,2
4	1,0	17	2,3	30	0,8
5	0,7	18	3,1	31	1,3
6	1,1	19	6,1	32	1,7
7	3,6	20	3,5	33	2,1
8	0,6	21	2,1	34	0,6
9	1,0	22	1,6	35	0,7
10	0,6	23	1,5	36	1,0
11	1,0	24	0,7	37	2,4
12	1,9	25	1,4	38	1,1
13	0,7	26	4,1	39	1,1

Tabla Q-21: “Error Cuadrático Medio para MODTAG – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	RMS (%)	Estación N°	RMS (%)	Estación N°	RMS (%)
40	3,8	72	2,6	104	1,4
41	2,0	73	1,4	105	5,1
42	1,0	74	1,8	106	4,3
43	1,3	75	4,5	107	2,6
44	1,4	76	2,3	108	3,8
45	1,4	77	6,4	109	1,2
46	4,3	78	4,5	110	2,8
47	2,2	79	1,2	111	0,6
48	0,9	80	2,9	112	2,6
49	1,0	81	0,8	113	1,5
50	2,0	82	0,3	114	1,1
51	1,8	83	1,2	115	0,7
52	3,5	84	3,0	116	0,6
53	1,3	85	3,7	117	1,1
54	1,2	86	1,3	118	2,2
55	1,0	87	1,3	119	1,4
56	2,1	88	0,8	120	2,3
57	2,6	89	1,5	121	0,8
58	2,6	90	1,9	122	0,5
59	3,1	91	3,6	123	0,6
60	2,8	92	1,4	124	2,0
61	3,0	93	3,4	125	1,7
62	0,6	94	0,8	126	0,9
63	1,3	95	0,6	127	0,8
64	2,0	96	1,4	128	2,2
65	1,4	97	1,8	129	0,8
66	1,1	98	1,2	130	1,3
67	0,8	99	2,7	131	2,8
68	1,2	100	1,8	132	0,8
69	0,8	101	3,5	133	0,8
70	2,6	102	3,2	134	1,7
71	3,2	103	2,0	135	4,0

En la siguiente tabla se presenta el Error Cuadrático Medio para los cuatro procedimientos y los tres set de datos.

Tabla Q-22: “Error Cuadrático Medio”

Procedimiento	Error Cuadrático Medio (%)		
	LNV	Gauss-TH	Gauss-TC
AASHTO	41,0	42,7	38,7
WSDOT	133,8	124,5	123,6
FHWA	100,6	115,5	111,2
MODTAG	3,9	2,0	1,9

En las siguientes tablas se muestra el valor del coeficiente de variación

Tabla Q-23: “Coeficiente de variación para el módulo de elasticidad de testigos mediante MTS”

Testigo N°	Módulo de Elasticidad (MPa)
1	10.758
2	11.262
3	9.173
4	9.126
5	8.007
Promedio	9.665
Desviación Estándar	1.325
Coeficiente de Variación	13,7%

Tabla Q-24: “Coeficiente de variación para el módulo de elasticidad de testigos mediante NAT”

Testigo N°	Módulo de Elasticidad (MPa)	Testigo N°	Módulo de Elasticidad (MPa)
C1	5.171	B1	4.254
C2	4.714	B2	4.370
C3	4.494	B3	4.057
C4	4.651	B4	4.309
C5	4.650	B5	5.009
Promedio	4.736	Promedio	4.400
D. Estándar	256	D. Estándar	360
C. Variación	5,4 %	C. Variación	8,2 %
Coeficiente de Variación Promedio = 6,8 %			

Tabla Q-25: “Coeficiente de variación para el módulo de elasticidad de probetas mediante NAT”

