
“FASE II DEL PROYECTO DE INSTRUMENTACIÓN DE PAVIMENTOS”

Convenio de Cooperación No. 10 de 2011

INFORME FINAL



ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.

Instituto
Desarrollo Urbano

SUBDIRECCIÓN GENERAL DE DESARROLLO URBANO
SUPERVISIÓN: DIRECCIÓN TÉCNICA ESTRATÉGICA
Calle 22 No. 6 – 70, Bogotá D.C.



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
Carrera 1 No. 18 A – 70 Edificio Pedro Navas, tercer piso. Bogotá D.C.

BOGOTÁ D.C.
ABRIL DE 2013

Contenido

Introducción.....	4
1. Objeto del Proyecto.....	7
2. Alcance del Proyecto	8
3. Entorno del Proyecto.....	9
3.1 Características generales de los tramos instrumentados.....	9
3.1.1 Localización general del tramo de pavimento flexible instrumentado	9
3.1.2 Estructura de pavimento flexible	9
3.1.3 Ubicación de los sensores instalados en el pavimento flexible.....	10
3.1.4. Localización general del tramo de pavimento rígido instrumentado	11
3.1.5. Estructura de pavimento rígido.....	14
3.1.6. Ubicación de los sensores instalados en el pavimento rígido	15
3.2 Sistemas de instrumentación de los pavimentos.....	16
4. Metodología General de Estudio.....	19
5. Actividades de Mantenimiento y Reparación en los Sistemas de Instrumentación	22
5.1. Reparación de las balanzas de carga WIM del punto de instrumentación de la Calle 80 (pavimento flexible)	22
5.2. Reparación de los deformímetros ubicados en las carpetas asfálticas del punto de instrumentación de la Calle 80 (pavimento flexible)	25
5.3. Verificación de los deflectómetros ubicados en las carpetas asfálticas del punto de instrumentación de la Calle 80 (pavimento flexible)	35
5.4. Mantenimiento y verificación de las termocuplas del punto de instrumentación de la Calle 80 (pavimento flexible).....	36
5.5. Seguimiento a las actividades de mantenimiento realizadas en el punto de instrumentación de la Calle 80 (pavimento flexible).....	36
5.6. Otras actividades de reparación esporádica.....	41
5.7. Estado del funcionamiento de los sensores.....	42
6. Procesamiento de la Información Recopilada.....	45
6.1. Procesamiento de las variables estáticas o climáticas.....	46
6.2. Procesamiento de las variables dinámicas	53
7. Análisis de la Información Recopilada	62

7.1. Rangos típicos de las variables estáticas.....	62
7.2. Rangos típicos de las variables dinámicas	63
7.3. Análisis de las variables estáticas	64
7.4. Análisis de las variables dinámicas	87
7.4.1 Espectros de carga.....	87
7.4.2 Correlación de variables dinámicas	104
8. Estudio de Envejecimiento del Pavimento Asfáltico.....	111
8.1. Fórmula de trabajo.....	113
8.2. Criterios de diseño y caracterización de la mezcla asfáltica.....	113
8.3. Caracterización reológica del asfalto recuperado.....	114
8.3.1 Gráficas consolidadas por muestreo en campo (evolución del material en el tiempo).....	115
8.3.2 Resultados consolidados para los diferentes muestreos realizados	120
8.3.3 Gráficas consolidadas por temperatura de ensayo.....	125
8.4. Resultados de caracterización mediante ensayo FTIR.....	132
9. Diseño y Desarrollo de un Modelo Numérico del Comportamiento Dinámico del Pavimento	137
9.1. Módulo Mecánico.....	138
9.1.1. Ecuaciones básicas de comportamiento	139
9.1.2. Ecuaciones de Frontera	142
9.1.3. Condiciones de anisotropía	144
9.1.4. Consideraciones de convergencia del sistema.....	145
9.1.5. Algoritmos de solución del módulo mecánico	145
9.1.4. Simulaciones con base en el módulo mecánico.....	150
9.1.5. Resumen de los resultados obtenidos	173
9.1.6. Análisis de los resultados obtenidos de las simulaciones mecánicas y conclusiones.....	175
9.2. Módulo Térmico	176
9.2.1. Ecuaciones térmicas.....	176
9.2.2. Ecuaciones de Frontera	179
9.2.3. Algoritmos del módulo térmico.....	182
9.2.4. Simulaciones basadas en el modelo térmico.....	184
9.2.5. Resultados de las simulaciones.....	185
9.2.6. Análisis de resultados.....	190
9.3. Acoplamiento de los módulos mecánico y térmico.....	192

9.3.1.	Simulaciones acopladas	193
9.3.2.	Resultados de las simulaciones.....	194
9.3.3.	Análisis de resultados.....	197
10.	Comparación de los Resultados de Campo con los Obtenidos de un Programa Elástico Multicapa	198
10.1.	Simulaciones en pavimento flexible.....	198
10.1.1.	Metodología de análisis	199
10.1.2.	Determinación de la frecuencia de aplicación de carga	199
10.1.3.	Determinación módulos a partir de perfiles de temperatura típicos.....	201
10.1.4.	Cargas empleadas en las simulaciones.....	205
10.1.5.	Caso base de diseño.....	207
10.1.6.	Casos de simulaciones en Alizé.....	212
10.1.7.	Resultados de las simulaciones en Alizé	213
10.1.8.	Comparación entre los diferentes casos simulados y los resultados en campo.....	221
10.1.9.	Consideraciones adicionales	231
10.1.10.	Comentarios finales.....	234
10.2.	Simulaciones en pavimento rígido.....	234
10.2.1.	Cargas empleadas en las simulaciones.....	236
10.2.2.	Casos evaluados en Alizé	237
10.2.3.	Resultados de las simulaciones en Alizé.....	238
10.2.4.	Comparación entre los resultados de las simulaciones y los datos de campo	242
10.2.5.	Comparación para un valor fijo de carga	245
11.	Conclusiones y Recomendaciones	248
12.	Referencias	256
13.	Lista de Anexos	257

Introducción

La práctica de instrumentación de pavimentos es un procedimiento que consiste en incorporar dentro de la estructura de los mismos una cantidad adecuada de equipos y dispositivos que permitan medir de forma precisa la respuesta y el desempeño de los materiales que constituyen el pavimento. Esta práctica se puede realizar en ambientes controlados de carga y ambiente— como en pistas de prueba a escala real—o en tramos de pavimentos en servicio. Mientras que en el primer caso se busca establecer el comportamiento y la respuesta del pavimento ante condiciones que son arbitrariamente determinadas en función de los objetivos de un proyecto de investigación en particular, en el segundo se busca establecer la respuesta del pavimento ante condiciones reales de carga y clima. En términos generales, en el área de la Ingeniería de Pavimentos los sistemas de instrumentación se han empleado principalmente para crear, calibrar y mejorar métodos de diseño de pavimentos tanto rígidos como flexibles, así como para explorar y caracterizar nuevos materiales, simular mecanismos de respuesta bajo diversas configuraciones de carga y ambiente y para analizar la respuesta y el desempeño general de estructuras de pavimento.

Dentro de este contexto, en el año 2009 la Universidad de Los Andes y el IDU ejecutaron el proyecto titulado “Procedimiento para la Instrumentación de Pavimentos”, mediante el contrato 118 de 2009. En su primera parte, el contrato incluyó el desarrollo de una metodología para realizar actividades instrumentación para pavimentos flexibles y para pavimentos rígidos en servicio. La metodología propuesta incluyó las siguientes etapas:

- La metodología para la selección de las variables a medir,
- la determinación de los instrumentos para realizar dichas mediciones y los procedimientos requeridos para la verificación y/o calibración de dichos sensores,
- la determinación de los sistemas de adquisición de datos asociados a los instrumentos seleccionados,
- la metodología para determinar la ubicación de los sensores al interior del pavimento,
- la metodología para realizar las actividades de captura y almacenamiento de la información, y
- la descripción del procedimiento detallado para realizar la instalación de los sensores en campo.

En una segunda etapa, el contrato incluyó la validación en campo de las metodologías propuestas. Para esto, se eligieron dos tramos diferentes de pavimento (flexible y rígido) del sistema de transporte masivo Transmilenio, en los cuales se iba a realizar una rehabilitación completa de la estructura de pavimento. Los tramos seleccionados fueron en la Troncal de la Calle 80 con Estación Escuela Militar, para el caso del pavimento flexible, y en la Autopista Norte con Estación Alcalá, para el caso del pavimento rígido. Una vez seleccionados estos tramos se procedió a instalar, calibrar y a poner a punto los sistemas de instrumentación. En

este proceso se pudo comprobar la validez de las metodologías de instrumentación propuestas y se identificaron aspectos determinantes para garantizar la calidad de la futura operación de los sistemas de instrumentación. Dentro de dichos aspectos se destacan la necesidad de una excelente coordinación con los contratistas a cargo de la construcción (o rehabilitación) del tramo a instrumentar, la importancia de controlar los procesos agresivos de la construcción para evitar la pérdida excesiva de sensores (e.g., compactación de capas asfálticas, vertimiento del concreto en el caso de pavimentos rígidos, etc.), la importancia de realizar actividades básicas de mantenimiento de los equipos y la necesidad de verificar permanentemente la calidad de la captura de la información. El contrato en mención culminó con la entrega del sistema en funcionamiento al IDU en el mes de Abril de 2011.

En cuanto a la durabilidad de los sistemas de instrumentación, las experiencias internacionales mencionan que, en general, éstos tienen una corta vida útil. Por lo tanto, es fundamental contar con un adecuado sistema de administración de los tramos instrumentados con el objetivo de obtener el máximo provecho a la información recolectada. Ante esta realidad, el IDU y la Universidad de Los Andes firmaron en el mes de Enero de 2012 un convenio de cooperación por 14 meses denominado “Fase II del Proyecto de Instrumentación de Pavimentos”. El objetivo principal de este convenio es procesar, interpretar y analizar la información que proveen los sistemas de instrumentación que fueron instalados en campo como parte de la primera fase de este proyecto.

El presente convenio, consta de un total de 6 etapas, las cuales incluyen las siguientes actividades:

- **Etapla 1:** adquisición de la información capturada por los dos sistemas de instrumentación.
- **Etapla 2:** procesamiento y análisis de la información recolectada de los dos sistemas de instrumentación.
- **Etapla 3** (contrapartida de la Universidad): estudio de envejecimiento de carpetas asfálticas en la ciudad.
- **Etapla 4:** desarrollo teórico de un modelo numérico que permita comprender la respuesta mecánica de pavimentos bajo condiciones locales de la ciudad.
- **Etapla 5:** implementación del modelo numérico formulado en la etapa 4.
- **Etapla 6:** emisión de recomendaciones futuras con base en los resultados obtenidos de las cinco etapas anteriores.

Tal como se estipuló contractualmente, durante la ejecución del convenio se entregaron tres informes parciales, en los cuales se reportó el estado de avance de cada una de las etapas descritas con anterioridad. Este documento corresponde al **Informe Final** del convenio, en donde se recopilan los resultados alcanzados durante el desarrollo del proyecto.

1. Objeto del Proyecto

De acuerdo con el convenio suscrito entre el IDU y la Universidad de Los Andes, el objeto del proyecto, dentro del cual se enmarca este informe, es:

“Aunar esfuerzos entre el INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO y la UNIVERSIDAD DE LOS ANDES para desarrollar la FASE II DEL PROYECTO DE INSTRUMENTACIÓN DE PAVIMENTOS”

2. Alcance del Proyecto

Los alcances principales del proyecto son:

- Realizar el monitoreo de la información capturada a partir de los segmentos instrumentados en el marco del proyecto denominado “*Procedimiento para la instrumentación de pavimentos*” (contrato IDU-118 de 2009).
- Realizar el análisis de información necesario de tal forma que se pueda establecer la influencia de los diferentes factores de cargas y clima en el comportamiento de los pavimentos y establecer las diferencias de comportamiento del pavimento en función de los materiales utilizados en su estructura.
- Desarrollar un modelo numérico termo-hidro-mecánico que permita tener en cuenta una gran variedad de factores, tales como: la dinámica de la aplicación de las cargas, las condiciones climáticas externas que afectan el comportamiento del pavimento y los cambios de temperatura en las diferentes capas.

El presente informe se enfoca en resumir las diferentes actividades que se realizaron para dar cumplimiento a los objetivos propuestos.

3. Entorno del Proyecto

3.1 Características generales de los tramos instrumentados

A continuación se presentan las características generales de los dos tramos de pavimento en servicio instrumentados, de los cuales proviene la información que se recopiló y analizó como parte del presente proyecto.

3.1.1 Localización general del tramo de pavimento flexible instrumentado

El tramo de pavimento flexible instrumentado se ubica sobre la avenida calle 80, a la altura de la Escuela Militar (Transmilenio), sobre el carril norte de la calzada sur que provee flujo de los buses articulados en sentido occidente-oriente. En la Figura 3.1 se ilustra el sector referido.



Figura 3.1. Localización general del tramo de pavimento flexible instrumentado.

3.1.2 Estructura de pavimento flexible

La estructura de pavimento flexible corresponde a un tramo rehabilitado en los primeros meses de 2011 y, de acuerdo con la información proporcionada por los constructores, ésta se encuentra compuesta por las capas ilustradas en la Figura 3.2. En la Tabla 3.1 se relacionan las propiedades de los materiales constitutivos de cada capa.

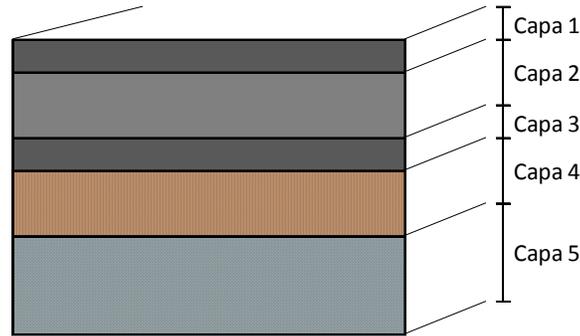


Figura 3.2. Estructura de pavimento flexible instrumentada.

Tabla 3.1. Características de las capas constitutivas del pavimento flexible.

Capa No.	Tipo de capa	Material	Espesor, cm
1	Rodadura	MD-12 Asfalto modificado tipo III	5.0
2	Intermedia	MAM-20 Asfalto modificado tipo V	11.0
3	Intermedia	MD-20 convencional	9.0
4	Base	Material granular estabilizado con asfalto (MGEA)	25.0
5	Material remanente	Granular remanente	55.0

Fuente: Procedimiento para la Instrumentación de Pavimentos. Informe Final. Contrato IDU 118 de 2009. Universidad de los Andes. Bogotá, abril de 2011.

3.1.3 Ubicación de los sensores instalados en el pavimento flexible

En la Figura 3.3 se ilustra el esquema general de la distribución de los sensores implementados para la estructura de pavimento flexible.

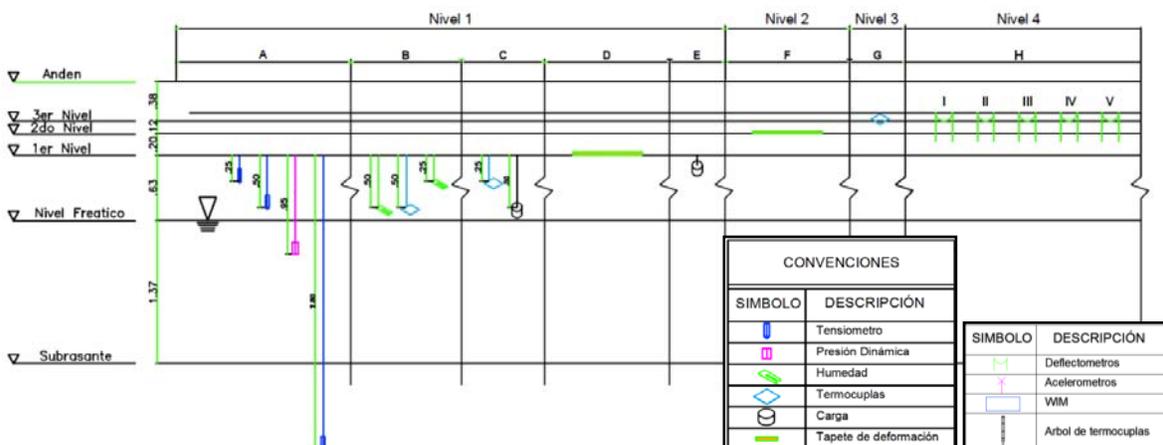


Figura 3.3. Distribución en perfil de los sensores del pavimento flexible.

En la Figura 3.4 se ilustra la posición relativa de los deformímetros implementados en el tramo de monitoreo para el caso del pavimento flexible.

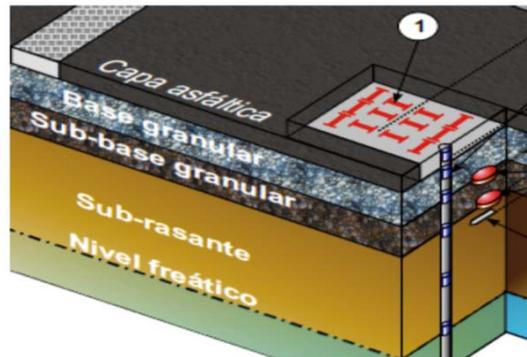


Figura 3.4 Posición relativa de los deformímetros en el pavimento flexible.

3.1.4. Localización general del tramo de pavimento rígido instrumentado

El tramo de pavimento rígido instrumentado como parte de la primera fase de este proyecto se ubicó sobre la Autopista Norte, a la altura de la estación Alcalá (Transmilenio, Calle 137), sobre la calzada occidental. Sin embargo, debido a las actividades de expansión de las estaciones de Transmilenio, el sistema tuvo que ser reubicado en cercanías de la zona previamente señalada.

El nuevo tramo instrumentado se ubica en el carril sólo-bus del costado oriental de la troncal. Este carril permite el flujo de los buses articulados en sentido sur-norte y el sistema se encuentra localizado a pocos metros al sur del puente vehicular de la avenida Calle 134. En la Figura 3.5 se ilustra el sector referido con vista hacia el sur, desde el puente de la Avenida Calle 134. Esta reubicación se realizó durante los primeros meses del primer semestre de 2012.



Figura 3.5. Localización general del tramo de pavimento rígido instrumentado.

A manera de ejemplo, en la Figura 3.6 se muestra la re-instalación de las balanzas de carga dinámica, también conocidas como WIM, y en la Figura 3.7 se muestra la caja de control del sistema con los equipos de adquisición de datos (la misma caja que se empleó en el sistema original).



Figura 3.6. Placas instrumentadas para medida de carga

Así mismo, en las Figuras 3.8 y 3.9 se muestran la estación meteorológica de este punto de instrumentación (cuyo objetivo es medir las variables estáticas o climáticas de la zona circundante al proyecto) y su correspondiente re-instalación en la cubierta del vagón de la estación de Alcalá.



Figura 3.7. Caja metálica con instrumentos de captura de datos. Procedimiento de puesta a punto luego de su conexión al punto de corriente eléctrica.



Figura 3.8. Estación meteorológica.



Figura 3.9. Características de la re-instalación de los sensores ambientales o meteorológicos en la cubierta y al interior del vagón.

3.1.5. Estructura de pavimento rígido

En la Figura 3.10 se ilustra la estructura de pavimento rígido instrumentada.

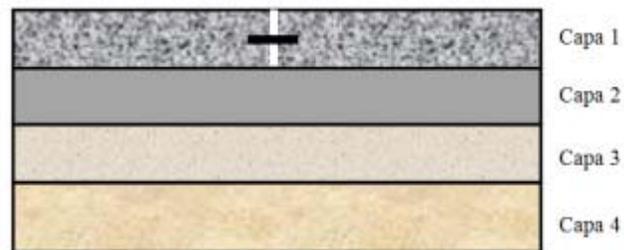


Figura 3.10. Estructura de pavimento rígida usada en la rehabilitación del tramo de instrumentación.

Las características generales de los materiales de cada capa y su espesor se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Características de las capas que conforman la estructura de rehabilitación de pavimento rígido.

No. de Capa	Capa	Tipo de Material	Espesor (m)
1	Losa de Concreto	Concreto Fast-Track	0.25
2	Mezcla Asfáltica	MD 20 Convencional	0.25
3	Base Granular	Material existente	No especificada
4	Estructura existente	No especificada	No especificada

3.1.6. Ubicación de los sensores instalados en el pavimento rígido

En la Figura 3.11 se ilustra la distribución en planta de los sensores instalados en la estructura de pavimento de concreto hidráulico.

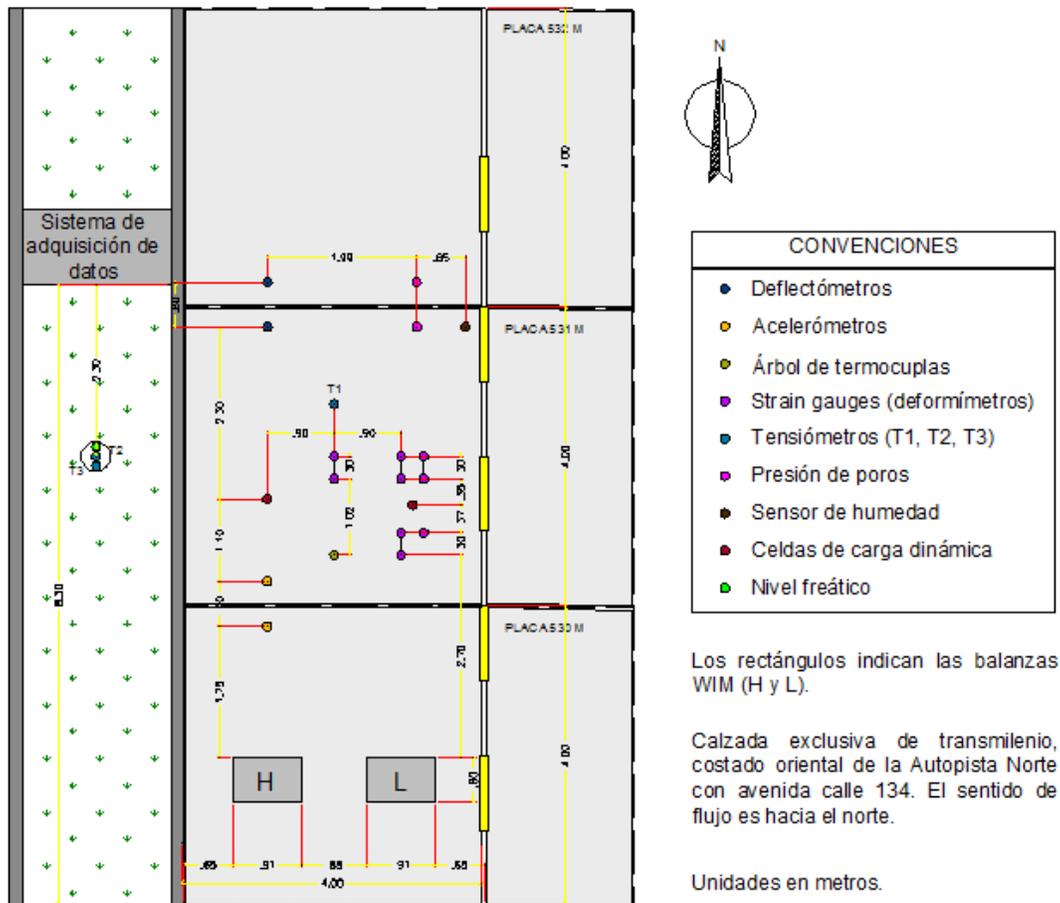


Figura 3.11. Plano en planta con la ubicación de los sensores instalados en el pavimento rígido (Autopista Norte con Estación Alcalá)

3.2 Sistemas de instrumentación de los pavimentos

Las siguientes son las variables consideradas en los dos sistemas de instrumentación:

- *Variables mecánicas o dinámicas:* estas variables incluyen todas aquellas que se relacionan con la respuesta mecánica del pavimento, incluyendo deflexiones, deformaciones a tensión y verticales, acelerómetros, presión vertical de carga, presión de poros dinámica y carga dinámica vertical aplicada en la superficie del pavimento. En este grupo también se puede incluir la información de video digital.
- *Variables estáticas o climáticas al interior del pavimento:* estas variables incluyen temperatura de los materiales, humedad relativa y succión (tensiómetros) en las capas de materiales no cementados.
- *Variables estáticas o climáticas de las condiciones circundantes al proyecto:* estas variables son de tipo meteorológico e incluyen la temperatura del aire, humedad relativa del aire, radiación solar, nivel de precipitación, profundidad del nivel freático.