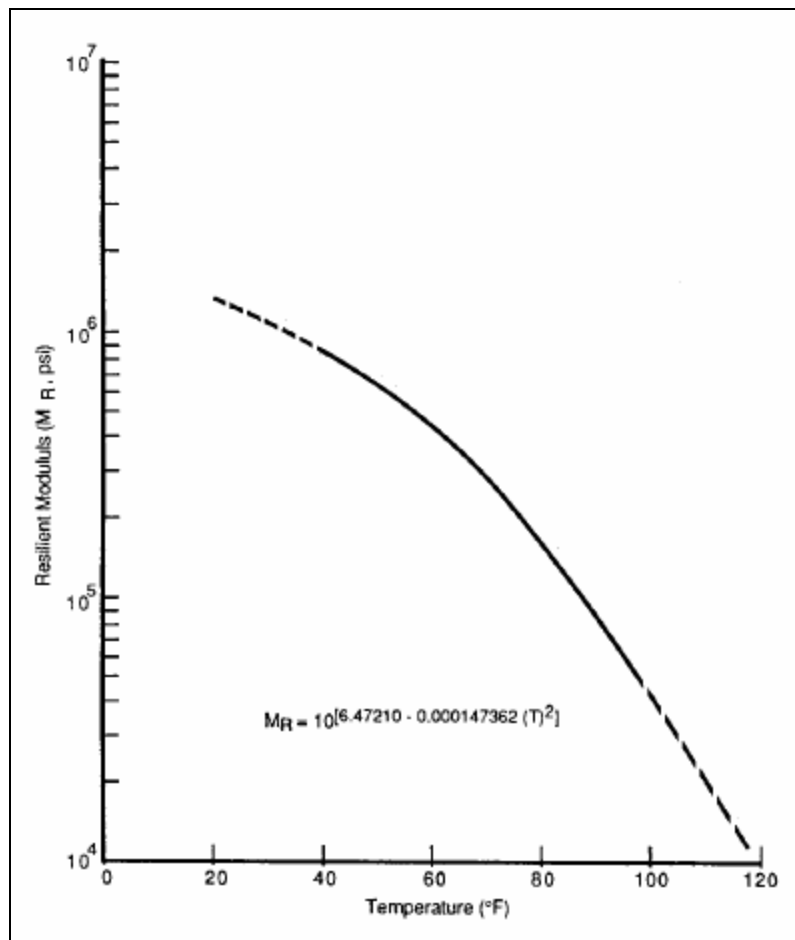
Probeta N°	Módulo de Elasticidad (MPa)	Probeta N°	Módulo de Elasticidad (MPa)	Probeta N°	Módulo de Elasticidad (MPa)	Probeta N°	Módulo de Elasticidad (MPa)
B501	3.854	B751	4.116	C501	4.319	C751	4.386
B502	3.127	B752	5.485	C502	4.047	C752	4.504
B503	3.491	B753	3.900	C503	4.093	C753	4.153
B504	3.609	B754	4.028	C504	4.324	C754	3.502
B505	4.146	B755	3.813	C505	4.027	C755	4.442
Promedio	3.645	Promedio	4.268	Promedio	4.162	Promedio	4.197
D. Estándar	383	D. Estándar	690	D. Estándar	148	D. Estándar	411
C. Variación	10,5%	C. Variación	16,2%	C. Variación	3,5%	C. Variación	9,8%
Coeficiente de Variación Promedio = 10,0 %							

ANEXO R: CORRECCIÓN POR TEMPERATURA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

Los resultados obtenidos a través de los procedimientos establecidos por el *Washington State Department of Transportation* (WSDOT) y por la *Federal Highway Administration* (FHWA), y los obtenidos con el programa computacional MODTAG deben ser corregidos por temperatura para determinar el valor del módulo de elasticidad para 19 °C. En el Anexo K se encuentran los resultados obtenidos mediante WSDOT y FHWA, y en el Anexo L, los obtenidos mediante MODTAG.

Para corregir por temperatura el módulo de elasticidad, se utiliza el siguiente modelo planteado por el Estado de Washington.

Gráfico R-1: “Modelo del Estado de Washington”



Para determinar el módulo de elasticidad corregido por temperatura, se traslada la curva del modelo del Estado de Washington hasta hacerla calzar con los valores obtenidos en cada estación, y luego, se

determina el módulo de elasticidad a la temperatura deseada (19 °C y 20 °C) sobre la curva resultante. Finalmente, para obtener el módulo de elasticidad a las temperaturas indicadas, se determina la media aritmética de los valores obtenidos en cada estación.

Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla R-1: “Módulo de elasticidad del pavimento asfáltico – Datos LNV”

Estación N°	Módulo de Elasticidad (MPa)					
	19 °C			20 °C		
	FHWA	WSDOT	MODTAG	FHWA	WSDOT	MODTAG
2	3.580	3.406	5.199	3.533	3.362	5.131
3	2.184	2.541	1.525	2.155	2.507	1.505
4	2.466	2.518	2.125	2.434	2.485	2.097
7	4.032	3.876	7.084	3.979	3.825	6.991
8	2.436	2.425	2.846	2.404	2.393	2.808
9	4.027	4.222	5.355	3.974	4.166	5.285
10	1.952	2.169	1.742	1.927	2.140	1.719
11	3.235	3.334	4.060	3.193	3.290	4.007
Promedio	2.989	3.061	3.742	2.950	3.021	3.693

Tabla R-2: “Módulo de elasticidad del pavimento asfáltico – Datos Gauss-TH”