Las referencias de los sensores y de los equipos de adquisición de datos correspondientes se muestran en la Tabla 3.3. De la misma manera, la Tabla 3.4 presenta los diferentes sistemas utilizados para la captura de las variables instrumentadas.

Tabla 3.3. Información de los sensores empleados.

<i>Tipo de Variable</i>	<i>Nombre del Sensor</i>	<i>Variable a medir</i>	<i>Tipo</i>	<i>Compañía</i>	<i>Referencia</i>
Solicitaciones Ambientales	Sensor de radiación solar	Radiación solar	Estática	Global Water	WE 300
	Sensor de temperatura	Temperatura	Estática	Global Water	WE 700
	Sensor de humedad relativa	Humedad relativa	Estática	Global Water	WE 600
	Pluviómetro	Precipitación	Estática	Global Water	RG 200
Variables Ambientales	Termopares	Temperatura del pavimento	Estática	Omega	WTJ 624
	Sensor de nivel freático	Nivel freático	Estática	Global Water	WL 400
	Tensiómetros	Succión	Estática	Omega	PX 481
	Sensores de humedad	Humedad	Estática	Decagon	EC - 5
Solicitaciones Mecánicas	Acelerómetros	Paso de los vehículos	Dinámica	RIEKER	BDK 3
	Placas instrumentadas de medida de carga	Carga	Dinámica	Omega/Soltec	
	Cámara de Video+Lente	Tipología de los vehículos	Dinámica		Digital PC Camara W-148
Variables Mecánicas	Deformímetros	Deformaciones	Dinámica	Omega	SGD-50/120-LY40
	Deflectómetros	Deflexiones	Dinámica	Waycon	LMI-12-F
	Sensor de esfuerzo vertical	Esfuerzo vertical	Dinámica	Omega	DLC 101 - 500
	Sensor de presión de poros dinámica	Presión de poros	Dinámica	Omega	PX 139

Tabla 3.4. Sistemas de adquisición/captura de datos empleados en el proyecto.

<i>Nombre del Equipo de Adquisición de Datos</i>	<i>Compañía</i>	<i>Referencia</i>	<i>Tipo</i>
Módulos Adam	Advantech	Adam 4019	Estático
	Advantech	Adam 4018	Estático
	Advantech	Adam 4561	Estático
Módulos Compact - DAQ	National Instruments	NI 9205	Dinámico
	National Instruments	NI 9237	Dinámico
	National Instruments	NI 9944	Dinámico
	National Instruments	NI 9234	Dinámico
	National Instruments	Chasis Compact DAQ	Dinámico
Sistema de Captura de Datos Ambientales	Global Water	GL 500 - 7 - 2	Estático
Fuente de Poder	-	-	-
UPS	-	-	-
Computador Industrial	NEXCOM	NISE 100	-

Las características operativas tanto de los sensores como de los sistemas de adquisición de datos se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Relación entre sistemas de adquisición de datos y sensores.

<i>Información del rango de medición de los sensores</i>					<i>Información del Sistema de Adquisición</i>				
<i>Sensor</i>	<i>Compañía</i>	<i>Referencia</i>	<i>Tipo</i>	<i>Rango</i>	<i>Equipo</i>	<i>Marca</i>	<i>Entrada</i>	<i>Salida Análoga</i>	<i>Salida digital</i>
Sensor de radiación solar	Global Water	WE 300	Estático	0 - 1500 W/m ²	GL 500	Global water	0 - 10 V	4 - 20 mA	12 bits
Sensor de temperatura		WE 700	Estático	- 50 - 50 °C	GL 500		0 - 10 V	4 - 20 mA	12 bits
Sensor de humedad relativa		WE 600	Estático	0 - 100 %	GL 500		0 - 10 V	4 - 20 mA	12 bits
Pluviómetro		RG 200	Estático	-	GL 500		0 - 10 V	4 - 20 mA	12 bits
Acelerómetros	RIEKER	BDK 3	Dinámico	± 3 G	NI 9205	National Instrument	0 - 10 V	0 - 10 V	16 bits
Placas instrumentadas de medida de carga	Omega / Soiltec	Strain gage	Dinámico	0 - 7000 kg	NI 9237		0 - 10 V	mV proporcional	24 bits
Árbol de Termopares	Omega	WTJ-624	Estático	0 - 100 °C	Adam 4018	Advantech	-	mV proporcional	16 bits
Termopares independientes		WTJ-624	Estático	0 - 100 °C	Adam 4018		-	mV proporcional	16 bits
Sensor de presión (nivel freático)	Global Water	WL 400 - 030	Estático	0 - 9 m	GL 500	National Instrument	0 - 10 V	4 - 20 mA	16 bits
Tensiómetros para medida de succión	Omega	Px 481 A - 015 V	Estático	-14.7 - 15 psi	NI 9205		0 - 10 V	0 - 5 V	16 bits
Sensores de humedad	Decagon	EC-5	Estático	0 - 100 % de VWC	NI 9205		0 - 10 V	0 - 5 V	16 bits
Deformímetros para concreto asfáltico	Omeg	SGD-50/120-LY40	Dinámico	-	NI 9237		0 - 10 V	mV proporcional	24 bits
Deformímetros para concreto hidráulico		SGD-50/120-LY40	Dinámico	-	NI 9237		0 - 10 V	mV proporcional	24 bits
Deflectómetro dinámico multiprofundidad	Waycon	LMI-12-F	Dinámico	0 - 100 mm	NI 9205		0 - 10 V	0 - 10 V	16 bits
Deflectómetro dinámico simple (pav rígido)		LMI-12-F	Dinámico	0 - 100 mm	NI 9205		0 - 10 V	0 - 10 V	16 bits
Sensores de esfuerzo vertical, pav rígido	Omega	DLC 101 - 500	Dinámico	0 - 250 kg	NI 9234		4 mA	0 - 10 V	24 bits
Sensores de esfuerzo vertical, pav flexible		DLC 101 - 500	Dinámico	0 - 250 kg	NI 9234		4 mA	0 - 10 V	24 bits
Sensores de presión de poros dinámica, rígido	Omega	PX 139	Dinámico	± 100 kPa	NI 9205		0 - 10 V	0 - 10 V	16 bits
Sensores de presión de poros dinámica, asfáltico		PX 139	Dinámico	± 100 kPa	NI 9205	0 - 10 V	0 - 10 V	16 bits	

En la Tabla 3.6 se relacionan los sistemas de captura de datos, referencias y principales características.

Tabla 3.6. Información de los sistemas de captura de datos.

SISTEMAS DE CAPTURA DE DATOS					
<i>Equipo</i>	<i>Compañía</i>	<i>Referencia</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>
Módulos Adam	Advantech	Adam 4019	4	Estático	Convertor A/D Señales en Voltios
		Adam 4018	2	Estático	Convertor A/D Señales en milivoltios y temperaturas
		Adam 4561	2	Estático	Interface de comunicación con el PC
Módulos Compact - DAQ	National Instrument	NI 9205	2	Dinámico	Convertor A/D Señales en Voltios
		NI 9237	4	Dinámico	Lector de Strain Gage
		NI 9944	4	Dinámico	Accesorio para cuarto de puente Strain Gage
		NI 9234	2	Dinámico	Accesorio para cuatro sensores piezoeléctricos
		Chasis Compact DAQ	2	Dinámico	Interface de conexión de módulos y comunicación Pc
Sistema de captura de datos ambientales	Global Water	GL 500 - 7 - 2	2	Estático	Adquisición de señales ambientales
Fuente de poder	-	-	2	-	Alimentación de los sensores
UPS	-	-	2	-	Para cortes de energía
Computador Industrial	NEXCOM	NISE 100	2	-	Almacenamiento de las medidas

Aunque los sensores y equipos de adquisición de datos empleados en los tramos instrumentados fueron los mismos para los dos tipos de pavimentos (Tablas 3.3 a 3.6), la diferencia principal entre los dos sistemas de instrumentación radica en la cantidad y ubicación de cada uno de dichos sensores. En este sentido, es importante recordar que gran parte del éxito de un sistema de instrumentación consiste en definir acertadamente la relación entre el comportamiento mecánico del pavimento y las variables que mejor capturan y/o afectan dicho comportamiento. Este principio es el que justifica que aunque los sensores empleados en los dos sistemas sean similares, su ubicación estratégica dentro de la estructura del pavimento sea diferente y específica de las características propias del comportamiento de cada tipo de pavimento (i.e., flexibles o rígidos).

4. Metodología General de Estudio

La metodología para el desarrollo del presente proyecto consta de las seis etapas mencionadas en la sección de Introducción. A continuación se describe la forma en que se desarrollaron las actividades contempladas en cada una de estas etapas:

Primera Etapa. Adquisición de la información.

Esta etapa incluyó la recolección de la información almacenada en los computadores localizados en los puntos de instrumentación. Esta actividad se realizó de forma periódica con una frecuencia de aproximadamente dos semanas (i.e., cada quince días). En las visitas realizadas a campo para la recolección de la información capturada por los equipos de adquisición de datos y almacenada en los computadores ubicados en las cajas de instrumentación, también se realizó una actividad continua de mantenimiento a los equipos de instrumentación y de verificación de la calidad de la captura de datos. Estas labores dieron como resultado la ejecución de actividades adicionales de reparación de algunos de los sensores. En los informes parciales entregados como parte de este proyecto se realizó una descripción detallada de estas actividades de mantenimiento y/o reparación, las cuales se resumen en una sección posterior de este informe.

Segunda etapa. Análisis de la información.

Esta etapa incluyó dos actividades principales:

1. Post-procesamiento de la información recolectada, y
2. Análisis de la información post-procesada.

La primera actividad resultó ser una de las más retadoras del proyecto. Esto se debe al significativo volumen de la información recolectada, en particular para el caso de las variables dinámicas. Esta situación, sumada a la necesidad de post-procesar la información dinámica empleando principios de análisis de señales, requirió el diseño de una herramienta computacional eficiente y confiable. Esta actividad tomó más tiempo del estipulado inicialmente, pero fue fundamental para llevar a cabo la segunda actividad mencionada.

En la segunda actividad se procedió a estudiar la información capturada por el sistema. Para esto, no sólo se identificaron los rangos típicos que caracterizan las variables de interés medidas en campo, sino que se revisó la existencia o inexistencia de correlaciones entre algunas de estas variables. Específicamente, se analizaron correlaciones entre las variables climáticas externas e internas al pavimento, así como la correlación entre las variables

dinámicas o mecánicas. Los detalles de estas actividades se presentan en el Sección 7 de este documento.

Tercera Etapa. Seguimiento del envejecimiento del asfalto¹.

Esta tercera etapa incluyó la extracción de núcleos de la carpeta asfáltica de un pavimento flexible típico de la ciudad (Avenida 9na con Calle 165) en periodos de 3 meses. Estos núcleos fueron empleados para realizar el estudio reológico y químico del asfalto extraído de la mezcla asfáltica de rodadura. El objetivo de esta actividad era el de determinar la posibilidad de hacer seguimiento a un proceso fundamental relacionado con el desempeño y la durabilidad de los pavimentos: el envejecimiento del asfalto en carpetas de rodadura. Como se explicará en detalle más adelante en la Sección 8 de este informe, aunque el estudio realizado en esta etapa permitió obtener información importante sobre la evolución de la reología del asfalto, sus resultados no fueron concluyentes desde el punto de vista de la evolución del proceso de envejecimiento.

Cuarta Etapa. Desarrollo de un modelo numérico.

Con base en las reuniones realizadas con el equipo del IDU, esta etapa fue subdividida en dos fases diferentes:

1. Formulación e implementación computacional de un modelo termo-hidro-mecánico que permita simular el comportamiento dinámico del pavimento (Sección 9) y,
2. Análisis de la información recolectada en comparación con la información que proveen los programas de análisis elástico multicapa comúnmente usados en el diseño de pavimentos que emplean metodologías mecanicistas (Sección 10).

Mientras que la primera fase es importante desde el punto de vista de desarrollo de nuevo conocimiento en el área de la Ingeniería de Pavimentos, la segunda es particularmente relevante para la verificación de las actividades de diseño de estructuras de pavimento que se realizan en la ciudad.

Quinta Etapa. Simulación del comportamiento de los pavimentos de Bogotá.

Esta fase del proyecto resultó de las actividades realizadas en la cuarta etapa del proyecto, mencionadas con anterioridad.

¹ *Contrapartida a cargo de la Universidad de los Andes.*

Sexta Etapa. Recomendaciones futuras.

Finalmente, la información obtenida durante las etapas anteriores fue empleada para emitir conclusiones y recomendaciones frente a futuras experiencias de instrumentación de pavimentos, así como en cuanto al diseño de las estructuras de pavimento, encaminadas a mejorar su desempeño.

5. Actividades de Mantenimiento y Reparación en los Sistemas de Instrumentación

Como parte integral de las actividades desarrolladas en este proyecto se realizaron dos tipos básicos de actividades de mantenimiento y reparación de los sensores y equipos de los dos puntos de instrumentación:

- Mantenimiento rutinario de los sistemas de instrumentación: estas actividades incluyen la copia de los datos de la información almacenada en los computadores instalados en las cajas de instrumentación y la actividad posterior de borrar dicha información para liberar espacio de almacenamiento. Adicionalmente, estas actividades incluyen la “purga” de los sensores de succión o tensiómetros, los cuales requieren encontrarse en condición de saturación para la toma apropiada de datos.
- Mantenimiento esporádico de los sistemas de instrumentación: estas actividades responden a la necesidad de intervenir los sistemas de instrumentación con el objetivo primordial de recuperar la toma de datos o con el objetivo de realizar medidas de tipo correctivo por dificultades asociadas con interferencias que el sistema de instrumentación podría ocasionar con respecto a la operación regular del sistema de transporte masivo Transmilenio que circula en los dos tramos de interés.

Mientras que las actividades descritas en el primer numeral se consideran de tipo ordinario y no representan un esfuerzo significativo por parte del equipo de trabajo, las actividades descritas en el segundo numeral exigieron la acción eficiente y oportuna del equipo de trabajo de Uniandes y del IDU. A continuación se describen las principales actividades de tipo esporádico que se realizaron en los dos sistemas de instrumentación durante la duración de este proyecto.

5.1. Reparación de las balanzas de carga WIM del punto de instrumentación de la Calle 80 (pavimento flexible)

Durante una evaluación preliminar del estado de los sensores realizada durante los primeros meses del convenio en el punto de instrumentación de la Calle 80 con Escuela Militar, se determinó que dos de los sensores que capturan la sollicitación y la respuesta mecánica del pavimento: 1) las WIM que miden la carga por eje aplicada sobre la estructura, y 2) los deformímetros que miden las deformaciones horizontales en la parte inferior de las capas asfálticas, no se encontraban en funcionamiento. Al respecto, la Universidad concluyó que era valioso intentar la reparación de los sensores correspondientes (i.e., balanzas de medición carga dinámica tipo WIM y deformímetros), con el objetivo de retomar la captura y almacenamiento de estos datos. A continuación se describen las

actividades específicas que fueron realizadas sobre la balanza tipo WIM para recuperar la captura de los datos de carga dinámica aplicada sobre el pavimento.

Debido a su ubicación y naturaleza, las balanzas WIM hacen parte de los sensores a los que se puede acceder de forma no invasiva debido a su ubicación en la superficie del pavimento. El *Manual de Instrumentación de Pavimentos*, el cual se presentó como uno de los productos finales del proyecto 118 de 2009, describe los detalles de otros sensores similares que también se pueden reparar con relativa facilidad en sistemas de instrumentación. La reparación de las balanzas o placas WIM consistió en el reemplazo de los *strain gauges* o deformímetros internos y en la galvanización de la estructura metálica que comprender estos sensores, la cual estaba afectada por corrosión.

El procedimiento general para la reparación y re-instalación de los sensores consistió en 6 pasos principales, tal como se describe a continuación:

- Se retiraron las tapas de las WIM,
- Se evacuó el agua y los sedimentos encontrados al interior de las balanzas (ver Figura 5.1),
- Se retiró el marco existente que, tal como se observa en la Figura 5.2, se encontraba oxidado, así como los sensores y cableado degradados,
- Se procedió a corroborar que hubiera continuidad en los cables de cada una de las dos WIM,
- Se continuó con la ubicación, nivelación y fijación de cada uno de los nuevos marcos al interior de las WIM (Figuras 5.3 y 5.4). Los marcos fueron dotados con nuevos *strain gauges*, actividades que se realizaron en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad, y
- Una vez verificada la continuidad de los sensores con el voltímetro, se procedió a ajustar la tapa de cada una de las balanzas WIM.



Figura 5.1. Limpieza a las balanzas WIM.



Figura 5.2. Aspecto del marco de una de las WIM.



Figura 5.3. Ubicación de los nuevos marcos instrumentados en las WIM.



Figura 5.4. Izq: WIM tapada, centro: marco deteriorado, der: WIM destapada, marco nuevo.

Como se mencionó con brevedad, en el intermedio de estas actividades se realizaron labores en las instalaciones del laboratorio de la Universidad en donde se diseñó, construyó, implementó y calibró el nuevo marco de cada una de las dos balanzas (Figura 5.5). Estos fueron los marcos que fueron posteriormente re-instalados en campo, tal como se indicó en el listado previo de actividades.



Figura 5.5. Nuevos marcos empleados para las balanzas WIM.

Las reparaciones realizadas fueron exitosas y permitieron la re-captura de datos de la carga aplicada por los buses que circulan sobre la vía y en la actualidad las dos balanzas se encuentran reportando datos consistentes.

5.2. Reparación de los deformímetros ubicados en las carpetas asfálticas del punto de instrumentación de la Calle 80 (pavimento flexible)

Como se describió con anterioridad, en la evaluación preliminar del estado de los sistemas de instrumentación se concluyó que los deformímetros o *strain gauges* ubicados en la parte inferior de las capas con material asfáltico del pavimento se encontraban averiados. Mientras que en el caso de las balanzas de carga superficial o WIM la reparación se podía hacer con relativa facilidad debido a que éstas se encuentran en la superficie, la reparación de los deformímetros era más compleja y de carácter invasivo debido a que los sensores originales fueron instalados durante la construcción del pavimento y quedaron embebidos en la estructura. Ante esta situación, la Universidad planteó al IDU la posibilidad de efectuar algunas actividades de reparación de los instrumentos. Aunque estas actividades no habían sido realizadas en el país con anterioridad, la existencia de experiencias internacionales similares que habían sido exitosas eran alentadoras y justificaban el esfuerzo que implicaba emprender estas labores para recapturar estos datos. Así, se solicitó y tramitó un Otrosí al convenio de cooperación No. 10 de 2011, el cual consistió en la aprobación de recursos adicionales destinados a la reparación y reposición de los sensores deteriorados. Una vez realizados los trámites administrativos respectivos, se procedió a la ejecución de estas actividades.

La metodología general de las actividades de reparación de los deformímetros incluyó la extracción de núcleos de las capas asfálticas de la estructura en campo, en los cuales se instalarían nuevos sensores, lo cuales serían nuevamente re-instalados en campo. Vale la pena mencionar que la mitad de los deformímetros inicialmente instalados presentaron daño prematuro durante la construcción del pavimento debido a las condiciones agresivas que debieron soportar durante este proceso (i.e., altas temperaturas, aplicación de carga de maquinaria de construcción sobre los mismos, etc.). Por lo tanto, la instalación de estos sensores de forma posterior a la construcción del pavimentos, siguiendo el procedimiento empleado para la re-instalación de los sensores acá descritos, podría ser una alternativa eficiente a considerar en la ejecución de futuras experiencias de instrumentación de pavimentos flexibles en la ciudad.

En resumen, las actividades incluyeron cinco etapas principales:

- Diseño de las actividades de reparación,
- ejecución de actividades preliminares en campo,
- ejecución de actividades de montaje, instalación y calibración de los sensores en el laboratorio,
- ejecución de actividades para la instalación de los sensores en campo y de la reconexión de los mismos a los equipos de adquisición de datos, y

- verificación del buen funcionamiento del sistema y de la capacidad del sistema para capturar y reportar datos.

Así, la estrategia de reparación consistió en la extracción de cuatro (4) núcleos de 4" de diámetro, localizados sobre la huella izquierda² del carril adyacente al separador central de la calzada sur de uso exclusivo de Transmilenio, al costado oriental de la estación Escuela Militar. En las Figuras 5.6 y 5.7 se ilustra el procedimiento general seguido durante la extracción de los núcleos. Estos núcleos fueron transportados al laboratorio de la Universidad y en su reemplazo se instalaron unas tapas temporales de madera cuyo objetivo era proteger la perforación y evitar la afectación de la movilidad de los buses en el sector (Figuras 5.8 y 5.9). Los núcleos se enumeraron de 1 a 4, de oriente a occidente.



Figura 5.6. Corte de los núcleos de las capas asfálticas – Sistema “Calle 80”.



Figura 5.7. Vista de los 4 núcleos extraídos, en la huella izquierda de la calzada sur – AC 80 (Calle 80).



Figura 5.8. Núcleo falso de madera, para protección temporal de la perforación.



Figura 5.9. Pegado de uno de los núcleos falsos de madera con silicona roja.

² Las perforaciones se localizaron a 97 centímetros del borde del andén, equidistantes uno del otro cada 30 centímetros.