Estación N°	Módulo de Elasticidad (MPa)					
	19 °C			20 °C		
	FHWA	WSDOT	MODTAG	FHWA	WSDOT	MODTAG
1	4.434	3.442	3.010	4.376	3.397	2.970
2	5.130	4.114	6.621	5.063	4.060	6.534
3	5.378	3.990	6.426	5.307	3.938	6.342
4	4.773	3.633	4.285	4.710	3.586	4.228
5	4.653	3.403	6.405	4.592	3.358	6.321
Promedio	4.874	3.716	5.349	4.810	3.668	5.279

Tabla R-3: “Módulo de elasticidad del pavimento asfáltico – Datos Gauss-TC”

Estación N°	Módulo de Elasticidad (MPa)					
	19 °C			20 °C		
	FHWA	WSDOT	MODTAG	FHWA	WSDOT	MODTAG
1	4.785	3.636	3.232	4.722	3.588	3.190
2	6.142	4.861	4.066	6.061	4.797	4.013
3	6.069	4.378	4.285	5.989	4.320	4.229
4	7.063	4.681	5.272	6.971	4.620	5.203
5	7.888	5.742	5.738	7.784	5.667	5.663
6	6.447	4.653	4.764	6.362	4.592	4.701
7	6.985	5.372	4.626	6.893	5.301	4.566
8	10.332	9.556	5.745	10.197	9.430	5.669
9	6.417	5.130	4.372	6.332	5.063	4.315
10	5.803	4.690	3.851	5727	4628	3800

Tabla R-3: “Módulo de elasticidad del pavimento asfáltico – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	Módulo de Elasticidad (MPa)					
	19 °C			20 °C		
	FHWA	WSDOT	MODTAG	FHWA	WSDOT	MODTAG
11	6.475	6.111	3.381	6.390	6.030	3.336
12	5.377	3.812	3.832	5.306	3.762	3.782
13	4.855	3.576	3.384	4791	3529	3340
14	6.255	3.941	4.921	6.172	3.889	4.856
15	6723	4480	5200	6.635	4.421	5.132
16	2.510	2.089	1.217	2.477	2.061	1.201
17	6434	4950	4190	6.349	4.885	4.135
18	5.775	4.444	3.708	5.699	4.385	3.659
19	4.160	3.416	2.419	4.105	3.371	2.387
20	4.827	3.800	3.154	4.764	3.750	3.113
21	7.262	5.922	4.714	7.167	5.845	4.652
22	5.936	4.899	3.795	5.858	4.834	3.745
23	7.314	6.202	4.604	7.217	6.121	4.543
24	7.057	5.359	5.025	6.965	5.289	4.959
25	5.726	4.097	4.195	5.651	4.043	4.140
26	6.100	4.502	4.131	6.020	4.443	4.076
27	6.293	4.270	4.518	6.210	4.214	4.458
28	6.608	5.599	4.131	6.521	5.525	4.076
29	8.612	7.971	5.029	8.499	7.866	4.963
30	5.182	4.568	3.065	5.114	4.508	3.025
31	4.434	3.455	2.807	4376	3410	2770
32	5.191	4.144	3.227	5.123	4.090	3.185
33	5.610	4.028	3.896	5.536	3.975	3.845
34	5.127	3.661	3.668	5.060	3.613	3.620
35	5.424	3.760	3.811	5.352	3.711	3.761
36	5.181	3.641	3.686	5.113	3.593	3.637
37	3.431	3.053	1.689	3.386	3.013	1.667
38	5.375	4.082	3.598	5.304	4.028	3.551
39	65.433	2.052	4.362	64.572	2.025	4.304
40	5.304	4.254	3.270	5.234	4.198	3.227
41	4.735	3.699	3.184	4.673	3.651	3.142
42	4.317	3.201	3.041	4.260	3.159	3.001
43	4.097	3.510	2.330	4.043	3.464	2.299
44	5.831	4.926	3.776	5.755	4.861	3.726
45	5.969	3.879	4.976	5.891	3.828	4.911
46	5.744	5.008	3.528	5.669	4.943	3.482
47	5.549	5.249	3.060	5.477	5.180	3.019
48	7.280	6.243	4.320	7.184	6.161	4.263
49	7.671	6.066	4.837	7.570	5.986	4.773
50	9.244	6.847	6.814	9.123	6.757	6.724
51	8.986	7.803	5.840	8.868	7.700	5.764
52	5.879	2.095	3.238	5.801	2.068	3.195
53	7.116	5.203	5.109	7.022	5.135	5.042
54	11.911	9.098	8.562	11.754	8.978	8.450
55	8.785	2.578	6.048	8.669	2.544	5.969
56	8.032	7.576	4.485	7.927	7.476	4.426
57	7.674	6.250	4.906	7.573	6.167	4.841

Tabla R-3: “Módulo de elasticidad del pavimento asfáltico – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación N°	Módulo de Elasticidad (MPa)					
	19 °C			20 °C		
	FHWA	WSDOT	MODTAG	FHWA	WSDOT	MODTAG
58	6.801	5.599	4.162	6.712	5.525	4.107
59	5.509	4.386	3.359	5.436	4.329	3.315
60	8.406	6.396	5.795	8.295	6.312	5.719
61	9.685	7.895	6.291	9.558	7.791	6.208
62	11.289	9.065	7.745	11.141	8.946	7.643
63	11.264	7.955	8.441	11.116	7.850	8.330
64	8.883	6.738	5.846	8.766	6.649	5.769
65	8.513	6.291	6.554	8.401	6.208	6.468
66	7.885	6.444	4.996	7.782	6.360	4.931
67	9.559	7.968	6.120	9.433	7.863	6.040
68	8.456	7.838	4.637	8.345	7.735	4.576
69	8.926	6.335	6.968	8.808	6.251	6.876
70	7.661	5.242	6.016	7.561	5.173	5.937
71	9.482	7.089	6.984	9.357	6.996	6.892
72	7.207	5.353	5.010	7.112	5.282	4.944
73	8.129	6.221	5.541	8.022	6.139	5.468
74	8.509	2.608	5.737	8.398	2.574	5.661
75	4.799	4.545	2.449	4.736	4.485	2.417
76	5.506	5.079	3.082	5.434	5.012	3.041
77	1.677	1.629	648	1.655	1.607	639
78	4.540	3.747	2.448	4.481	3.698	2.416
79	7.553	7.318	4.237	7.454	7.222	4.181
80	6.000	4.685	3.801	5.921	4.624	3.751
81	5.949	4.896	3.763	5.871	4.831	3.714
82	9.574	8.084	6.153	9.448	7.978	6.072
83	10.996	8.547	7.238	10.852	8.434	7.143
84	9.929	7.871	6.791	9.799	7.768	6.701
85	6.852	4.963	4.825	6.762	4.898	4.762
86	10.812	8.202	7.532	10.670	8.094	7.433
87	7.610	6.212	4.755	7.510	6.130	4.692
88	7.633	6.012	4.884	7.533	5.932	4.820
89	8.583	7.760	5.108	8.471	7.658	5.040
90	5.159	4.182	3.248	5.092	4.127	3.206
91	3.421	3.458	1.605	3.376	3.413	1.583
92	5.341	4.284	3.650	5.270	4.228	3.602
93	2.631	2.762	1.127	2.596	2.726	1.113
94	5.066	4.285	2.990	4.999	4.229	2.950
95	5.912	4.637	3.910	5.834	4.576	3.859
96	6.332	4.893	4.120	6.248	4.828	4.066
97	6.945	4.443	5.360	6.854	4.385	5.289
98	5.376	3.396	4.133	5.305	3.352	4.078
99	7.003	5.405	4.521	6.911	5.334	4.461
100	4.371	3.626	2.366	4.314	3.578	2.335
101	5.984	4.339	4.073	5.905	4.282	4.019
102	5.317	4.213	3.218	5.247	4.158	3.176
103	4.725	3.824	2.714	4.663	3.774	2.678
104	6.662	4.754	4.744	6.575	4.691	4.681

Tabla R-3: “Módulo de elasticidad del pavimento asfáltico – Datos Gauss-TC (continuación)”