En la Tabla 5.1 se relacionan los espesores de los núcleos extraídos para la instrumentación.

Tabla 5.1. Espesores de los núcleos extraídos.

Núcleo No.	Espesor o altura media (cm)
1	28.0
2	29.5
3	22.5
4	29.0

Una vez en el laboratorio, los núcleos fueron cortados por capas, discriminando la carpeta de rodadura de las otras dos capas asfálticas subyacentes. Posteriormente, en el laboratorio de la Universidad se realizó un primer ensayo con uno de los núcleos extraídos (numerado como “3”) para poner en práctica y evaluar la validez del procedimiento diseñado.

Las Figuras 5.10 y 5.11 permiten ilustrar el proceso de instrumentación realizado en el laboratorio. Este procedimiento consistió en lo siguiente:

- Establecer puntos de referencia para el posterior armado del núcleo en condiciones lo más cercanas posibles a las iniciales del testigo. En la Figura 5.10 se identifica una línea roja marcada sobre la garolita para la posterior identificación de la dirección de los sensores de deformación unitaria en el sentido de avance del flujo vehicular.
- Cortar el núcleo por capas de distinto material, es decir en un total de 3 capas. En la Tabla 5.2 se relacionan los espesores o altura de cada una de las capas cortadas.

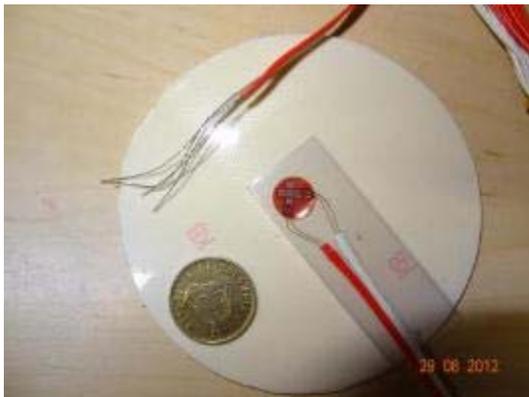


Figura 5.10. Garolita y strain gauges.



Figura 5.11. Pegado de sensores al núcleo.

Tabla 5.2. Espesores de las capas cortadas en los núcleos a instrumentar.

Núcleo No.	Capa	Alturas iniciales por capa, cm	Profundidad (espesor acumulado) inicial, cm	Altura capa cortada, cm	Profundidad (espesor acumulado) cortada, cm
1	1	8.8	8.8	8.7	8.7
	2	12.6	21.4	12.2	20.9
	3	6.4	27.8	6.8	27.7
2	1	9.0	9.0	8.9	8.9
	2	11.4	20.4	10.9	19.8
	3	8.6	29.0	8.7	28.5
3*	1	9.1	9.1	8.9	8.9
	2	12.3	21.4	12.2	21.1
4	1	9.0	9.0	9.0	9.0
	2	13.2	22.2	12.7	21.7
	3	6.8	29.0	6.8	28.5

* El núcleo No. 3 fue utilizado como espécimen de ensayo del procedimiento de instrumentación en laboratorio, debido al daño de la capa inferior en el proceso de extracción.

- Preparar discos de un material de consistencia similar a la de la mezcla asfáltica y que permitieran la instalación de los sensores de deformación unitaria. En este caso se usaron discos de garolita de diámetro ligeramente menor a 4" (Figura 5.10).
- Pegar los sensores a los discos de garolita en el centro del disco por la cara sintética del mismo empleando silicona.
- Una vez seca la silicona y una vez fijados los sensores al disco, identificar los cables que transmiten los datos de cada uno de los sensores. Para este fin se estableció el siguiente código:
 $A - B - X$, donde: A es un número que identifica la capa instrumentada siendo 1 la superior, 2 y 3 las capas subyacentes; B es un número que identifica cada uno de los núcleos instrumentados (4 núcleos); y X es una letra que identifica para mayor seguridad cada uno de los dos deformímetros que se encuentran por set (2 deformímetros cruzados por nivel), pudiendo ser W para identificar el cable blanco y R para identificar el cable rojo, lo cual permite determinar más adelante a cuál de las dos lecturas por nivel pertenecen a las deformaciones unitarias paralelas y perpendiculares al flujo vehicular.
- Pegar con epóxico cada una de las dos garolitas instrumentadas (por núcleo) a la parte inferior de la capa de rodadura y de la capa asfáltica intermedia, con el ánimo de medir las deformaciones a tensión en las fibras inferiores de estas dos capas asfálticas.
- Localizar cada una de las 3 capas del núcleo sobre un marco metálico, con el ánimo de pegar las 3 partes del conjunto, utilizando también epóxico.
- Finalmente, para ajustar adecuadamente cada una de las capas y disminuir los espacios vacíos de las interfaces, aplicar una carga moderada con ayuda de dos prensas manuales, teniendo cuidado de no dañar los componentes incorporados a los testigos del pavimento (Figura 5.12).



Figura 5.12. Pegado de las capas del núcleo instrumentado.

- Permitir el secado del sistema por 36 horas con el fin de asegurar la efectividad del epóxico.

Una vez culminada la etapa de fabricación del espécimen con los sensores, el núcleo de prueba fue llevado a la máquina universal MTS (Material Testing Machine) del laboratorio de Estructuras y Materiales la Universidad con el ánimo de hacer pruebas ante cargas similares a las que se enfrentarán los núcleos una vez puestos en la vía. La Figura 5.13 presenta el montaje correspondiente.



Figura 5.13. Ensayo del núcleo instrumentado en la MTS.

Los resultados obtenidos durante estas pruebas de verificación fueron satisfactorios ya que los sensores instrumentados registraron con claridad los pulsos de carga aplicados con la MTS. La importancia de este resultado es que sirve de apoyo a la hipótesis de que el procedimiento

puede ser utilizado para la extracción de datos de deformación unitaria ante el tráfico vehicular real. Las Figuras 5.14 a 5.20, permiten identificar el comportamiento del núcleo instrumentado (# 3) y ensayado en laboratorio bajo carga repetitiva para el cual se midieron las deformaciones unitarias soportadas por capa.

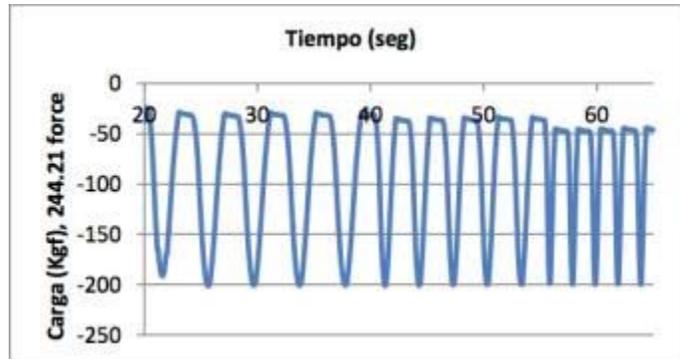


Figura 5.14. Carga cíclica aplicada al espécimen de prueba

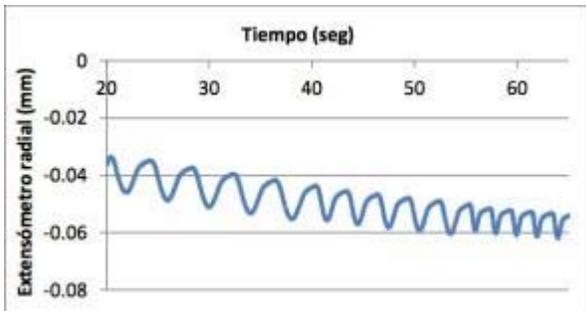


Figura 5.15. Deformación registrada por el extensómetro radial (mm)

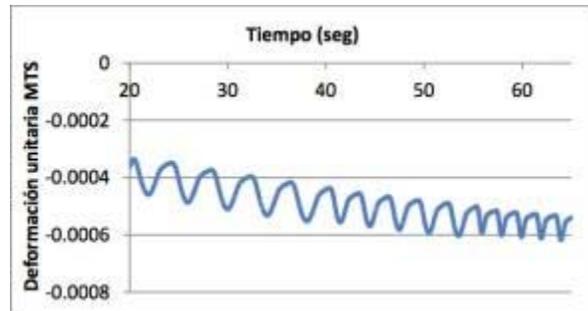


Figura 5.16. Deformación unitaria obtenida con la MTS.

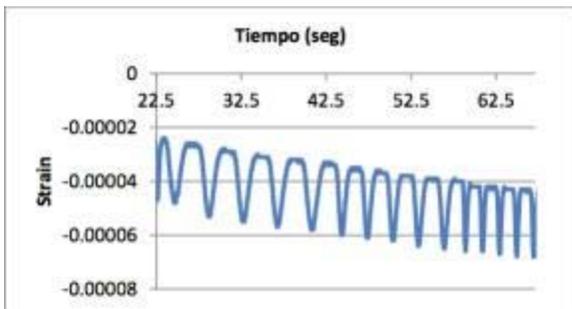


Figura 5.17. Deformación unitaria, capa 1 – eje 1.

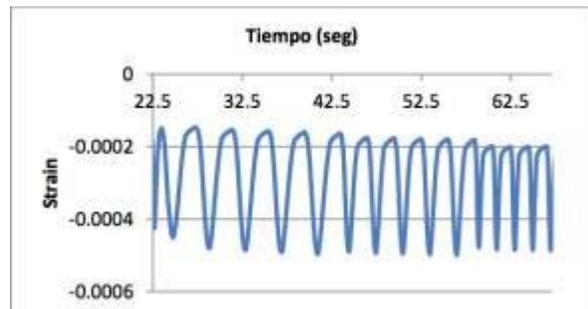


Figura 5.18. Deformación unitaria, capa 1 – eje 1.

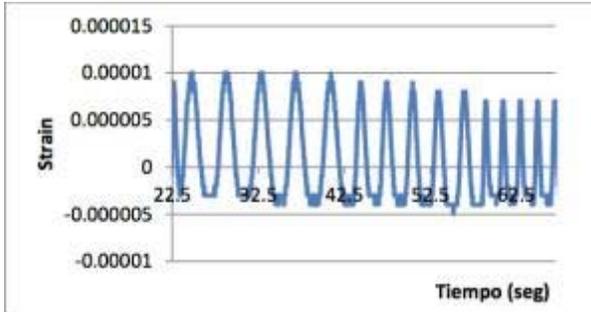


Figura 5.19. Deformación unitaria, capa 2 – eje 1.

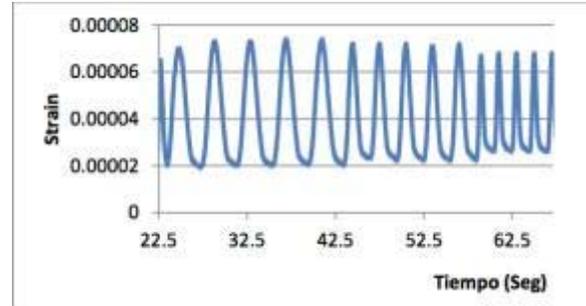


Figura 5.20. Deformación unitaria, capa 2 – eje 2.

Una vez se verificó que el montaje en laboratorio era satisfactorio, se procedió a realizar la instalación de los sensores en los otros tres núcleos siguiendo el procedimiento previamente descrito. Al finalizar dicha actividad, se continuó con la etapa de re-instalación de los especímenes en campo. Para esto, se realizó un cierre del carril norte de la calzada sur que opera en sentido occidente – oriente de la calzada exclusiva de Transmilenio durante los días viernes 31 de Agosto y sábado 1 de Septiembre de 2012. El procedimiento empleado para la instalación de los sensores en campo fue el siguiente:

- Se retiraron los núcleos falsos de madera que habían sido dejados provisionalmente para protección de las perforaciones realizadas.
- Se trazó una línea guía con ayuda de una tiza, que permitió alinear los *strain gauges* en dirección paralela al flujo vehicular e, indirectamente, aquellos ubicados previamente de forma perpendicular. Adicionalmente, se proyectaron líneas de guía para realizar un corte superficial en la carpeta de rodadura por donde se conduciría el cableado de los deformímetros hasta la caja de adquisición de datos, tal como lo muestra la Figura 5.21.



Figura 5.21. Planeación de la disposición final en campo de los núcleos instrumentados.

- Una vez se secó el epóxico utilizado para pegar las capas, se midieron los espesores finales de los núcleos instrumentados, los cuales se reportan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Espesores finales de las capas en los núcleos instrumentados.

Núcleo No.	Capa 1 (Superior)	Capa 2 (Intermedia)	Capa 3 (Fondo)
1	9.0	21.4	27.7
2	9.0	20.4	29.4
3	9.3	21.6	-----
4	9.2	22.3	28.3

- Se procedió a utilizar el núcleo 3 (especimen de prueba) para ensayar el proceso de instalación de los núcleos en su respectiva perforación. Se observó (tal como se corrobora en la Tabla 5.2 y en la Tabla 5.3) que los espesores iniciales no se alteraron sustancialmente frente a los obtenidos al final de la instrumentación. La Figura 5.22 muestra la preparación del espécimen de prueba (#3) para su instalación.



Figura 5.22. Núcleo # 3 (especimen de prueba). Alistamiento de su instalación.

- Se preparó el mortero epóxico³ para el fijado de los núcleos en su posición final y se procedió a instalar el núcleo en su posición original (Figuras 5.23 y 5.24).

³ Mortero epóxico sin contracción para anclajes y rellenos de precisión. SikaGrout-200/212.



Figura 5.23. Preparación del mortero epóxico.



Figura 5.24. Instalación del núcleo de prueba.

- Una vez se identificaron los aciertos y las deficiencias en la instalación del núcleo de prueba, se procedió a la instalación de los tres (3) núcleos restantes en su perforación respectiva y con la alineación planeada. El cableado se condujo a través de las ranuras previamente realizadas en la carpeta de rodadura, tal como se observa en la Figura 5.25.
- Antes de cerrar las zanjas se procedió a verificar que el sistema reportara la lectura de datos en los sensores instalados.
- Para el sellado e impermeabilización de las zanjas abiertas en la rodadura para el cableado, se utilizó un sello de arena-emulsión de consistencia fluida y granulometría fina, para facilitar su acomodamiento en las ranuras o zanjas (Figura 5.26).



Figura 5.25. Instalación de núcleos y cableado.



Figura 5.26. Sellado e impermeabilización de las ranuras de cableado.

- Los cables conectados a los sensores de los núcleos se llevaron a través de una zanja adicional abierta por el sardinel y el andén hasta la caja de adquisición de datos localizada en el separador central. En el sardinel y en el andén se utilizó el mismo mortero epóxico utilizado para pegar los núcleos, para sellar la zanja.

- Finalmente, el cierre del carril afectado se mantuvo por 18 horas más para garantizar el rompimiento y curado de la emulsión asfáltica y para evitar que el paso temprano de vehículos afectara la integridad física de los núcleos instalados. El aspecto final de los núcleos instalados y el cerramiento realizado se ilustran en las Figuras 5.27 y 5.28.



Figura 5.27. Aspecto final de los núcleos instalados y las zanjas de cableado.



Figura 5.28. Fotografía panorámica del cierre implementado para garantizar curado.

La disposición final de los deformímetros instrumentados en los núcleos del pavimento flexible se registra en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Disposición final de los deformímetros instrumentados.

No. Strain Gauge	Canal	Código*	Núcleo No.	Capa	Posición vs. tránsito
1	0	1U-R	1	Superior	Alineado
2	1	1U-W			Perpendicular
3	2	1D-R		Inferior	Alineado
4	3	1D-W			Perpendicular
5	4	2U-R	2	Superior	Alineado
6	5	2U-W			Perpendicular
7	6	2D-R		Inferior	Alineado
8	7	2D-W			Perpendicular
9	8	3U-R	3**	Superior	Alineado
10	9	3U-W			Perpendicular
11	10	4U-R	4	Superior	Alineado
12	11	4U-W			Perpendicular
13	12	4D-R		Inferior	Alineado
14	13	4D-W			Perpendicular

* R: red (rojo), W: White (blanco). U: up (arriba), D: down (abajo).

** Se conectaron solamente los strain gauges de la capa superior, debido al # de canales del sistema, además teniendo en cuenta que se trata del núcleo de pruebas.

5.3. Verificación de los deflectómetros ubicados en las carpetas asfálticas del punto de instrumentación de la Calle 80 (pavimento flexible)

Con el objetivo de determinar el estado de los deflectómetros localizados en el punto de instrumentación de la Calle 80 (pavimento flexible) se decidió aprovechar el cerramiento realizado para las actividades de reparación de tipo invasiva de los deformímetros (sección 5.2) para realizar una prueba de verificación del funcionamiento de los mismos. La motivación para realizar esta verificación resultó de la observación de que sólo 2 de los 5 deflectómetros inicialmente instalados se encontraban reportando datos, por lo que se quería evaluar la factibilidad de su reparación. Sin embargo, el proceso resultó retador debido a la corta longitud de los cables de transmisión de datos y a la degradación normal que éstos han sufrido por estar embebidos en la estructura de pavimento. Así, se determinó que la fragilidad del cableado implicaba un alto nivel de riesgo de daño durante la exploración de los sensores y que no se justificaba emprender actividades de reparación de estos sensores considerando las bajas probabilidades de éxito de las mismas.

No obstante, se realizó una prueba con el deflectómetro # 5, localizado al extremo oriental del sistema y anclado a la capa asfáltica intermedia (con una profundidad del tubo de referencia de 3.22 metros, aproximadamente, Figuras 5.29 y 5.30). Una vez superados algunos inconvenientes como la ruptura del cable de transmisión de datos y la modificación del nivel de referencia del tubo guía, se realizó el ajuste del deflectómetro, se condujo una zanja para el cableado hasta la caja de adquisición de datos, y se siguió el mismo procedimiento para el sellado de las zanjas realizadas para los *strain gauges*. El procedimiento no tuvo éxito, por lo cual, el grupo de trabajo tomó la decisión de no intervenir los demás deflectómetros.



Figura 5.29. Deflectómetro 5 destapado.



Figura 5.30. Deflectómetro 5 retirado de su perforación.

5.4. Mantenimiento y verificación de las termocuplas del punto de instrumentación de la Calle 80 (pavimento flexible)

Durante el análisis preliminar de los datos ambientales al interior del pavimento se observó que existían algunas dificultades con el número real de sensores de temperatura que el sistema se encontraba reportando. Por esta razón, se planeó una actividad para verificar la ubicación y el funcionamiento de las termocuplas existentes en el pavimento. La verificación del sistema de adquisición de datos permitió corroborar la existencia de siete (7) termocuplas instaladas en el tramo instrumentado. La Tabla 5.5 presenta el estado en el que se encontró cada una de las termocuplas existentes en el sistema.

Tabla 5.5. Relación de termocuplas y estado de las mismas.

No.	Canal	Código	Rango Temp (°C)*	Temp Prom (°C) ADAM*	Estado
1	0	AT1-F	5 – 6	6.4	Funcionamiento dudoso
2	1	AT2-F	-292	14.09	No funciona
3	2	AT1F	16 – 17	16.11	Funciona
4	3	N.D.	14 – 16	14.3	Funciona
5	4	AT3R	18 – 19	17	Funciona
6	5	T1R	- 19	-11.4	No funciona
7	6	T3F	- 5	0	No funciona

* Lecturas con el voltímetro.

** Lecturas tomadas desde el sistema de adquisición de datos.

Con base en los resultados de las actividades de verificación de estos sensores se pudo concluir que de las siete (7) termocuplas existían tres (3) dañadas, tres (3) en buen estado y reportando datos consistentes, y la restante con dudas en su funcionamiento debido a que la magnitud de la temperatura era notablemente más baja que las demás.

5.5. Seguimiento a las actividades de mantenimiento realizadas en el punto de instrumentación de la Calle 80 (pavimento flexible)

Una vez finalizadas las actividades de reparación y verificación descritas en las secciones 5.1 y 5.2 se realizó un seguimiento y monitoreo del estado de los sensores y de la información capturada. En general, se verificó que justo después de las reparaciones realizadas los sensores funcionaron de manera apropiada. Esto se puede comprobar a partir de las gráficas que se presentan a continuación, las cuales corresponden a datos capturados unos días después de las labores de reparación. Las Figuras 5.31 a la 5.38, registran las deformaciones unitarias (DU), las deflexiones y la carga aplicada correspondientes al paso de dos vehículos articulados de Transmilenio en un lapso de tiempo capturado de 1 minuto, hacia el mediodía del

02 de Septiembre de 2012. Los detalles de las metodologías para el procesamiento de las variables estáticas y dinámicas que permiten obtener información como la ejemplificada en estas gráficas se presentan en secciones posteriores de este informe.

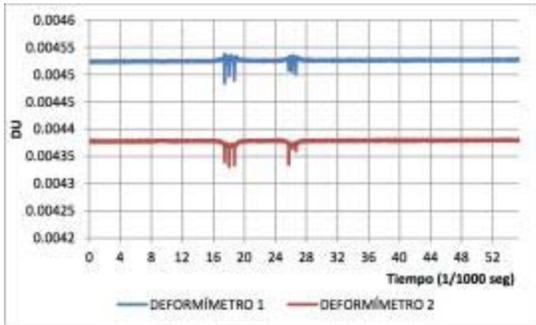


Figura 5.31. Núcleo 1, fibra inferior de la capa superior.

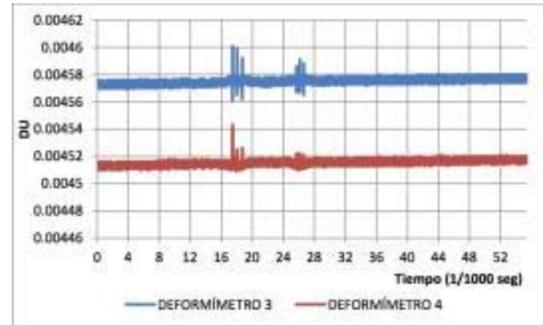


Figura 5.32. Núcleo 1, fibra inferior de la capa inferior.

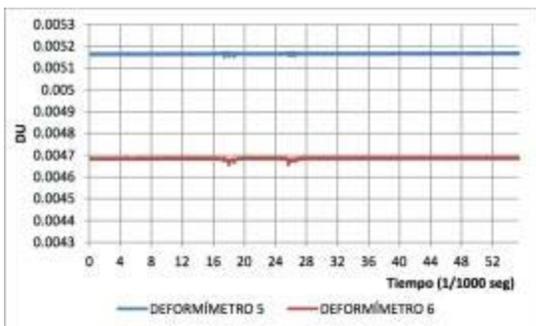


Figura 5.33. Núcleo 2, fibra inferior de la capa superior.

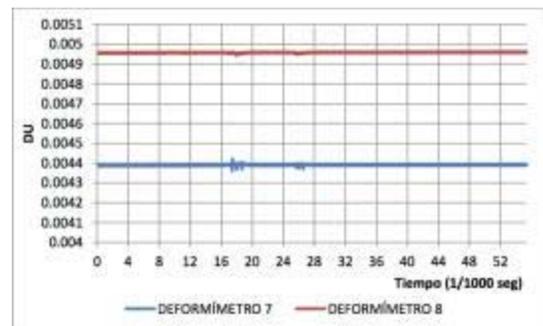


Figura 5.34. Núcleo 2, fibra inferior de la capa inferior.