Estación Nº	Módulo de Elasticidad (MPa)					
	19 °C			20 °C		
	FHWA	WSDOT	MODTAG	FHWA	WSDOT	MODTAG
105	1.575	1.504	618	1.554	1.484	609
106	3.084	2.890	1.365	3.044	2.852	1.347
107	6.350	5.286	3.957	6.267	5.216	3.905
108	5.104	4.239	2.934	5.037	4.184	2.895
109	5.889	4.491	3.955	5.812	4.432	3.903
110	6.916	5.082	4.879	6.825	5.015	4.815
111	6.402	4.747	4.548	6.318	4.685	4.488
112	6.445	4.760	4.545	6.360	4.697	4.485
113	8.755	6.031	6.950	8.640	5.952	6.859
114	8.523	6.557	5.723	8.411	6.471	5.648
115	9.876	7.936	6.666	9.746	7.832	6.578
116	8.376	6.290	6.174	8.266	6.208	6.093
117	8.310	6.633	5.637	8.201	6.546	5.563
118	8.192	6.631	5.121	8.084	6.544	5.054
119	8.020	5.641	6.004	7.915	5.566	5.925
120	7.659	6.245	4.673	7.559	6.163	4.611
121	7.897	6.117	5.022	7.793	6.037	4.956
122	8.785	7.339	5.838	8.669	7.243	5.761
123	5.608	4.758	3.131	5.534	4.696	3.089
124	5.207	4.423	2.722	5.139	4.365	2.686
125	8.020	5.875	5.479	7.915	5.798	5.407
126	5.932	5.308	3.098	5.854	5.238	3.057
127	8.704	6.790	6.235	8.590	6.701	6.153
128	4.440	4.199	2.122	4.381	4.144	2.094
129	8.340	6.767	5.631	8.230	6.678	5.557
130	8.883	6.322	6.771	8.767	6.239	6.682
131	5.226	3.373	3.892	5.157	3.329	3.841
132	6.191	4.859	4.008	6.109	4.795	3.955
133	5.821	4.492	3.706	5.745	4.433	3.658
134	5.392	4.501	3.378	5.321	4.441	3.334
135	5.089	3.537	3.628	5.022	3.491	3.580
Promedio	7.112	5.164	4.405	7.019	5.096	4.348

ANEXO S: DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD COMBINADO

En la mayoría de los procedimientos descritos se determinó el módulo de elasticidad para cada capa por separado, es decir, se determinó el módulo de elasticidad para la carpeta de rodadura y para el binder, por lo tanto, se debe obtener un valor que combine ambos en uno sólo. Además, con el fin de comparar los resultados obtenidos mediante AASHTO con los resultados obtenidos mediante FHWA, WSDOT y MODTAG, se determina el módulo de elasticidad combinado de las capas de Pavimento Asfáltico y Base.

En el caso de MODTAG, la combinación de las capas Pedraplén y Suelo corresponde a la capa que en los otros procedimientos mencionados se le denomina Suelo. Por lo tanto, con el fin de realizar comparaciones, se determina el módulo de elasticidad combinado de las capas Pedraplén y Suelo.

Para determinar el módulo de elasticidad combinado, se utiliza la siguiente fórmula:

$$E_C = \left(\frac{\sum_{i=1}^n h_i \cdot \sqrt[3]{E_i}}{\sum_{i=1}^n h_i} \right)^3 \quad (\text{Fórmula S-1})$$

Donde:

E_C es el módulo de elasticidad combinado (MPa).

h_i es el espesor de la capa i (mm).

E_i es el módulo de elasticidad de la capa i (Mpa).

Para determinar el Módulo de Elasticidad Combinado se utilizan los siguientes espesores de capas, los cuales fueron determinados a partir de los testigos de terreno.

Tabla S-1: “Espesor de las capas”

Capa	Espesor (mm)
Carpeta de Rodadura	59
Capa	Espesor (mm)
Base	300
Pedraplén	1.500
Suelo	1.437

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos.

Tabla S-2: “Módulo de elasticidad del pavimento asfáltico”

Procedimiento	Temperatura (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)		
		Carpeta	Binder	Pavimento Asfáltico
MTS	19			6.232
NAT (probetas)	19	4.163	5.047	4.652
NAT (testigos)	19	4.736	4.400	4.543
<i>Asphalt Institute</i>	19	6.887	6.263	6.527
<i>Shell BANDS 2.0</i>	19	5.030	5.090	5.064
<i>Shell fórmulas</i>	19	3.758	3.758	3.758

Tabla S-3: “Módulo de elasticidad del pavimento”

Procedimiento	Datos	Temperatura (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)		
			Pavimento Asfáltico	Base	Pavimento
AASHTO	LNV	30			813
	Gauss-TH	23			787
	Gauss-TC	27			941
FHWA	LNV	30	2.501	442	853
	Gauss-TH	23	4.621	451	1.153
	Gauss-TC	27	5.811	413	1.242
WSDOT	LNV	30	2.561	274	669
	Gauss-TH	23	3.523	308	832
	Gauss-TC	27	4.492	303	936
MODTAG	LNV	30	3.129	462	968
	Gauss-TH	23	5.042	181	794
	Gauss-TC	27	3.836	314	877

Tabla S-4: “Módulo de elasticidad del suelo”

Procedimiento	Datos	Temperatura (°C)	Módulo de Elasticidad (MPa)		
			Pedraplén	Suelo	Suelo Combinado
MODTAG	LNV	30	246	243	245
	Gauss-TH	23	527	70	232
	Gauss-TC	27	293	173	229