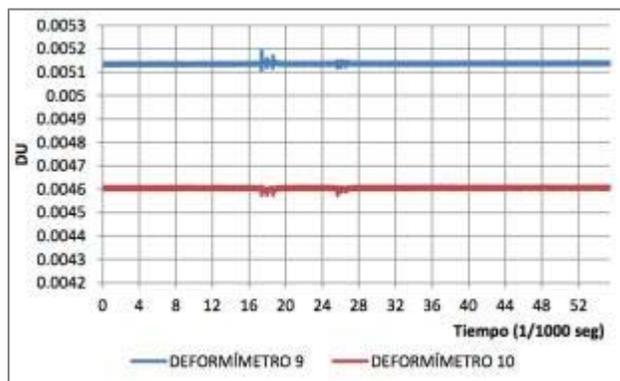


Figura 5.35. Núcleo 3, fibra inferior de la capa superior.

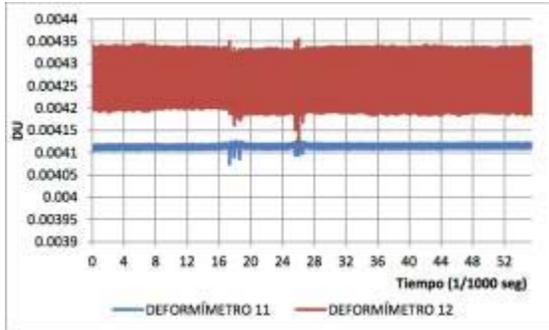


Figura 5.36. Núcleo 4, fibra inferior de la capa superior.

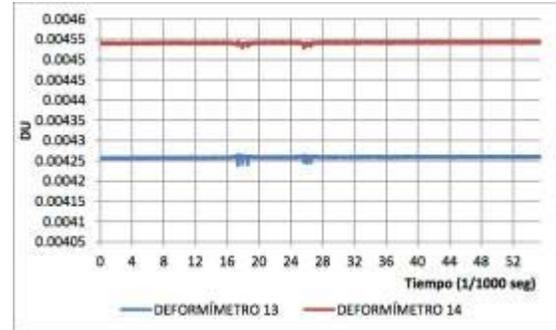


Figura 5.37. Núcleo 4, fibra inferior de la capa inferior.

De la misma forma, en la Figura 5.38 se ilustra el paso de los mismos dos vehículos en el mismo tiempo de análisis. En esta figura se pueden identificar claramente cada uno de los tres ejes para ambos buses.

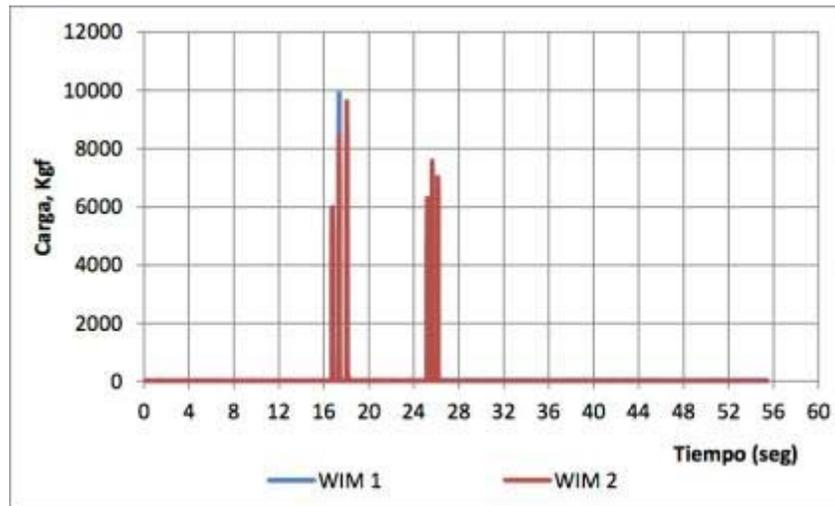


Figura 5.38. Lecturas de las WIM al paso de dos buses articulados.

No obstante la buena calidad de los datos capturados después de las actividades de reparación, se observó que los sensores de deformación unitaria o deformímetros dejaron de reportar datos válidos rápidamente (i.e., un mes después de las reparaciones). Por esta razón, el éxito de las reparaciones se puede considerar muy exitoso para el caso de las balanzas de carga, pero bastante limitado para el caso de los deformímetros. Se especula que la razón de pérdida de señales válidas se pudo deber a una pérdida de liga o adhesión en la unión que existe entre la placa (garolita) a la cual se adhirió el sensor y el espécimen, en cada uno de los niveles de los núcleos instrumentados. Dicha pérdida de adhesión se puede deber a las

exigencias mecánicas impuestas sobre el sistema espécimen-placa de garolita por el paso repetido de vehículos. Si bien en laboratorio se determinó que el sistema funcionaba apropiadamente, esta conclusión se obtuvo luego de sujetar al espécimen a una muy corta exposición de ciclos de carga.

Por lo tanto, si en el futuro esta técnica de reparación de sensores va a ser empleada en sistemas de instrumentación, ésta debe ser mejorada para tratar de evitar la existencia de materiales adicionales entre los sensores y el espécimen (i.e., placas de garolita). Esto se podría lograr mediante el pegado directo de los deformímetros al espécimen, con la dificultad de que el tamaño mínimo de los deformímetros debe ser tal que garantice que la lectura del sensor es una medida apropiada del material compuesto (i.e., de la mezcla asfáltica) y no de la respuesta de una de sus fases constitutivas (los deformímetros empleados en esta oportunidad eran de pequeño tamaño y podrían quedar pegados contra un agregado, con lo que se mediría la respuesta del agregado y no de la mezcla asfáltica). En resumen, la principal conclusión que se puede obtener de esta experiencia es que la reparación de los sensores no produjo el nivel de éxito esperado. Sin embargo, el equipo de trabajo considera que la información parcial recolectada durante los días posteriores a la reparación fue fundamental para llevar a feliz término los objetivos del proyecto. Como se presentará en las siguientes secciones, esta información se empleó para determinar las correlaciones entre las condiciones de carga impuestas al pavimento y la respectiva respuesta de la estructura, así como en las modelaciones numéricas realizadas.

Por otra parte, es importante mencionar que aun cuando los sensores presentaron un buen comportamiento inicial como resultado de las actividades de intervención realizadas, el sistema de captura y almacenamiento general de datos de las variables dinámicas presentó inconvenientes de carácter intermitente desde el momento en que se realizó la reinstalación del sistema. Estos inconvenientes, cuya causa se cree que se relacionaba con en el software de captura y almacenamiento pero cuyo origen específico no se pudo identificar con exactitud, consistieron en que se guardaban los archivos con el nombre y el encabezado apropiados pero sin lecturas o contenido, aun cuando existía la certeza de que los sensores se encontraban tomando y reportando lecturas. La Tabla 5.6 resume el estado del sistema y las acciones realizadas durante el 5 y el 22 de Septiembre de 2012 como consecuencia de las dificultades observadas.

Tabla 5.6. Seguimiento a la información de variables dinámicas capturadas.

Fecha extracción	Días de información útil	No. días	Útil	Problema identificado	Acciones de mejora	Resultado observado
05-sep-2012	01 a 02 sep 2012	3	Sí	Archivos sin datos	Reiniciar sistema	El sistema captura datos nuevamente
	03 a 04 sep 2012		No			
	05-sep-2012		Sí			
11-sep-2012	06-sep-2012	1	Sí	Archivos sin datos	Reiniciar sistema	El sistema captura datos nuevamente
	07-sep-2012	1	No			
	08-sep-2012	1	Sí			
	09 a 10 sep 2012	2	No			
	11-sep-2012	1	Sí			
15-sep-2012	12 a 14 sep 2012	3	No	Archivos sin datos. PC lento.	Reiniciar sistema	El sistema captura datos nuevamente
	15-sep-2012	1	Sí			
16-sep-2012	16-sep-2012	Parcial	No	Archivos sin datos. PC lento.	Mantenimiento en campo. Ajuste del software.	El sistema captura datos nuevamente
19-sep-2012	16-sep-2012	Parcial	Sí	Posible virus, archivos sin datos	Se hizo mantenimiento al PC en la Universidad, antivirus	El sistema captura datos nuevamente
	17-sep-2012	1	No			
	18-sep-2012	1	Sí			
	19-sep-2012	Parcial	Sí			
21-sep-2012	20 a 21 sep 2012	2	No	Sistema apagado	Reiniciar el sistema	El sistema captura datos nuevamente
22-sep-2012	21 a 22 sep 2012	2	Sí	Ninguno	Ninguna	N.A.
01-nov-2012	11 a 24 oct 2012	13	Parcial	Archivos sin datos	Reiniciar sistema	El sistema captura datos nuevamente
07-nov-2012	01 a 07 nov 2012	7	Sí	Archivos sin datos	Reiniciar sistema	El sistema captura datos nuevamente
05-dic-2012	07 nov 2012	1	Sí	Archivos sin datos. PC lento. No almacena información.	Reiniciar sistema. Mantenimiento en campo. Ajuste del software.	El sistema captura datos por pocos días.
	08 nov a 05 dic 2012	28	No			
18-ene-2013	05 dic a 08 dic 2012	4	Sí	Archivos sin datos	Mantenimiento rutinario, reinicio, limpieza.	Se reporta falla total del sistema en captura de datos
	09 dic 2012 a 18 ene 2013	40	No			
26-ene-2013	18 a 26 ene 2013	8	No	Archivos sin datos	Se hizo limpieza de archivos de configuración del software. Se reprogramó y compiló nuevamente la aplicación.	El sistema captura datos nuevamente

El sábado 26 de Enero de 2013 se realizó una nueva revisión detallada del sistema. En esta visita se revisó el software y se borraron archivos del sistema que podían estar entorpeciendo la captura apropiada de datos. Luego de reiniciar los equipos se comprobó que el sistema estaba reportando datos. Una visita al punto de instrumentación el martes 29 de Enero de 2013 confirmó que el sistema continúa almacenando datos de forma apropiada y desde entonces no se volvieron a reportar dificultades.

5.6. Otras actividades de reparación esporádica

Adicionalmente a las actividades descritas en las secciones 5.1 a 5.4, las siguientes fueron otras actividades de reparación de equipos realizadas durante el proyecto:

- Reparación de las balanzas de carga dinámica superficial o WIM en el sistema de pavimento rígido de la estación Alcalá. Estas actividades consistieron en configurar el sistema de acuerdo a la experiencia positiva registrada en el sistema de pavimento flexible (calle 80). Para esto, se cambiaron las celdas de carga inicialmente instaladas por *strain gauges* en las estructuras de las balanzas. Esto incluyó conectar los nuevos sensores al sistema de adquisición de datos, realizar ajustes en el software de adquisición de datos y ajustar las variables de salida en los reportes de captura de datos.
- Reparación de las tapas de las balanzas de carga dinámica superficial o WIM en el sistema de pavimento flexible de la Calle 80. En este caso, las balanzas se encontraban funcionando apropiadamente pero se observó que las tapas metálicas superficiales estaban parcialmente sueltas. Esta condición puede interferir con la operación de los buses articulados cuando circulan encima de las mismas. Por esta razón, se realizó una visita el día 26 de Diciembre de 2012 en la que se procedió a soldar la tapa metálica al resto de la balanza.
- Instalación del sensor de velocidad de viento. Durante el periodo mencionado se procedió a instalar un sensor para medir la velocidad del viento. Dicho sensor se ubicó como parte de la estación meteorológica existente en la cubierta de la estación de la Calle 80 con Estación Escuela Militar. El cableado fue conducido hasta la caja de equipos ubicada al interior de la estación y el software de adquisición de datos fue modificado con el objetivo de capturar la información del nuevo sensor. Estas actividades se realizaron el 7 de noviembre de 2012.
- Modificación de la variable de calibración de los tensiómetros en Calle 80 como parte de los resultados obtenidos en las actividades de mantenimiento del día 7 de noviembre de 2012. En esta visita se identificó el correcto funcionamiento de estos sensores. Sin embargo, ante la evidencia de datos con magnitudes comparativamente disparejas, se procedió a la corrección de las variables de calibración.

- Evaluación de las tapas de las balanzas WIM del sistema de la estación Alcalá. El 11 de Marzo de 2013 Transmilenio informó que la tapa de una de las balanzas se encontraba suelta y podía generar inconvenientes en la buena operación y seguridad del sistema. El equipo de la Universidad realizó inmediatamente una visita al sitio para hacer un diagnóstico de la situación. La conclusión de dicho diagnóstico fue que se había perdido la rosca en el marco de la balanza, lo que hacía imposible el re-ajuste de los tornillos de la tapa metálica. Después de analizar las diferentes alternativas para su reparación, se concluyó que lo mejor era realizar una intervención que permitiera una solución de mediano o largo plazo a esta dificultad, aun cuando esto implicara la pérdida de la toma de datos. Debido a que el convenio consideraba la toma y análisis de datos hasta el 31 de Enero de 2013 y que el contrato finaliza el 31 de Marzo de 2013, se informó al IDU de la situación y se propuso realizar un *plasteo* sobre la caja metálica empleando mezcla asfáltica. Luego de la aprobación del IDU se informó a Transmilenio sobre esta posibilidad,. Transmilenio se ofreció a realizar dicha actividad como parte de las actividades de mantenimiento que la entidad viene desarrollando. En comunicaciones posteriores, Transmilenio solicitó la opinión de Universidad con respecto a la posibilidad de soldar la tapa al marco de la balanza. La Universidad informó que esta opción es apropiada siempre y cuando se realice con un experto soldador y enfatizó en la necesidad de realizar un seguimiento a la soldadura debido a que las altas exigencias de carga de la zona hacen probable que ésta se pierda en el mediano plazo. Como resultado final de esta eventualidad, Transmilenio amablemente le comunicó a la Universidad que la empresa se haría cargo de realizar las reparaciones pertinentes.

5.7. Estado del funcionamiento de los sensores

La Tabla 5.7 muestra el estado actual (a Marzo 15 de 2013) del funcionamiento de los sensores en cada uno de los pavimentos. En esta tabla se presenta la pérdida total de los sensores que se ha identificado en cada uno de los sistemas. Sin embargo, es importante recalcar que dicha pérdida ha sido paulatina a lo largo del tiempo de servicio de los sensores.

Tabla 5.7. Estado actual de funcionamiento de los dos sistemas de instrumentación.

Sensor	Variable	Número de sensores en Pavimento			
		Flexible		Rígido	
		Número original de sensores	En funcionamiento	Número original de sensores	En funcionamiento
Radiación Solar	Radiación solar	1	1	1	1
Temperatura	Temperatura	1	1	1	1
Humedad Relativa	Humedad Relativa	1	1	1	1
Precipitación	Precipitación	1	1	1	0
Velocidad viento	Velocidad de viento	1	1	0	0
Termopares	Temperatura interna del pavimento	5	3	5	5
Nivel freático	Nivel freático	1	1	1	1
Tensiómetros	Succión de suelos	5	5	3	2
Humedad	Humedad natural de los suelos	2	2	1	0
Acelerómetros	Señal de paso de vehículos	2	0	2	1
Balanzas de Carga-WIM	Carga aplicada en superficie	2	0	2	0
Cámara de video	Tipología de vehículos	1	1	1	1
Deformímetros	Deformaciones unitarias	12**	0	14	0
Deflectómetros	Deflexiones	5	0	2	1
Celda de carga	Esfuerzo vertical	2	0	2	0
Presión de poros dinámica	Presión de poros	1	0	2	1
Total		43	17	39	15

** Sensores originalmente instalados. Un total de 14 sensores nuevos fueron re-instalados en Septiembre de 2012.

Como observación general, se puede concluir que no existen cambios radicales en el funcionamiento de los sistemas con respecto a los reportados en Octubre del 2012 y en Enero de 2013. A manera de resumen, se puede concluir que en la actualidad el sistema de instrumentación del Pavimento Flexible (Calle 80) tiene un 39.5% de sus sensores en funcionamiento y reportando datos válidos, y el sistema de instrumentación de Pavimento Rígido (Estación Alcalá) tiene un 38.4% de sus sensores en funcionamiento y reportando datos válidos. Como se puede concluir, el deterioro del sistema de Calle 80 es evidente luego de casi dos años de su instalación inicial. En el caso de la estación Alcalá, existieron grandes

dificultades de apoyo técnico durante la re-instalación del sistema, las cuales, en adición a actividades externas que produjeron la pérdida inesperada de sensores (tales como el caso de punzonamiento o corte en el cableado en la entrada de la caja de instrumentación que se detectó en visitas rutinarias al punto de instrumentación), han acelerado el deterioro del sistema en los 10 meses que este sistema tiene en funcionamiento.

En este sentido, es importante recordar que tal como se explicó en detalle en el informe final del contrato 118 de 2009, los sistemas de instrumentación tienen típicamente cortas vidas de servicio. Esto se debe a que la complejidad de la instalación de los sensores en el pavimento supone la pérdida inevitable de algunos de ellos y a que las condiciones agresivas a las que se encuentran sometidos los instrumentos pueden generar un daño irreversible en los mismos, tal como ocurrió con los deformímetros del sistema de pavimento flexible de la Calle 80 mencionado con anterioridad. Por lo tanto, cuando se detecta un daño en los sensores se procede a reportar la pérdida de los mismos y a evaluar la posibilidad de su reparación. En algunos casos las acciones para la reparación son muy complejas, invasivas y/o costosas, por lo que no es recomendable emprender actividades en esta dirección. Un ejemplo de este caso se explicó en la Sección 5.3. con respecto a los deflectómetros del sistema de la Calle 80. En otros casos, por el contrario, la reparación no es tan compleja debido a la ubicación y fácil acceso de los sensores, tal como se describió en la sección 5.1 para el caso de las balanzas de carga tipo WIM. Además de estos dos casos, en algunas situaciones se considera que es posible y valioso emprender actividades de mediana dificultad para intervenir el pavimento con el objetivo de recuperar algunas de las mediciones. Un ejemplo de este caso es el conjunto de actividades realizadas para reponer los deformímetros de las capas asfálticas de la Calle 80, las cuales fueron descritas en detalle en la sección 5.2. En conclusión, cada caso relacionado con la pérdida de mediciones o de sensores de un sistema de instrumentación de pavimentos en servicio requiere de un análisis cuidadoso que compare las ventajas y las desventajas asociadas a la pérdida de las mediciones en comparación con aquellas relacionadas con el diseño e implementación de medidas correctivas para la reparación de dichos sensores.

6. Procesamiento de la Información Recopilada

Como se mencionó en secciones anteriores, los sistemas de instrumentación capturan y almacenan información relativa a tres grupos principales de variables: 1) variables que miden las condiciones ambientales características del entorno del proyecto (variables estáticas o ambientales externas al pavimento), 2) variables que miden los cambios de condiciones climáticas al interior del pavimento (variables estáticas al interior del pavimento), y 3) variables que miden la respuesta mecánica del pavimento ante las exigencias de carga impuestas por el paso de tráfico vehicular (variables dinámicas o mecánicas). Adicionalmente, los sistemas cuentan con una cámara que permite la captura de videos para identificar la tipología de los vehículos que transitan en la vía. Vale la pena mencionar que en los dos tramos instrumentados los vehículos son siempre los mismos (buses articulados o bi-articulados del sistema Transmilenio) y por lo tanto la utilidad de contar con un sistema de captura de video no es tan importante como en el caso en el que se instrumentan tramos en servicio que incluye tráfico mixto. Por lo tanto, debido a que los videos no proporcionan información relevante para cumplir con los objetivos propuestos en este proyecto, dicha información no se incluye dentro de las variables a procesar o a analizar como parte de las etapas 1 y 2 mencionadas con anterioridad.

Como se explica en detalle en el Informe Final de la primera fase del Proyecto de Instrumentación (contrato 118 de 2009), las medidas realizadas en los tramos de instrumentación son almacenadas en 4 archivos diferentes. La información contenida en estos archivos es la siguiente:

1. Archivo con información de las variables meteorológicas.
2. Archivo con información de las variables medidas al interior del pavimento caracterizadas por una baja frecuencia de adquisición de datos (variables estáticas ambientales al interior del pavimento).
3. Archivo con información de las variables dinámicas o variables de alta frecuencia de adquisición de datos (i.e., variables relacionadas con la respuesta mecánica de la estructura).
4. Archivo con la información del video⁴.

Los archivos mencionados en los puntos 1, 2 y 3 tienen un formato de texto plano separado por espacios o tabuladores, de acuerdo con las necesidades expresadas por el IDU para este fin. En la primera columna de dichos archivos se encuentra el tiempo de la medida y en las columnas siguientes el valor correspondiente a cada una de las variables.

⁴ NOTA: Como se mencionó previamente, se identificó que la necesidad o aporte de la señal de video no es sustancial para el alcance y objetivos propuestos en el proyecto. Por tanto, no se hace ninguna comparación o análisis al respecto por ahora.

- Los archivos de las *variables ambientales* que se miden al interior del pavimento se generan diariamente y el nombre del archivo incluye la fecha (en formato día-mes-año), la letra “E”—que se refiere al hecho de que son variables estáticas—seguida del número “1” (por ejemplo: 29-04-11E-1.txt).
- Los archivos de las *variables dinámicas* (instrumentos de medición de desempeño mecánico) se generan durante 1 minuto cada 10 minutos y su título tiene el formato: “29-04-11D-x” en donde x es el número de toma de muestra de ese día (1, 2, 3... indicando archivos tomados cada 10 minutos empezando a las 12:00 am del día correspondiente).

A continuación se describe la metodología desarrollada para el procesamiento de la información recolectada.

6.1. Procesamiento de las variables estáticas o climáticas

El procesamiento y análisis de las variables estáticas o climáticas (tanto en el entorno de los tramos instrumentados como al interior de los pavimentos) constituyó la primera etapa de análisis en este proyecto. Debido a que no se presentaron tantas pérdidas en estos sensores como en aquellos empleados para medir aspectos mecánicos, de estas variables existe más información que de las variables dinámicas. Esta información, sin embargo, se considera que es relativamente fácil de procesar debido, en gran medida, a que no se requiere un post-procesamiento complejo de los datos, como ocurre en el caso de las señales reportadas por las variables dinámicas.

En la etapa inicial, se procedió a graficar la información básica reportada en los archivos de texto. A manera de ejemplo, las Figuras 6.1 a 6.4 muestran algunas de las variables climáticas externas, también llamadas meteorológicas, de la zona circundante al punto de instrumentación de la Calle 80 (pavimento flexible). Como se puede observar, la información presentada se encuentra dentro de los rangos válidos esperados para estas variables. Posterior a esto, se evaluaron los cambios de algunas de estas variables a lo largo de cada mes, con el fin de observar el comportamiento general de las variables en mayores lapsos de tiempo. La Figura 6.5 ilustra el comportamiento de la temperatura máxima y mínima diaria, para el mes de agosto de 2011, y las Figuras 6.6 y 6.7 ilustran el cambio de otras variables meteorológicas en periodos mensuales.

Estas actividades preliminares permitieron verificar la calidad inicial de las mediciones y determinar rangos típicos de cambio de estas variables. No obstante, para reportar de forma sistemática y ordenada la información recolectada, fue necesario desarrollar formatos típicos en donde se incluyera la información consolidada en periodos de tiempo semanales, tal como se describe a continuación.

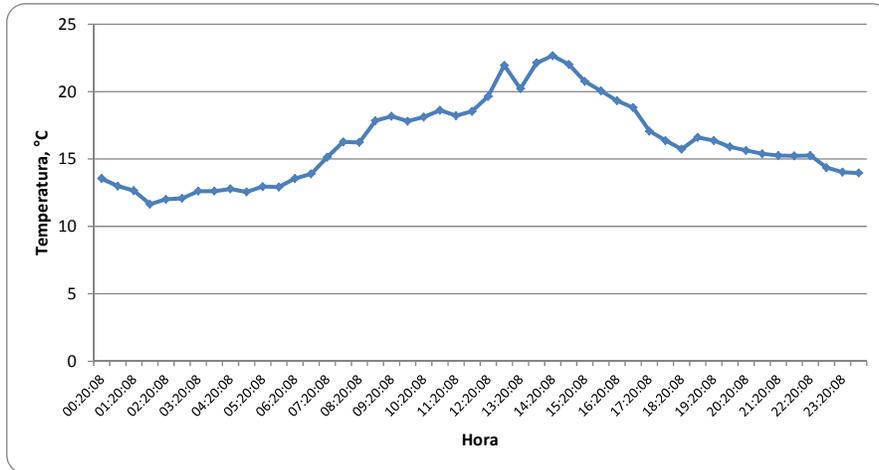


Figura 6.1. Perfil de temperatura diaria del aire (Ej.: 22-07-2011).

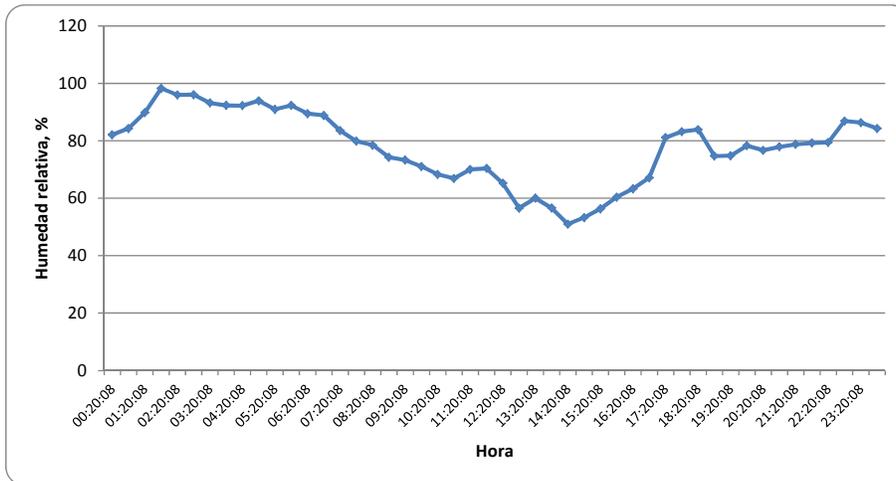


Figura 6.2. Perfil diario de humedad relativa del aire, % (Ej.: 22-07-2011).

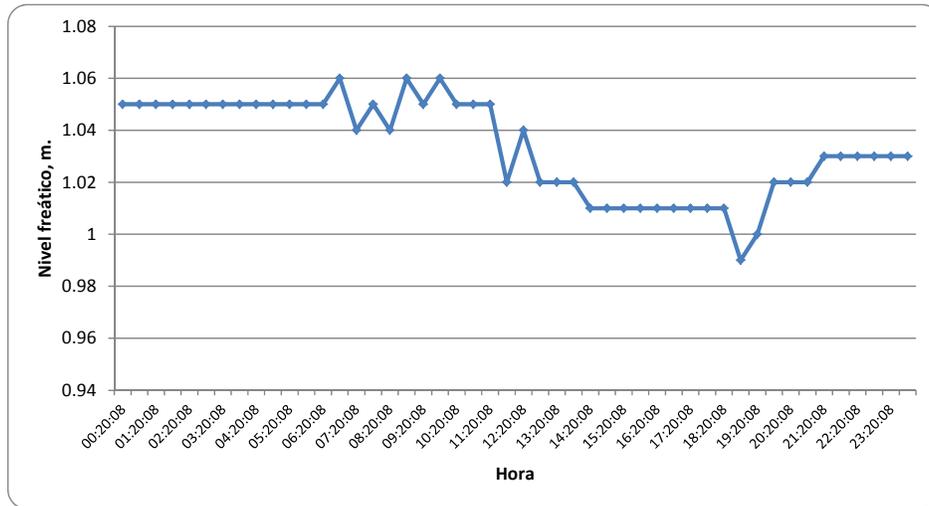


Figura 6.3. Perfil diario de nivel freático, m. (Ej.: 22-07-2011).

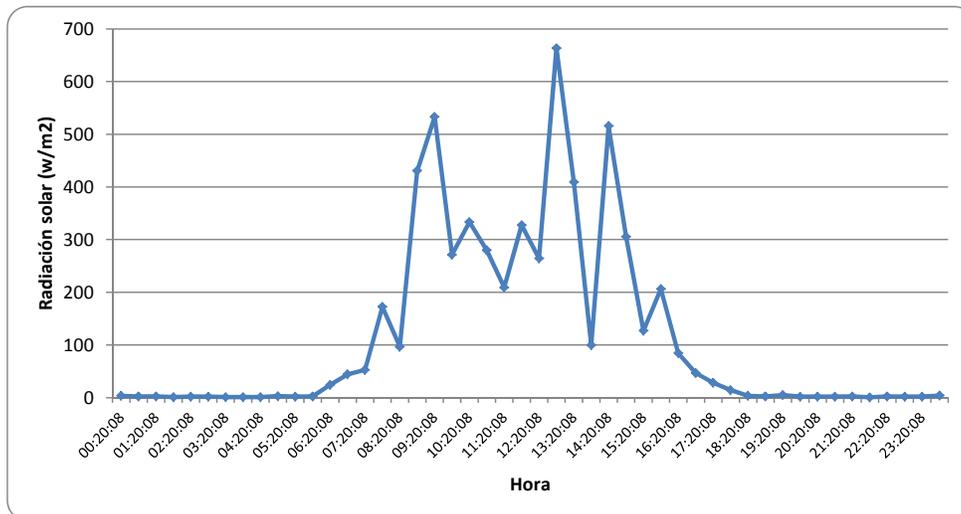


Figura 6.4. Perfil diario de radiación solar (Ej.: 22-07-2011).

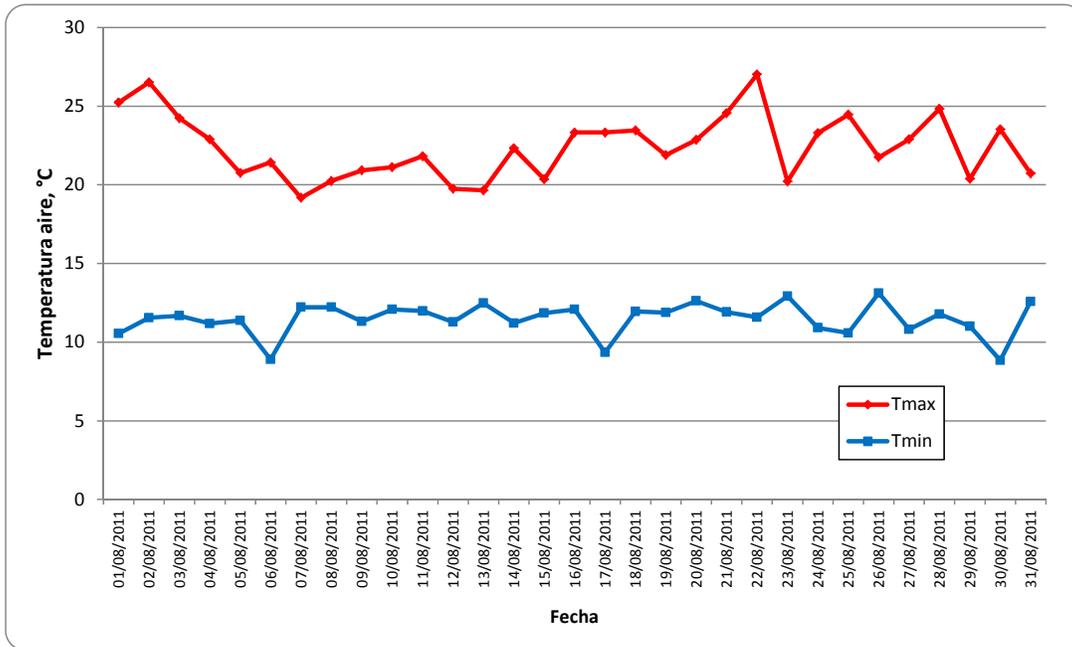


Figura 6.5. Temperatura máximas y mínimas diarias durante el mes de agosto de 2011.

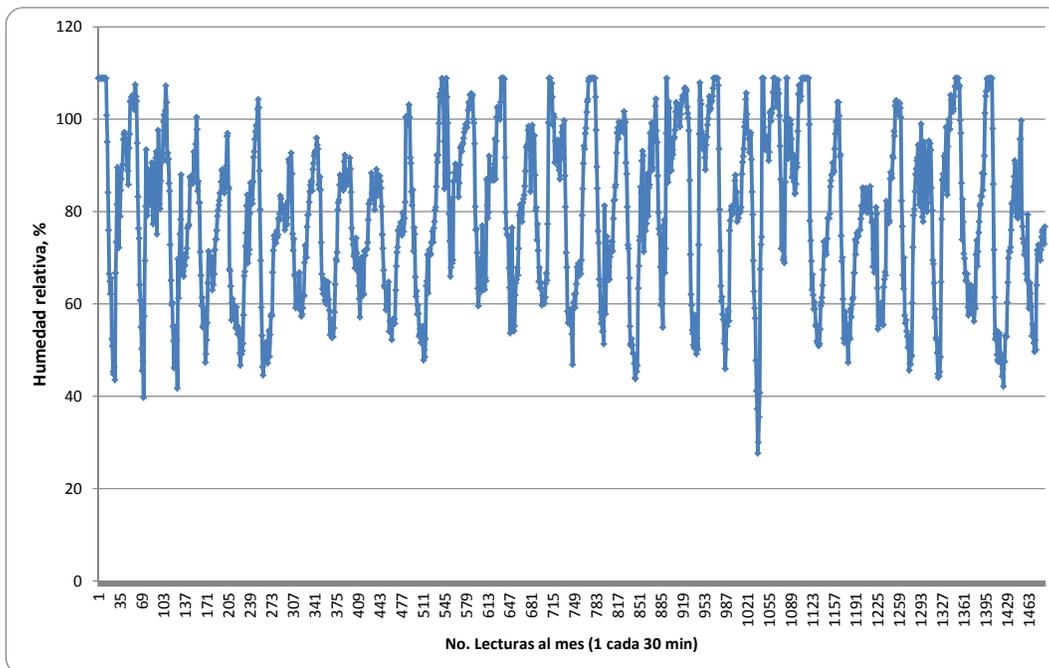


Figura 6.6. Perfil de humedad relativa durante el mes de agosto de 2011.

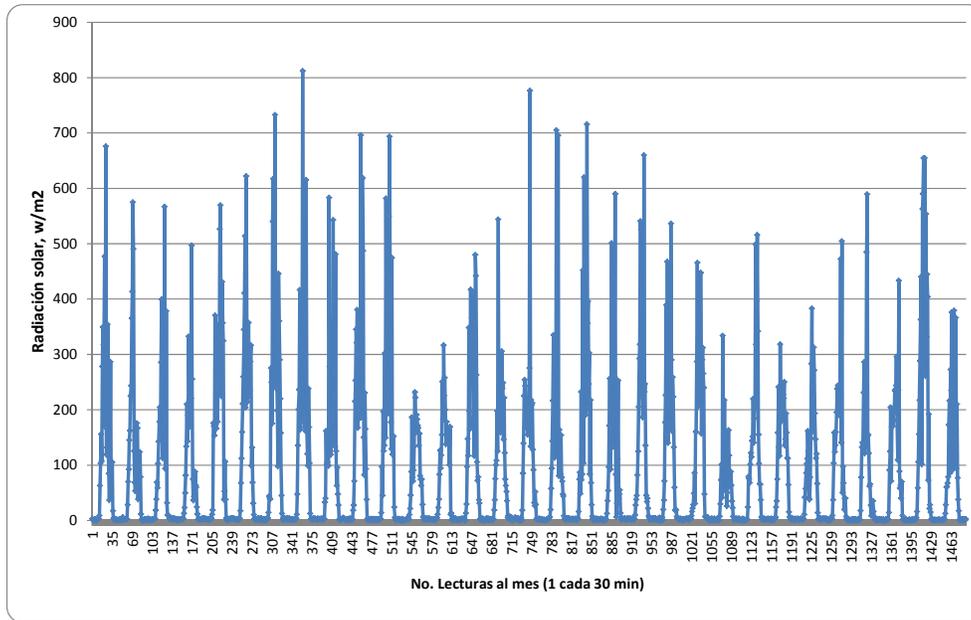


Figura 6.7. Perfil de radiación solar, mes de agosto de 2011.

Los formatos base o *templates* diseñados para reportar las variables climáticas fueron presentados en los dos primeros Informes de Avance. La Figura 6.8 presenta un reporte de las variables meteorológicas para el punto de instrumentación de la Calle 80 y la Figura 6.9 presenta un reporte típico para las variables estáticas al interior de la estructura de pavimento. La información contenida en estos dos reportes corresponde a aquella capturada durante la semana comprendida entre el 30 de julio y el 05 de agosto de 2012. Los reportes para el caso del pavimento rígido son equivalentes a los mostrados en estas dos figuras. El **Anexo 1** de este informe contiene toda la información climática procesada para los dos tipos de pavimentos.

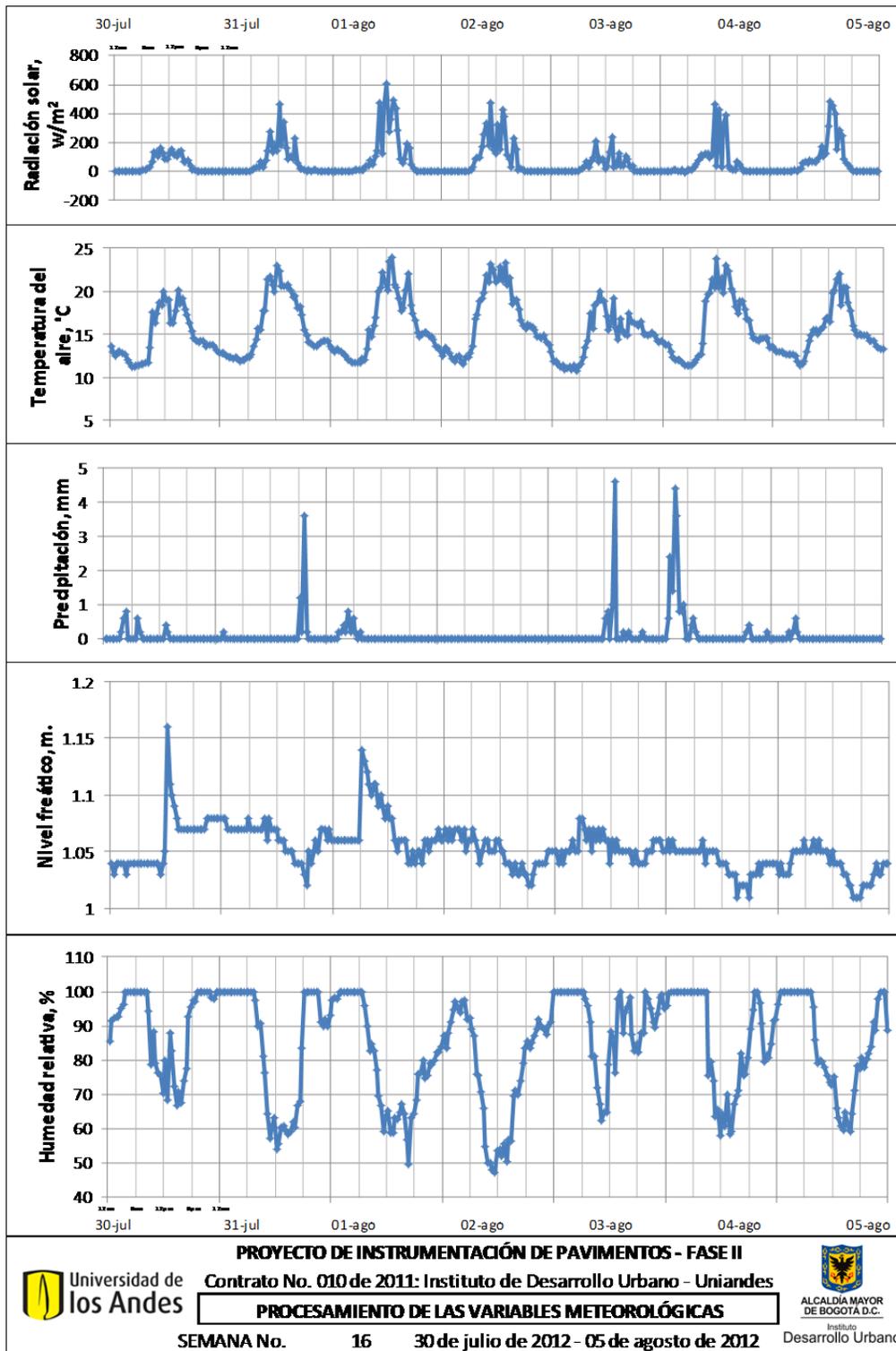


Figura 6.8. Ejemplo de formato de recopilación de las variables meteorológicas en el punto de instrumentación del pavimento flexible (Calle 80).

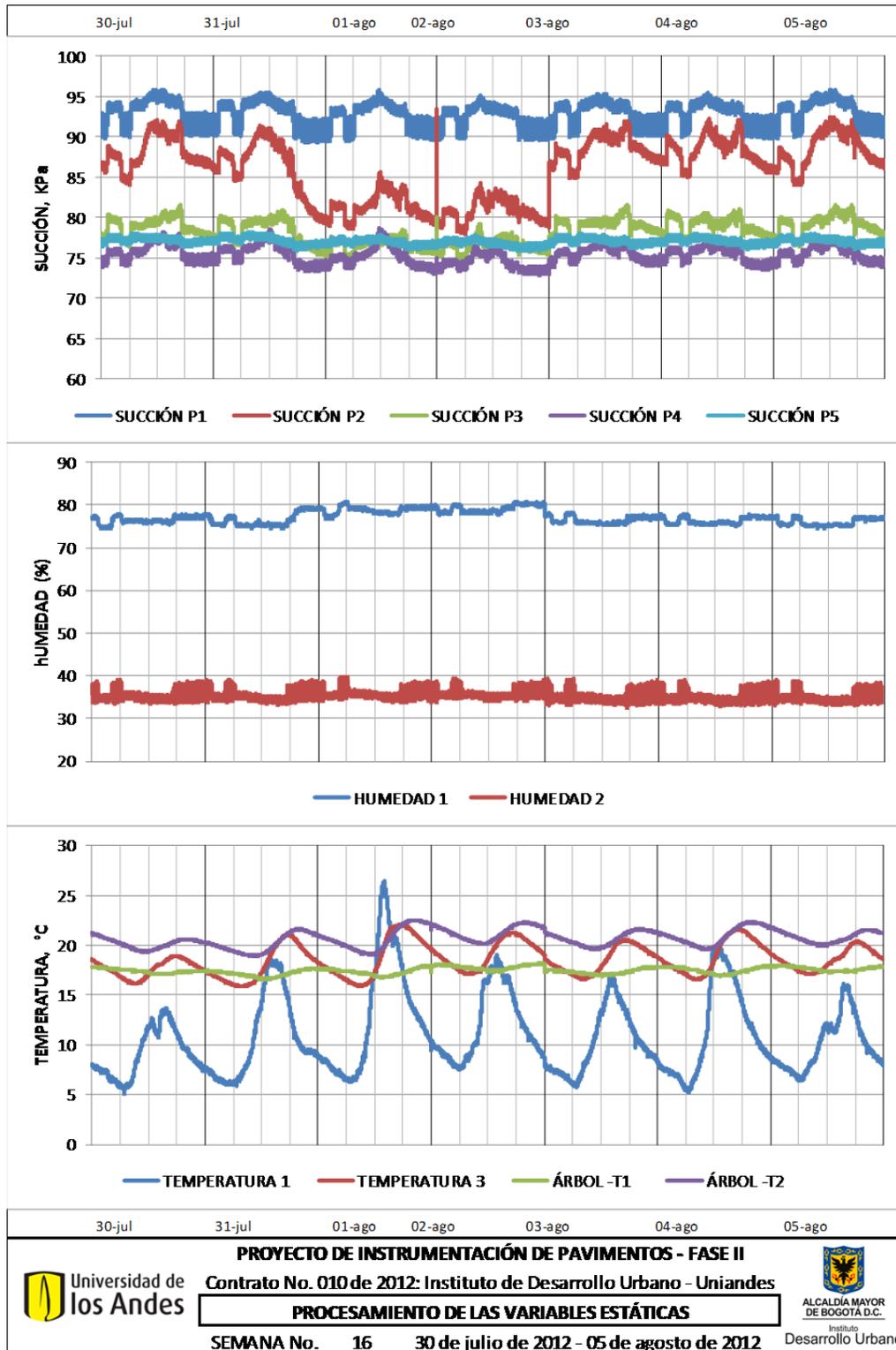


Figura 6.9. Ejemplo de formato de recopilación de variables estáticas al interior del pavimento flexible.

Vale la pena mencionar que aunque la información climática no requiere un procesamiento complejo, para un número significativo de datos disponibles fue necesario realizar ajustes o realizar análisis específicos y particulares. Por ejemplo, fue necesario verificar la lectura de algunas termocuplas, como se mencionó en el capítulo 5, y de ajustar algunas constantes de calibración o de corrección (e.g., el nivel freático reporta valores de distancia relativos con respecto a la ubicación del sensor y no con respecto a la superficie del pavimento, por lo cual fue necesario ajustar la información capturada en los archivos de texto).

6.2. Procesamiento de las variables dinámicas

Debido a la densidad y a la naturaleza de la información correspondiente a las variables dinámicas o mecánicas, el procesamiento eficiente de estos datos constituyó una de las tareas más retadoras de este convenio. Esto se debe a que, a diferencia de las variables estáticas, el post-procesamiento de las variables dinámicas requiere aplicar técnicas de procesamiento de señales. Adicionalmente, existen dos retos importantes relacionados con el procesamiento de estas variables:

1. El paso de cada vehículo incluye un número significativo de datos ya que este evento ocurre en un periodo muy corto de tiempo, lo que obliga a la toma de datos en milésimas de segundo. Como consecuencia, existe una gran cantidad de información capturada aun cuando el paso de los vehículos ocurre en unos pocos segundos.
2. Debido a que no existe un sistema automático que dispare la toma de captura de datos únicamente cuando se aproxima un vehículo, los archivos producidos no necesariamente contienen información válida. Como se explicó en el primer informe, las variables dinámicas se toman de la siguiente forma: cada 10 minutos durante el día se activa el sistema de datos y se captura información continua durante 1 minuto. El sistema produce archivos de texto para cada uno de los minutos “activos” del sistema de recolección de información. Esto significa que en un día se producen aproximadamente 144 archivos, cada uno con información de un minuto con lecturas cada 4 milésimas de segundo. Es decir, cada uno de los 144 archivos contiene aproximadamente 15000 datos por cada sensor. Debido al sistema de recolección por minutos, muchos de esos 15000 datos por sensor pueden ser inservibles y correspondientes a periodos en donde no hubo paso de vehículos.

A manera de ejemplo, la Figura 6.10 presenta las mediciones capturadas por el deflectómetro ubicado en la base de la carpeta de rodadura en el pavimento flexible (Calle 80) durante un lapso de tiempo de 1 minuto (60 s). Esta figura ilustra la cantidad de información de las variables dinámicas que captura el sistema de instrumentación y la necesidad inminente de

post-procesar las señales y de diseñar una herramienta eficiente para efectuar estas actividades.

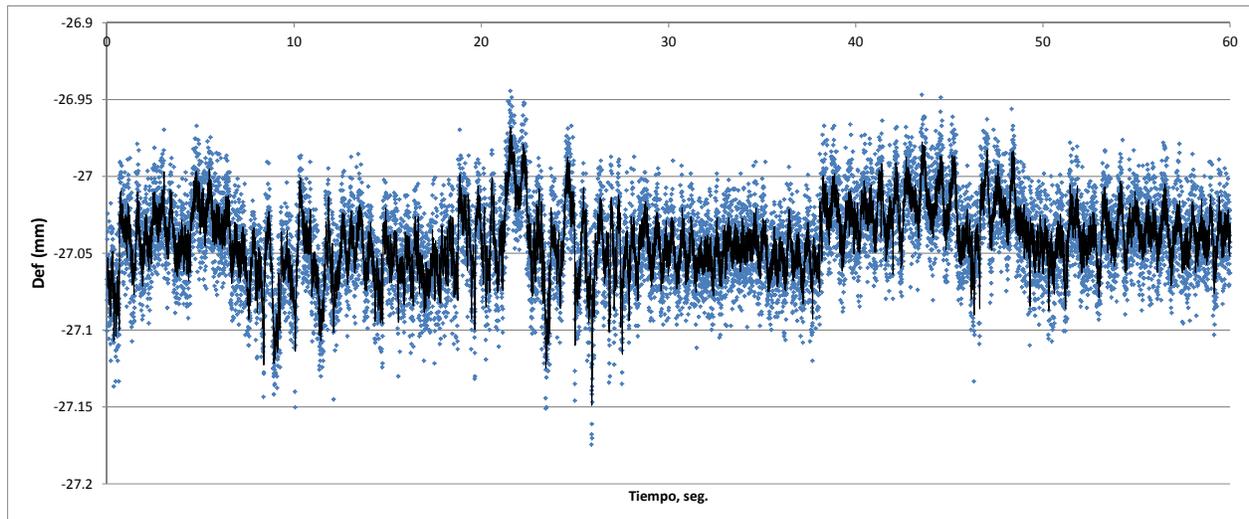


Figura 6.10. Ejemplo del nivel de detalle de las mediciones para el caso del deflectómetro 1, pavimento flexible.

Dentro de este contexto, se realizó el diseño de un software que permitiera la ejecución de las actividades de organización, selección y procesamiento de señales de las variables dinámicas de forma automatizada. Después de explorar diferentes posibilidades (incluyendo algunos en Matlab, en Labview, etc.), finalmente se optó por diseñar e implementar un código en MatLab. Las bases iniciales del software, denominado “ProsTransmilenio”, fueron presentadas en el primer informe de avance y explicados en detalle en el segundo informe de avance. La Figura 6.11 presenta un pantallazos típico del programa y el **Anexo 2** presenta el código del programa.

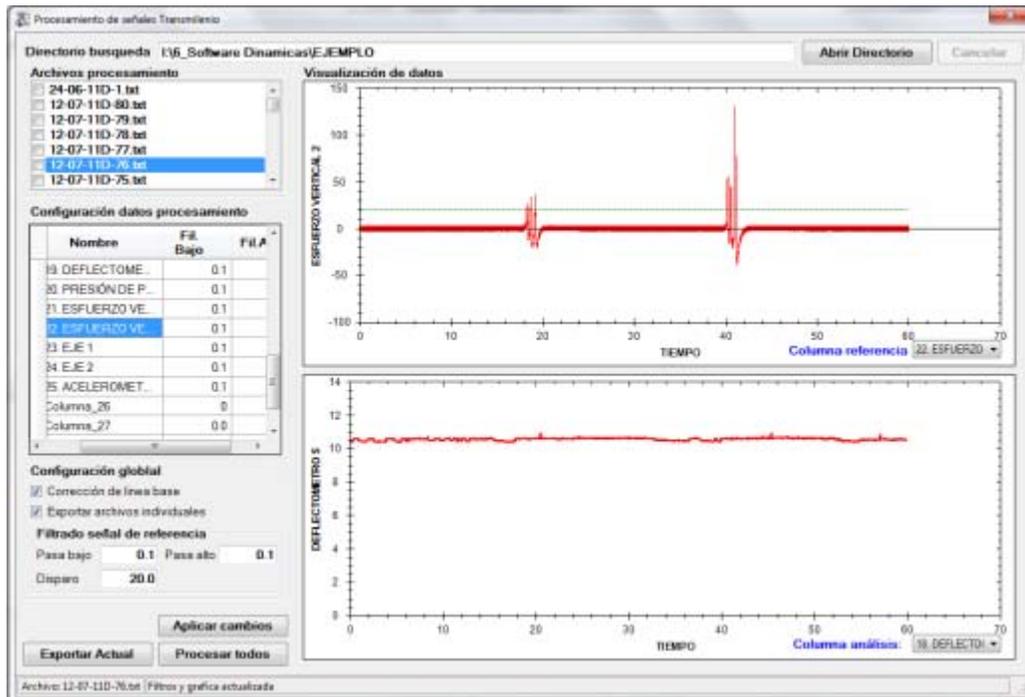


Figura 6.11. Pantalla inicial del programa “ProsTransmilenio” Versión 4.0.

En resumen, el software realiza los siguientes pasos:

1. Verificación de la existencia de información válida en cada archivo. Este paso consiste en acceder a los archivos de texto disponible e identificar los datos válidos que corresponden al paso de vehículos. Esta identificación se realiza mediante un criterio de búsqueda determinado que fue cuidadosamente analizado y seleccionado. Por ejemplo: aquellos archivos con paso efectivo de algún vehículo sobre las celdas de carga pueden ser filtrados con la columna de Esfuerzo Vertical 2 (variable que, con las WIM, contiene registros de carga en el sistema) que sirve como punto de referencia y a través de la cual se pueden analizar otras variables.
2. Extracción de la información depurada en archivos de texto con el mismo nombre y con el mismo formato de los archivos originales en una carpeta de salida nueva.
3. Configuración de los filtros altos y bajos para el procesamiento de las señales y para el descarte del ruido circundante en el sistema.
4. Procesamiento de la información mediante filtros de señales.

Adicionalmente, el software permite identificar los cambios en la configuración alimentada al programa de manera inmediata mediante dos ventanas gráficas. La ventana superior ilustra la columna o variable de referencia (con la cual se busca el disparo) y la inferior, en la cual se presenta una segunda variable de comparación o análisis (Figura 6.11).

A manera de ejemplo, se presenta paso a paso el procesamiento del sensor de carga superficial aplicado al pavimento correspondiente al peso de los vehículos (capturado mediante las balanzas de carga superficial o WIM):

- Organizar la información recolectada de campo en carpetas que contengan aproximadamente 24 archivos de reporte de variables dinámicas. Esto corresponde a 24 minutos de toma de mediciones.
- Iniciar el programa de MatLab diseñado para el procesamiento de datos. Seleccionar en el programa la ubicación de la carpeta mencionada anteriormente. Seleccionar la opción “abrir directorio” para que el programa reconozca la información contenida en la carpeta a analizar.
- Seleccionar las columnas de las variables dinámicas a procesar.
- Establecer los valores de “pasa alto” y “pasa abajo”, que corresponden a los umbrales de frecuencias o periodos que se emplean para filtrar las señales existentes y quitar la información que corresponde a datos no válidos (o ruido). En el caso de las WIM los valores de “pasa alto” y “pasa bajo” son 0.3 y 0.1 (periodo).
- Establecer la variable dinámica de referencia que se puede emplear de forma confiable para identificar el paso de vehículos. En todos los casos, los valores de carga reportados por las WIM son empleados para este fin. El valor de carga (WIM) para tal identificación es de 20 kgf (i.e., es el “disparo” que indica el paso de un vehículo).
- Seleccionar la opción “exportar archivos individuales”, que permite la generación de nuevos archivos con datos válidos y filtrados de las variables seleccionadas. Para su fácil identificación, estos archivos tienen el mismo nombre que los originales y son guardados en una nueva carpeta, denominada “DirSalida”, cuya ubicación corresponde al directorio seleccionado en el primer punto.
- A continuación, se pueden graficar y analizar los datos usando programas convencionales de hojas de cálculo, como Excel.

Las Figuras 6.12 y 6.13 muestran una señal de WIM antes y después de ser filtrada. En este caso en particular los “picos” de las cargas son muy definidos y el filtro sirve sólo para limpiar la parte baja de la señal y evitar la acumulación de datos innecesarios. No obstante, en el caso de otras variables el filtro es el único medio que la señal o “pico” del sensor sólo se puede identificar con claridad una vez la señal original ha sido filtrada.

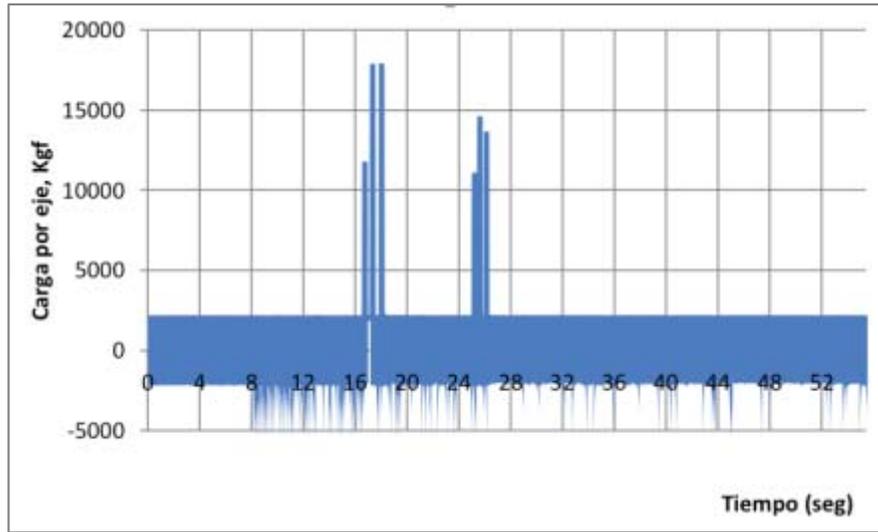


Figura 6.12. Ejemplo de datos capturados por la balanza de carga WIM de la Calle 80 sin procesar.

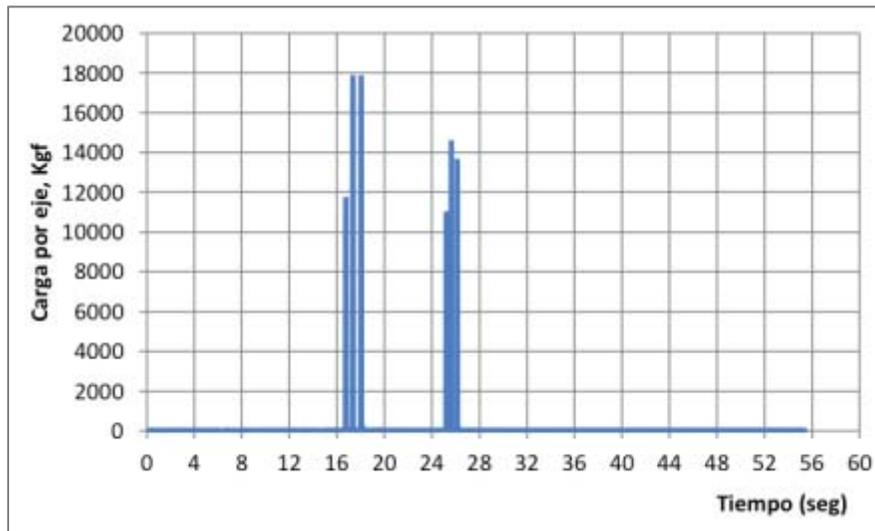


Figura 6.13. Ejemplo de los datos finales obtenidos tras el procesamiento de los datos presentados en la Figura 52.

Similar al caso de las variables estáticas, se diseñó un formato base (*template*) para reportar la información recolectada para las variables dinámicas. En estos formatos sólo se incluye la información de los sensores que reportaban datos válidos. Debido a que los sensores de variables dinámicas que reportan datos en los dos sistemas de instrumentación son diferentes, los formatos para cada uno de los pavimentos también es diferente. Las Figuras 6.14 y 6.15 presentan un ejemplo de dichos reportes.

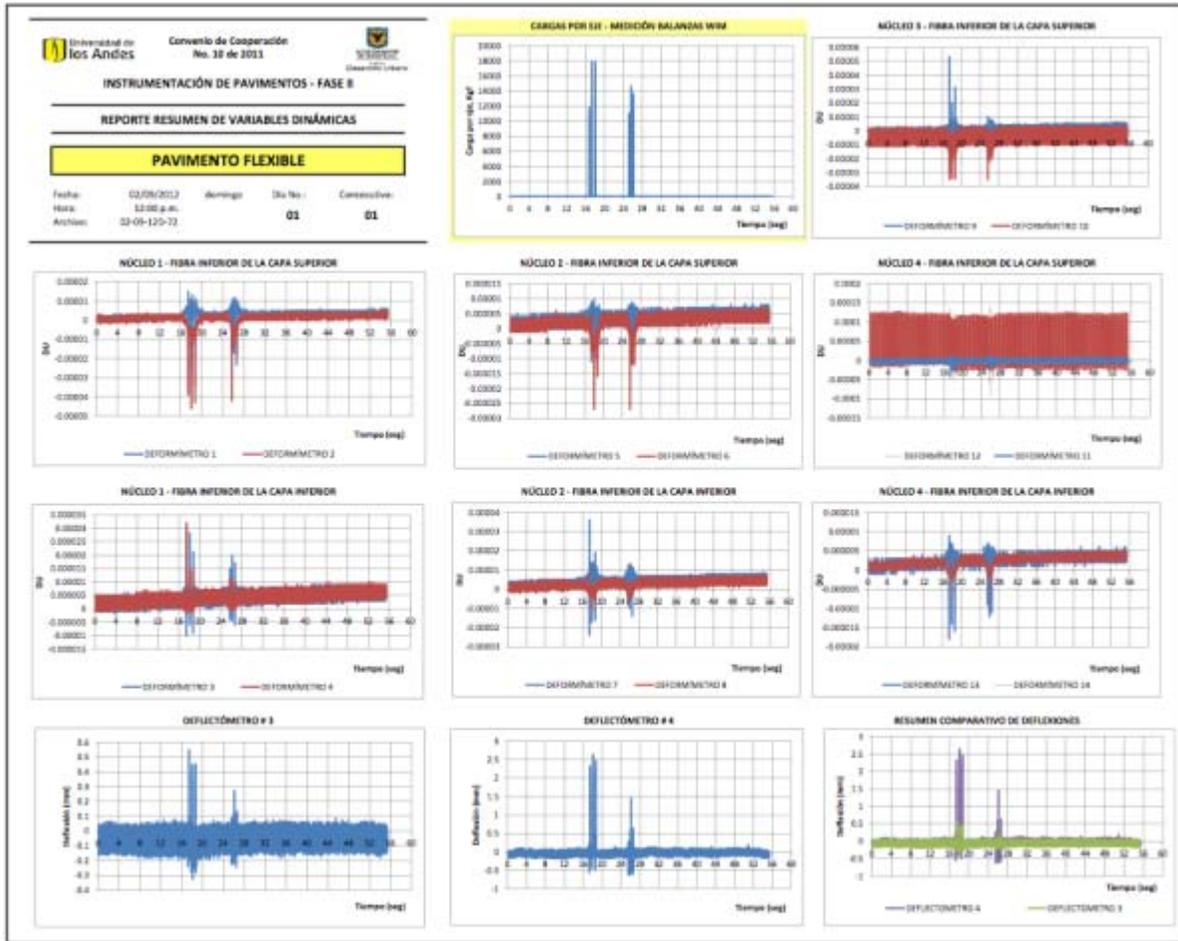


Figura 6.14. Ejemplo de formato de recopilación de variables dinámicas del pavimento flexible (Calle 80).

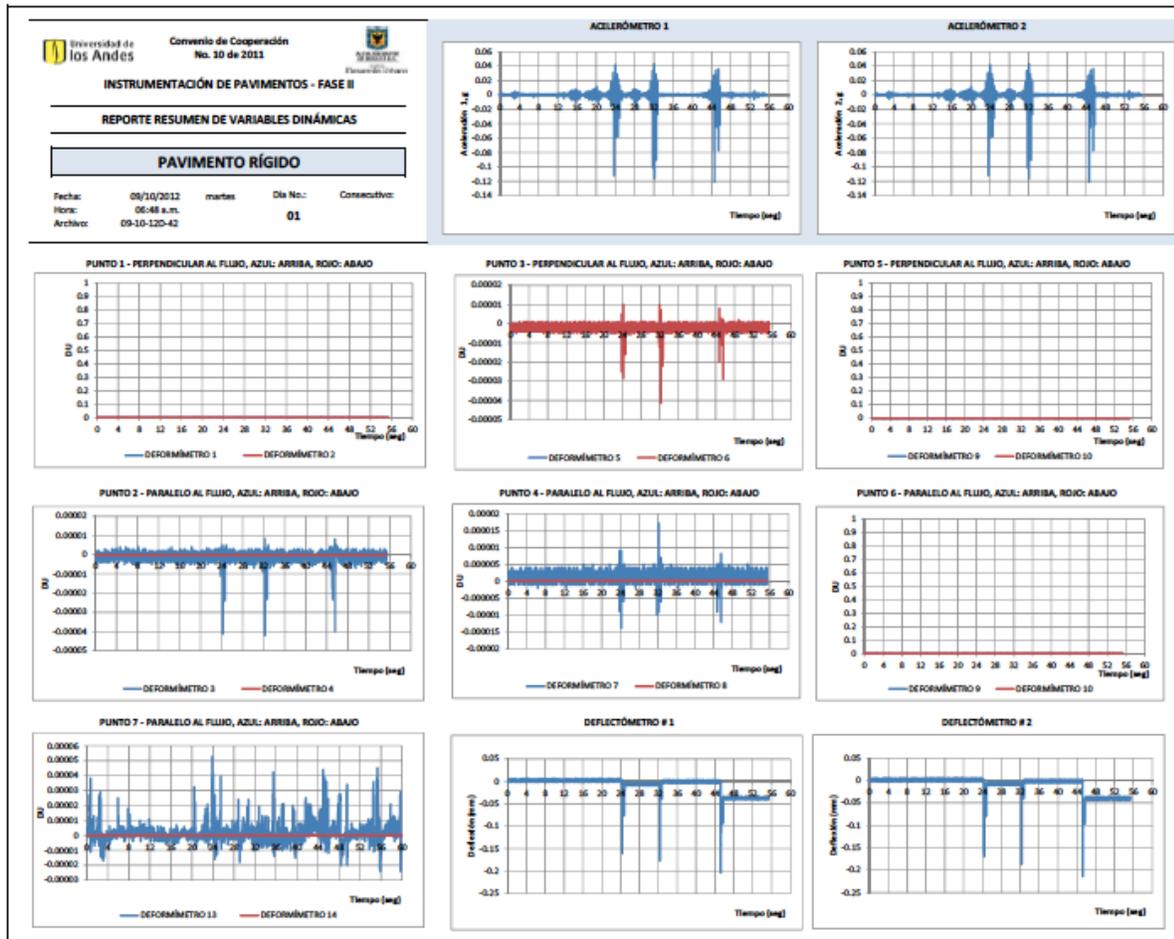


Figura 6.15. Ejemplo de formato de recopilación de variables dinámicas del pavimento rígido (Estación Alcalá).

El **Anexo 3** de este informe contiene la información dinámica procesada los dos pavimentos. Debido a la cantidad de información existente, los informes contienen únicamente la información capturada en un total de 6 horas en cada día. Las horas en las que se reporta información son: de 5:30 am a 6:30 am, 2:00 pm a 3:00 pm, de 6:00 pm a 7:00 pm y de 10:00 pm a 11:00 pm. Debido a que la información se recolecta durante un minuto cada 10 minutos, en una hora se tiene un total de 6 minutos con datos de variables mecánicas. En otras palabras, en cada hora se analizan 6 archivos y, por lo tanto, en cada día se analiza un total de 36 archivos de variables dinámicas. Dichos archivos son procesados empleando el software descrito previamente.

Como se mencionó con anterioridad, en los reportes mencionados se incluyeron solamente las variables que se considera proveen información útil. A manera de ejemplo, las Figuras 6.16 y 6.17 presentan resultados típicos del post-procesamiento de la información del sensor de presión dinámica de poros y de esfuerzos verticales en las capas granulares reportados en el pavimento flexible (Calle 80). Debido a la ausencia de picos definidos y a la forma que tiene la información compilada, se puede concluir que las lecturas de los sensores son inapropiadas y que por lo tanto no proveen información valiosa que se pueda o deba incluir en análisis posteriores.

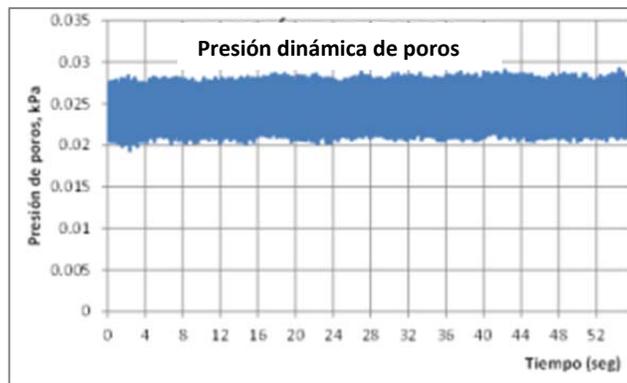


Figura 6.16. Resultado del post-procesamiento de la información reportada por el sensor de presión dinámica de poros (Pavimento flexible, Calle 80)

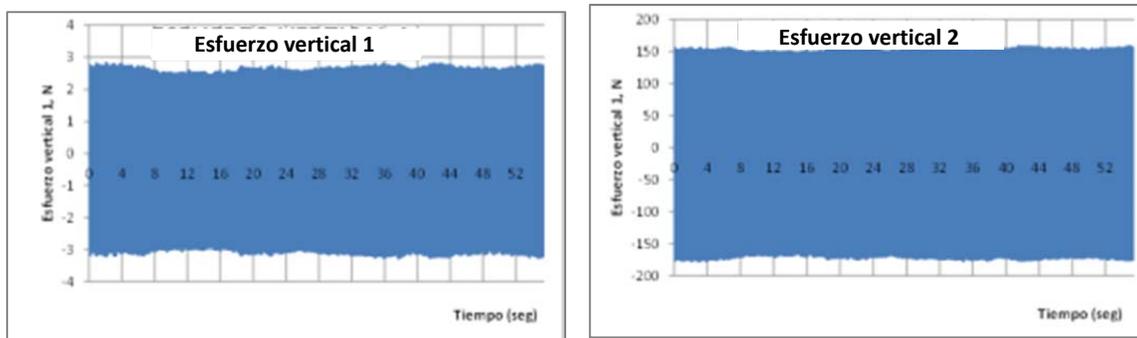


Figura 6.17. Resultado del post-procesamiento de la información reportada por los dos sensores de esfuerzo vertical en capas granulares (Pavimento flexible, Calle 80)

En general, el periodo de tiempo en el que se dispone de información valiosa de las variables dinámicas es mucho más limitado que el correspondiente a las variables estáticas. Esto se debe, principalmente, a las pérdidas de muchos sensores de este tipo, a las dificultades de

captura de datos que se presentaron con posterioridad a la reparación de sensores en la Calle 80 y al tiempo que requirió la re-instalación de los sensores en el pavimento rígido de la estación de Alcalá. No obstante, la información recolectada se considera suficiente para el cumplimiento de los objetivos establecidos para este convenio.

7. Análisis de la Información Recopilada

Una vez establecido un procedimiento sistémico para procesar la información recolectada, se procedió a realizar un análisis de dicha información. Para esto, no sólo se analizaron los rangos típicos de las variables obtenidas, sino que también se exploró la existencia de potenciales correlaciones entre las diferentes variables. A continuación se presentan los principales resultados obtenidos como parte de estas actividades.

7.1. Rangos típicos de las variables estáticas

Como parte de las etapas iniciales de análisis de la información se determinaron los rangos típicos de valores de las diversas variables medidas. Esta información es importante en la medida en que provee un punto de partida básico con respecto al comportamiento general que se puede esperar en los pavimentos de la ciudad.

La Tabla 7.1 presenta los rangos de valores típicos encontrados para las variables asociadas a las condiciones ambientales del sitio de localización de la instrumentación en pavimento flexible y a Tabla 7.2 presenta información equivalente pero en el pavimento rígido.

Tabla 7.1. Rangos típicos encontrados en las variables meteorológicas en el pavimento flexible de la Calle 80.

Variable	Rango de Medición	Unidades	Observaciones
Radiación solar	0 – 500	w / m ²	Adecuado
Temperatura del aire	10 - 25	°C	Adecuado
Precipitación	0 - 5	mm	Adecuado
Nivel freático	0.9 – 1.7	m	Adecuado
Velocidad del viento	2 - 24	m/s	Adecuado
Humedad relativa	40 - 100	%	Adecuado

Tabla 7.2. Rangos típicos encontrados en las variables meteorológicas en el pavimento rígido de la Estación Alcalá.

Variable	Rango de Medición	Unidades	Observaciones
Radiación solar	0-460	w / m ²	Adecuado
Temperatura del aire	7-25	°C	Adecuado
Precipitación	****	mm	Presenta datos inconsistentes
Nivel freático	0.8-2	m	Adecuado
Humedad relativa	40-100	%	Adecuado

Por su parte, las Tablas 7.3 y 7.4 presentan los rangos típicos de las variables estáticas correspondientes a los sensores ubicados en el interior del pavimento.

Tabla 7.3. Rangos típicos encontrados en las variables estáticas en el pavimento flexible de la Calle 80.

Variable	Rango de Medición	Unidades	Observaciones
Succión	70 – 180	KPa	Se revisó el punto cero de los sensores
Humedad	35 – 85	%	Adecuado
Temperatura	10 – 30	°C	Adecuado

Tabla 7.4. Rangos típicos encontrados en las variables estáticas en el pavimento rígido de la Estación Alcalá.

Variable	Rango de Medición	Unidades	Observaciones
Succión	45 - 230	KPa	Adecuado
Humedad	76 - 93	%	Adecuado
Temperatura	15 – 30	°C	Adecuado

Dentro de algunas observaciones que se pueden realizar de los datos presentados con anterioridad, es interesante notar que los rangos de temperatura al interior del pavimento se encuentran 5°C y 10°C por encima de los límites inferiores y superiores de los rangos de temperatura del aire, respectivamente (i.e., la temperatura del aire varía entre 10 y 25°C, mientras que la del pavimento varía entre 5 y 35°C). Este tipo de resultados es de esperarse pues la radiación solar fomenta la generación de gradientes que resultan en procesos de flujo de calor al interior de la estructura. Estos procesos de flujo dependen no sólo de las condiciones climáticas externas al pavimentos sino también de la ubicación en profundidad de cada capa y del material existente en dichas capas.

7.2. Rangos típicos de las variables dinámicas

De forma similar a lo realizado para las variables estáticas, para las variables dinámicas también se identificaron los rangos de valores típicos. La Tabla 7.5 presenta los rangos de sollicitación de carga capturados mediante las balanzas de carga WIM encontrados en los puntos de instrumentación de pavimento flexible (Calle 80) y de Pavimento rígido (Estación Alcalá), respectivamente. Más adelante se presentan espectros consolidados de carga para los dos sistemas instrumentados. De forma similar, las Tablas 7.6 y 7.7 presentan los rangos típicos de las variables mecánicas de respuesta del pavimento.

Tabla 7.5. Rangos típicos de la carga dinámica por eje aplicada por los buses de Transmilenio reportados en los dos sistemas de instrumentación.

Pavimento	Eje	Rango de Medición Kgf	Observaciones
Flexible	Eje simple con llanta simple	1000 - 10500	Ninguna
	Ejes simples con llantas duales	2000 - 18000	Ninguna
Rígido	Eje simple con llanta simple	1500 - 11500	Ninguna
	Ejes simples con llantas duales	2000 - 19000	Ninguna

Tabla 7.6. Rangos típicos encontrados en las variables dinámicas en el pavimento flexible de la Calle 80.

Variable	Rango de Medición	Unidades	Observaciones
Deformímetros	$4.03 \times 10^{-7} - 2.05 \times 10^{-5}$	---	Deformación unitaria
Deflectómetros	0.1 - 2.7	Mm	Ninguna
Presión de Poros	N.D.	KPa	No se cuenta con información válida comparable.
Esfuerzo vertical	N.D.	KPa	No se cuenta con información válida comparable.

Tabla 7.7. Rangos típicos encontrados en las variables dinámicas en el pavimento rígido de la Estación Alcalá.

Variable	Rango de Medición	Unidades	Observaciones
Deformímetros	$4.5 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-5}$	---	Ninguna
Deflectómetros	0.05 - 0.32	mm	Ninguna
Presión de Poros	114 - 116.6	KPa	Ninguna
Esfuerzo vertical	N.D.	KPa	No disponible
Aceleración	0.02 - 0.15	g	Ninguna

Con excepción de los datos de carga superficial reportados por las balanzas de carga WIM en el pavimento rígido (los cuales requieren verificación), los rangos de valores de las demás variables mostrados en las tablas son lógicos y coinciden con lo esperado. Los reportes semanales de estas variables para el caso de los dos pavimentos se encuentran consignados en el **Anexo 3**, tal como se mencionó con anterioridad, y en las siguientes secciones se presenta algunas correlaciones entre estas variables.

7.3. Análisis de las variables estáticas

Algunas observaciones generales que se pudieron obtener de los reportes realizados de pavimento flexible incluyen: 1) los picos de succión se presentan cuando las temperaturas al

interior de las capas del pavimento son más bajas (i.e., cercanas a 10°C en la carpeta de rodadura), 2) la temperatura del nivel superior instrumentado es más alta y más variable, mientras que la temperatura del sensor más profundo es sustancialmente más baja y presenta poca variabilidad, 3) en el caso del pavimento flexible, la humedad natural del suelo es consistentemente mayor en la subrasante (i.e, entre 35 y 42%) que en la capa de subbase granular (i.e., entre 76 y 86%), siendo este resultado esperado debido a la naturaleza de los materiales y a las condiciones hídricas al interior del pavimento.

Aun cuando estas observaciones son interesantes, el mayor provecho que se puede obtener de esta información es explorar la existencia de correlaciones entre las diversas variables. Efectivamente, uno de los objetivos fundamentales del presente proyecto es determinar la relación que existe entre variables de diverso origen. Inicialmente, los esfuerzos en este sentido se enfocaron en determinar la existencia o inexistencia de correlaciones entre las variables meteorológicas y las variables climáticas al interior del pavimento. Para esto, se intentó establecer si existen relaciones entre las siguientes variables en los dos sistemas de instrumentación:

- Temperatura máxima diaria del pavimento y radiación diaria total,
- Temperatura máxima diaria del pavimento y temperatura máxima diaria del aire.
- Cambio en la precipitación y cambio en la humedad natural de las capas granulares y el suelo natural,
- Cambio en la precipitación y cambio en el nivel freático, y
- Succión y humedad natural para los materiales granulares y el suelo natural (determinación de las curvas de retención),

Las Figuras 7.1 y 7.2 presentan los resultados de las correlaciones iniciales mencionadas con anterioridad para el caso del pavimento flexible, mientras que las Figuras 7.3 y 7.4 presentan los resultados obtenidos para las mismas relaciones en el caso del pavimento rígido.

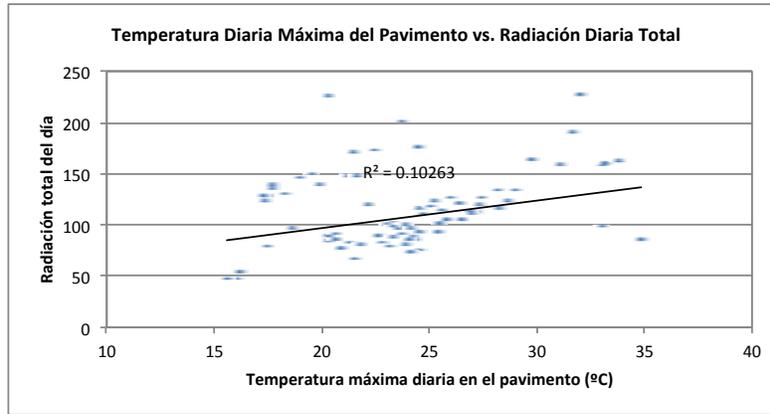


Figura 7.1. Relación entre la máxima temperatura diaria y la radiación diaria total en el pavimento flexible de la Calle 80.

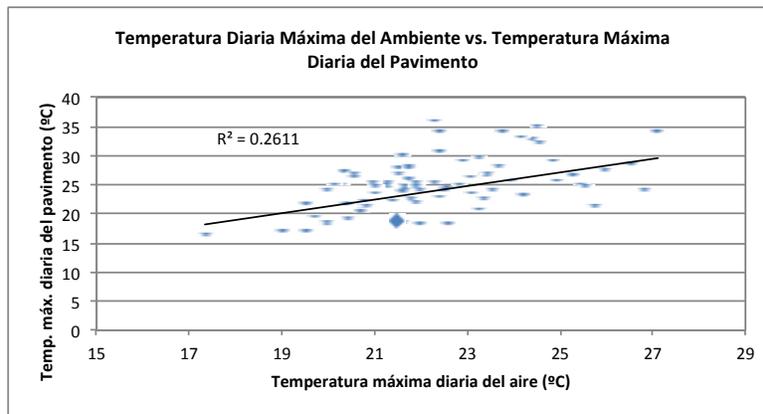


Figura 7.2. Relación entre la máxima temperatura diaria del aire y la máxima temperatura del pavimento para el pavimento flexible de la Calle 80

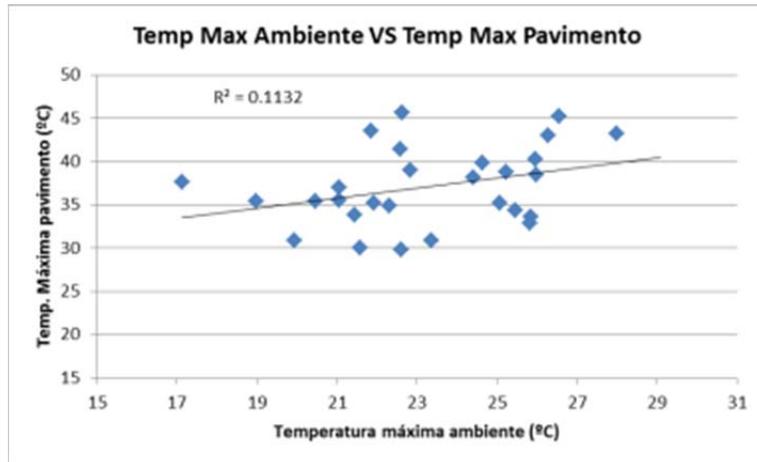


Figura 7.3. Relación entre la máxima temperatura diaria y la radiación diaria total en el pavimento rígido de la Estación Alcalá.

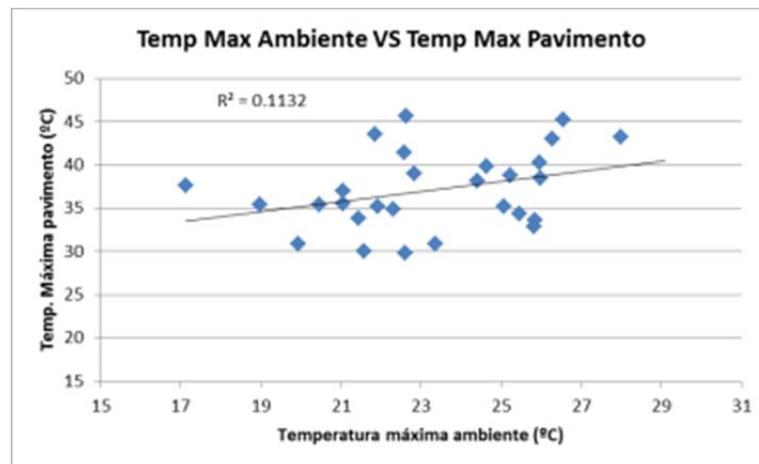


Figura 7.4. Relación entre la máxima temperatura diaria del aire y la máxima temperatura del pavimento para el pavimento rígido de estación Alcalá

Con relación a las Figuras 66 a 68, es interesante notar que cuando se disponía de una menor cantidad de información recopilada los datos eran menos dispersos y la tendencia lineal presentaba un muy buen ajuste, tal como se reportó en informes quincenales y parciales de este proyecto. Esto se evidencia en la existencia de mejores correlaciones para el caso del pavimento rígido de la Estación Alcalá en comparación con el caso del pavimento flexible de la Calle 80. Esta situación se cree que es consecuencia justamente de que para este pavimento existe un menor número de datos reportados y que, por lo tanto, todos ellos pueden corresponder a condiciones ambiental más uniformes. En otras palabras, cuando se cuenta con información de unas pocas semanas los cambios del ambiente entre los días que conforman

dichas semanas no son abruptos o significativos, lo cual promueve la existencia de relaciones entre las dos variables. A medida que se aumenta la información disponible, como ocurrió en el caso del pavimento flexible, se puede esperar un aumento en la dispersión de la información, debido a la pérdida de uniformidad en las condiciones ambientales. Este resultado supone que puede no existir una única correlación entre las variables mostradas, sino que éstas pueden depender de una tercera variable que influencia la semejanza entre los datos.

No obstante, en todos los casos presentados con anterioridad se observa la existencia de una relación de proporcionalidad entre las variables evaluadas. Es importante mencionar que las tendencias lineales se incluyeron en las gráficas con el único propósito de identificar la existencia o inexistencia de algún tipo de tendencia creciente o decreciente entre las variables. Para futuros estudios, se recomienda realizar una discriminación más detallada de la información presentada con el fin de determinar si, efectivamente, existe variables adicionales que puedan influenciar la calidad de las relaciones existentes entre las mediciones obtenidas.

Para el caso de la precipitación, la identificación del impacto que tiene esta variable en la humedad natural de los materiales al interior del pavimento debe necesariamente considerar que existe un intervalo de tiempo que debe transcurrir desde que ocurre el evento de lluvia hasta que dicho evento afecta la humedad de los suelos o el nivel freático (debido al tiempo que requieren los procesos de infiltración del agua, a la calidad del drenaje existente, etc.). Por esta razón, no es correcto analizar la relación directa entre precipitación y humedad de los suelos (i.e., los valores para un mismo instante de tiempo) sino la integral de precipitación o precipitación acumulada en diferentes periodos de tiempo (1, 3, 5 y 7 días) con los valores de **cambio** de humedad natural o del nivel freático en dicho periodo de tiempo. En otras palabras, el objetivo de realizar este tipo de gráficas es intentar determinar el tiempo que se requiere para que los eventos de lluvia generen un cambio en las propiedades climáticas al interior del pavimento.

Vale la pena mencionar que en un ejercicio inicial se analizó la existencia de correlaciones entre la precipitación acumulada y el valor final de la humedad natural o del nivel freático del periodo de acumulación considerado. No obstante, se concluyó que esta aproximación era inadecuada ya que lo interesante es determinar si la precipitación acumulada influencia el **cambio** en las variables mencionadas y no su valor al final de un periodo de tiempo. Por esta razón, el análisis se repitió en su totalidad con las consideraciones mencionadas en el párrafo anterior.

Es importante mencionar que en el segundo informe de avance se identificó que los datos de precipitación capturados por la estación meteorológica de la estación Alcalá son inusualmente altos. Sin embargo, se realizó una verificación a las variables de calibración del sensor (nota: el equipo viene calibrado de fábrica), sin encontrar ningún tipo de inconsistencia, lo que hizo imposible determinar una causa que permitiera dar una explicación válida a esta situación. Los datos se dejaron con los valores originales pero, dado que existe esta inconsistencia, el análisis correspondiente se realizó de forma cualitativa y no cuantitativa.

Las siguientes gráficas presentan los resultados obtenidos para los dos pavimentos, los cuales fueron reportados con anterioridad en el tercer informe parcial de este proyecto.

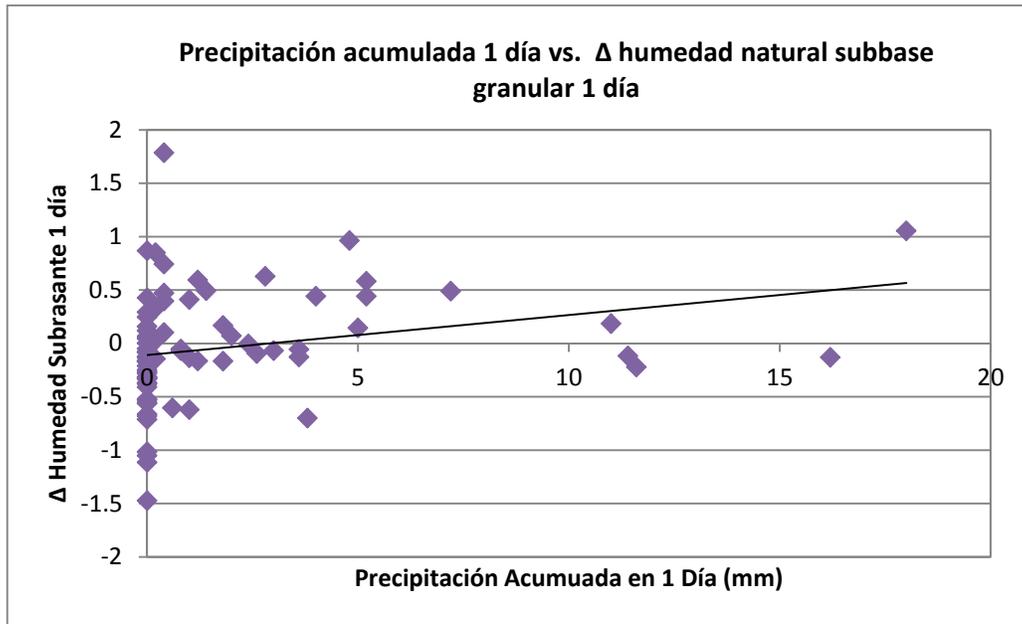


Figura 7.5. Precipitación acumulada 1 día vs. Δ humedad natural subbase granular 1 día, pavimento flexible de la Calle 80.

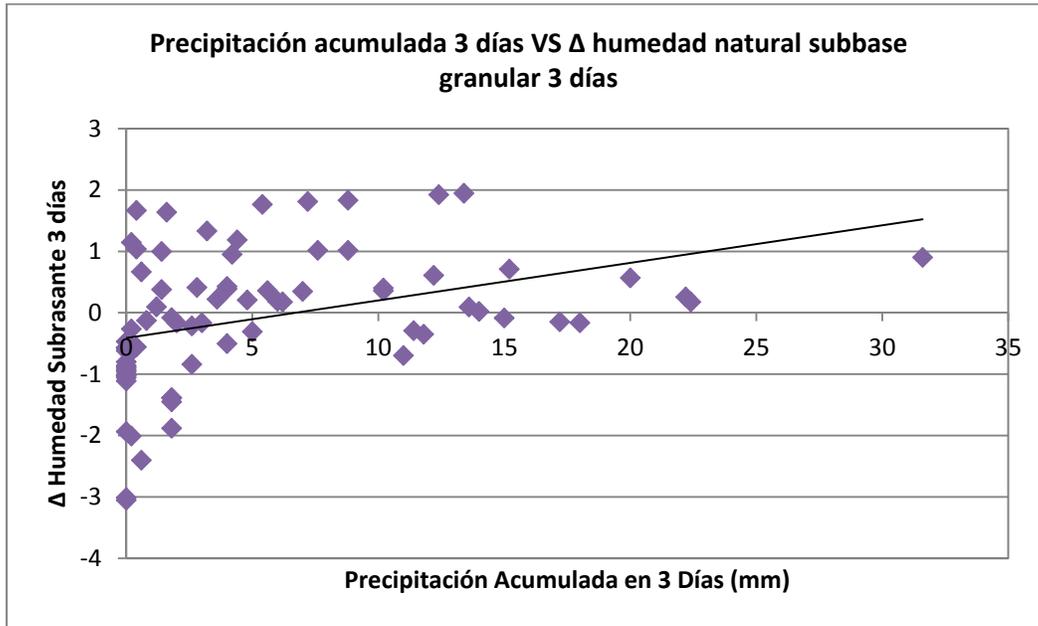


Figura 7.6. Precipitación acumulada 3 días vs. Δ humedad natural subbase granular 3 días, pavimento flexible de la Calle 80.

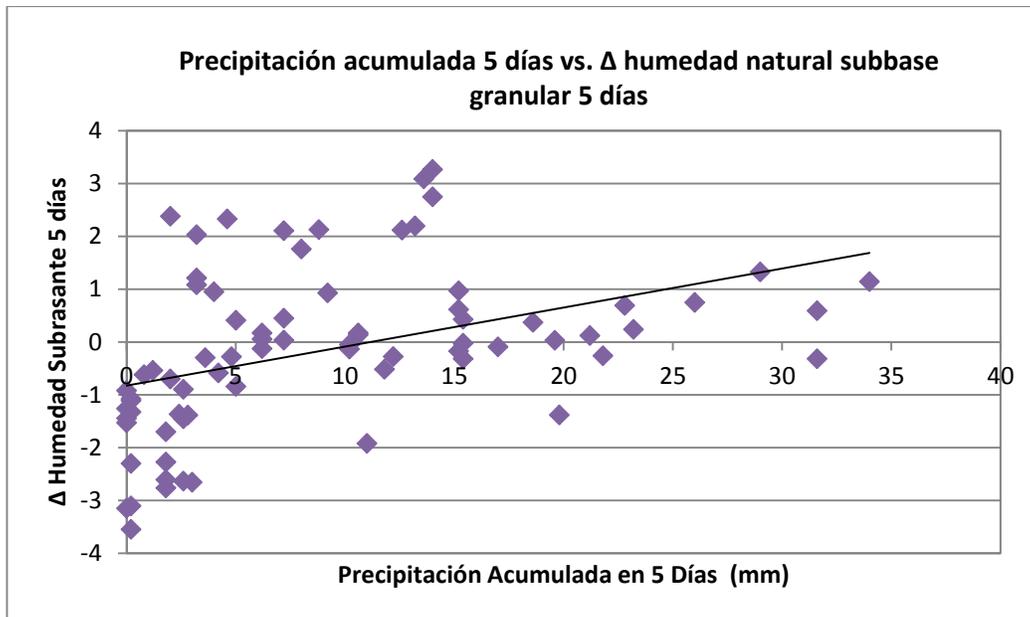


Figura 7.7. Precipitación acumulada 5 días vs. Δ humedad natural subbase granular 5 días, pavimento flexible de la Calle 80.

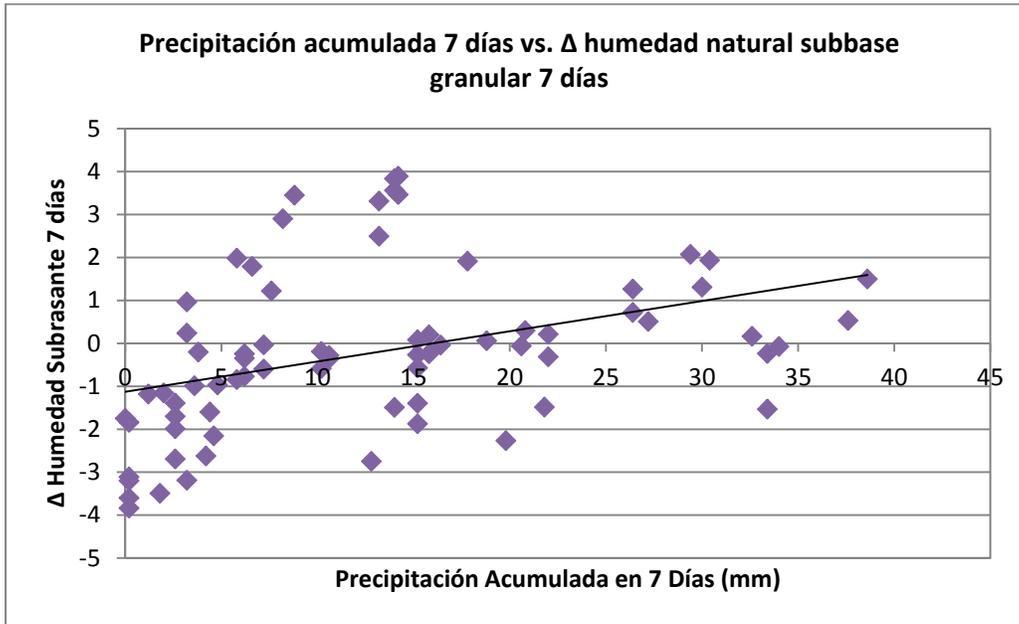


Figura 7.8. Precipitación acumulada 7 días vs. Δ humedad natural subbase granular 7 días, pavimento flexible de la Calle 80.

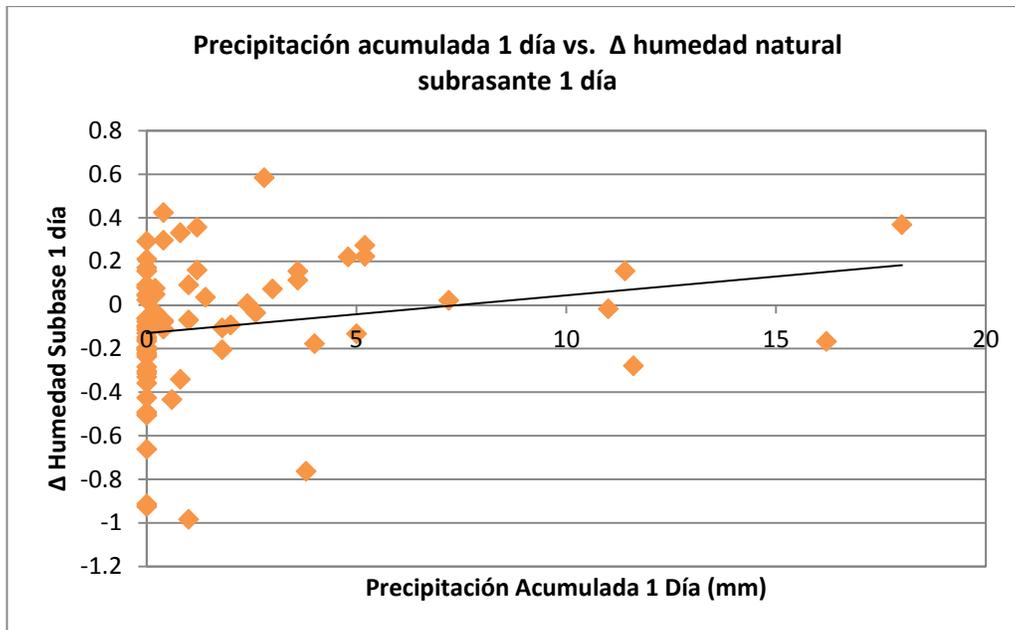


Figura 7.9. Precipitación acumulada 1 día vs. Δ humedad natural subrasante 1 día, pavimento flexible de la Calle 80.

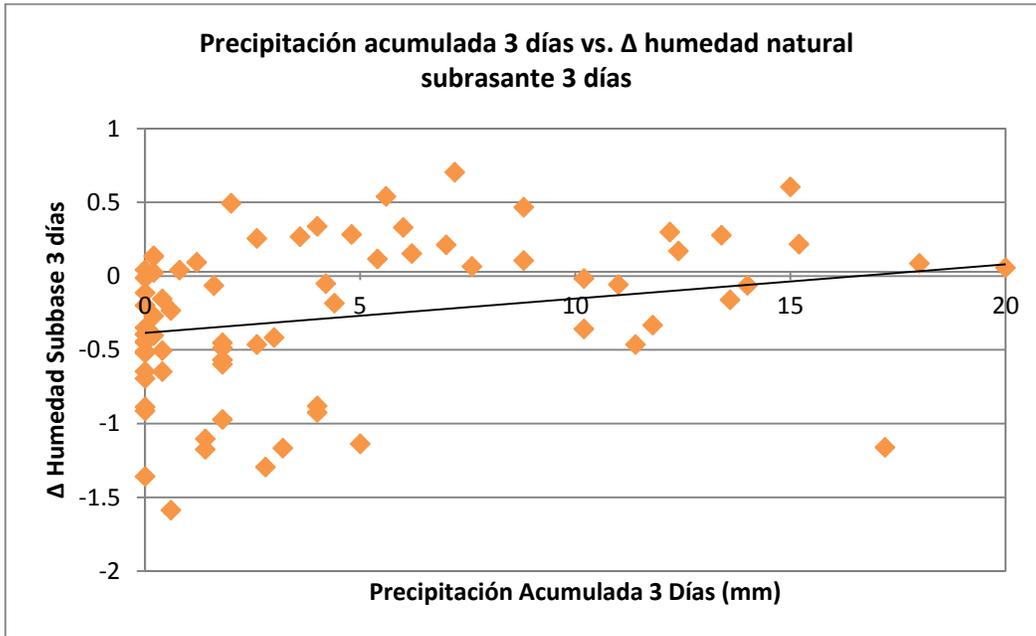


Figura 7.10. Precipitación acumulada 3 días vs. Δ humedad natural subrasante 3 días, pavimento flexible de la Calle 80.

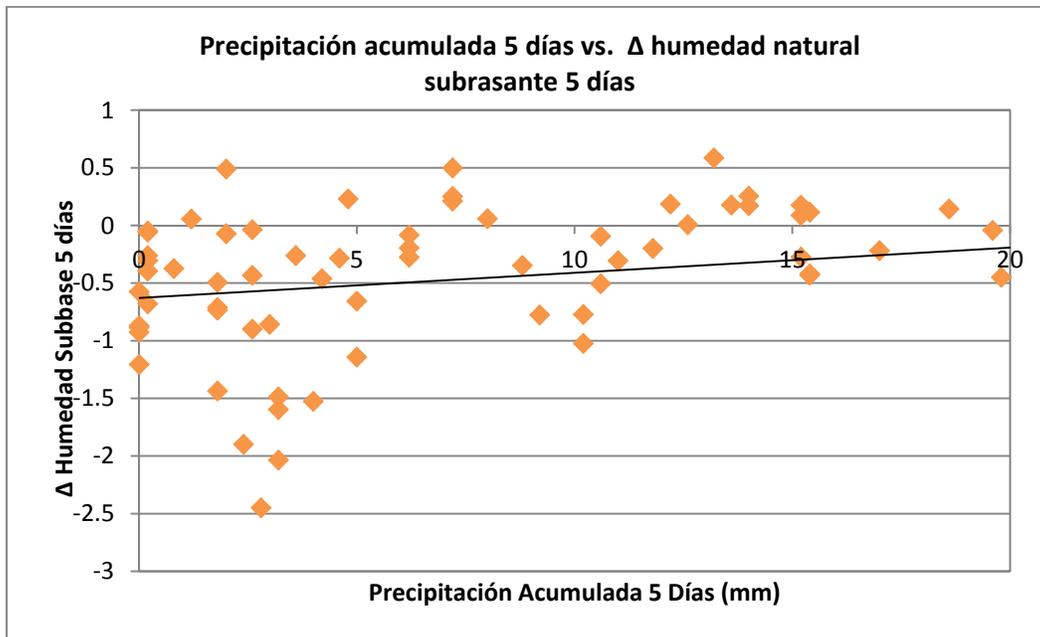


Figura 7.11. Precipitación acumulada 5 días vs. Δ humedad natural subrasante 5 días, pavimento flexible de la Calle 80.

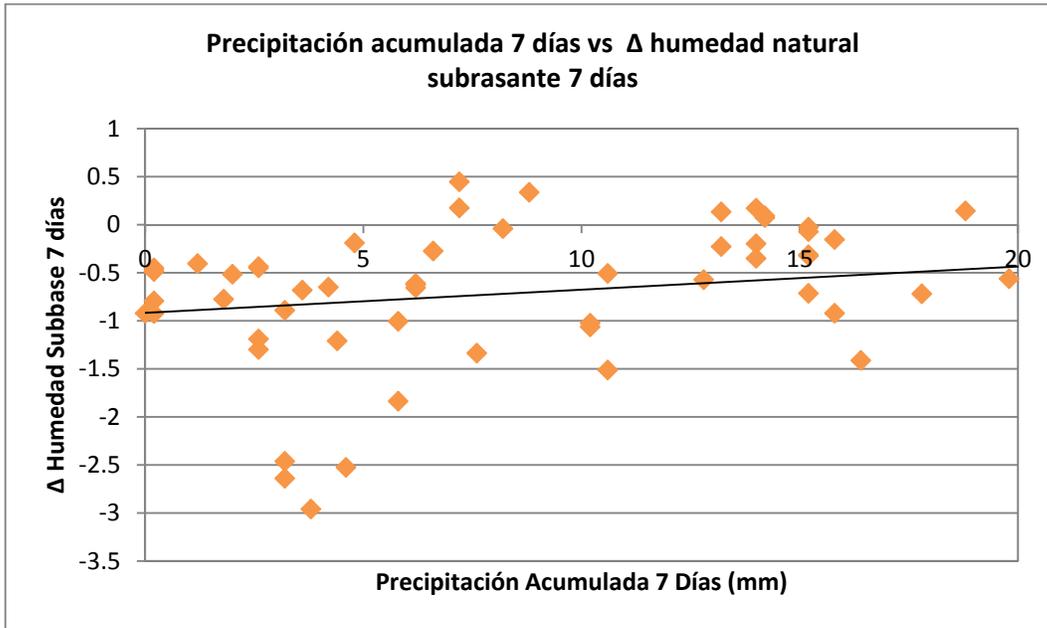


Figura 7.12. Precipitación acumulada 7 días vs. Δ humedad natural subrasante 7 días, pavimento flexible de la Calle 80.

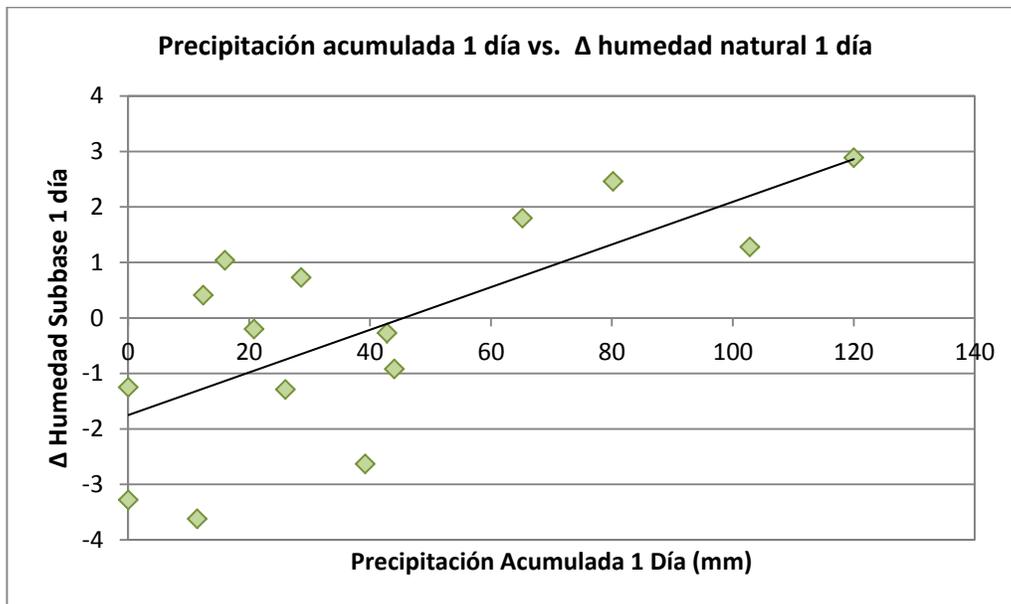


Figura 7.13. Precipitación acumulada 1 día vs. Δ humedad natural de la subbase 1 día, pavimento rígido de la Estación Alcalá.

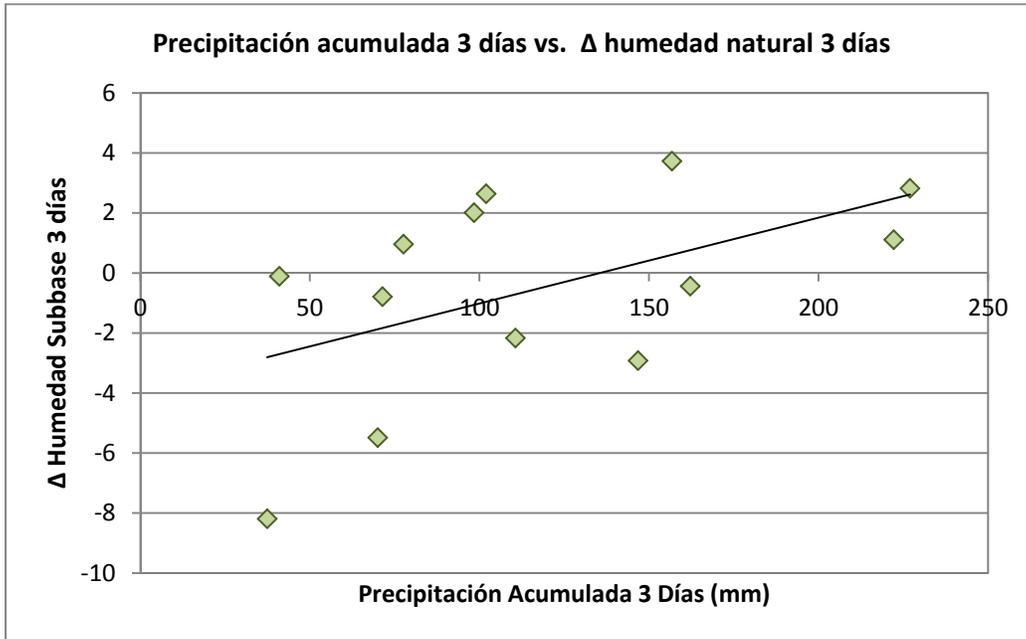


Figura 7.14. Precipitación acumulada 3 días vs. Δ humedad natural de la subbase 3 días, pavimento rígido de la Estación Alcalá.

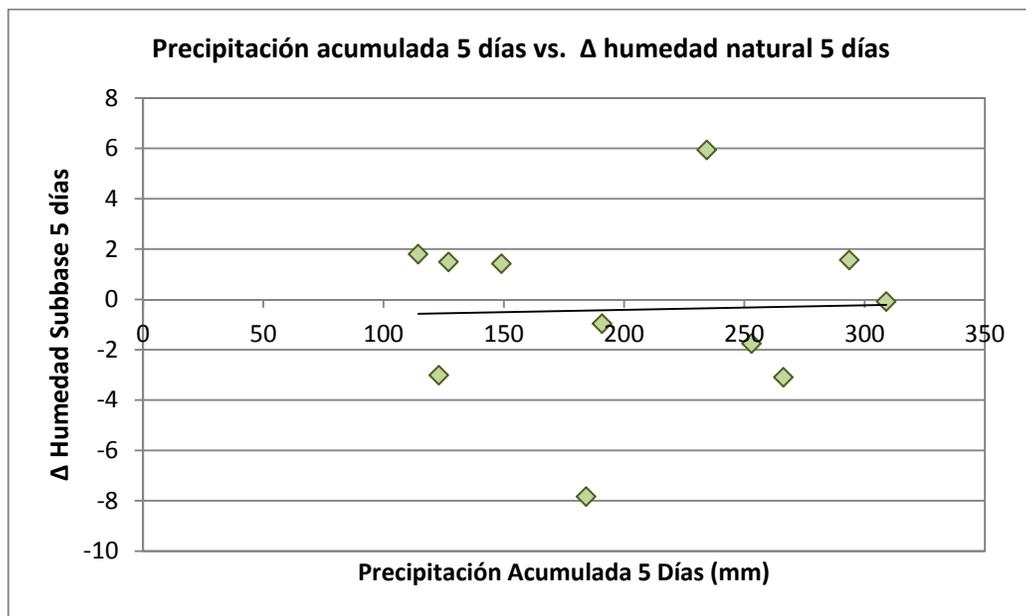


Figura 7.15. Precipitación acumulada 5 días vs. Δ humedad natural de la subbase 5 días, pavimento rígido de la Estación Alcalá.

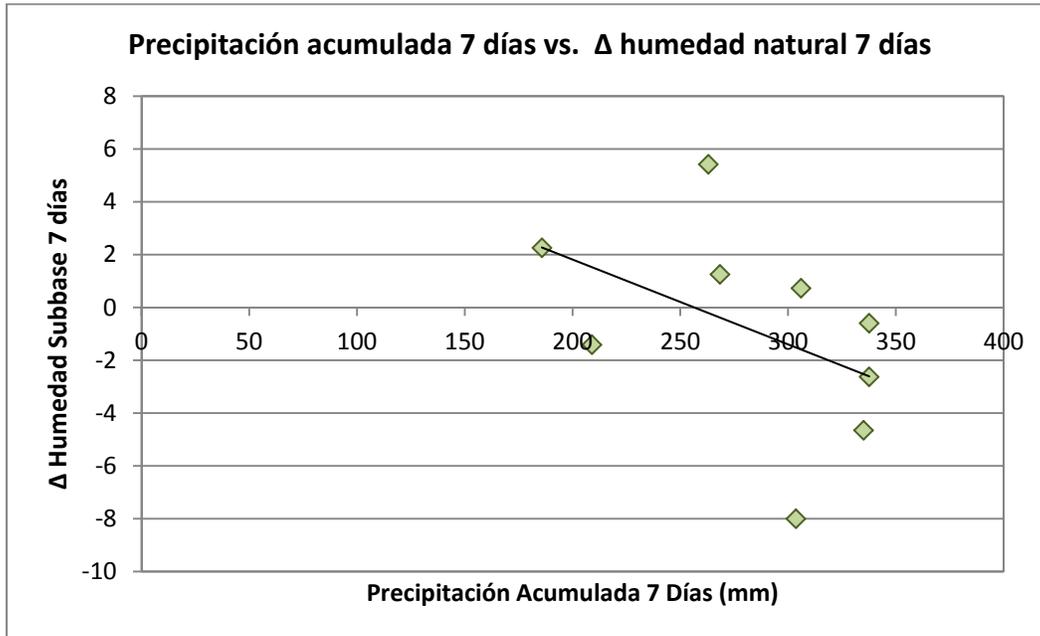


Figura 7.16. Precipitación acumulada 7 días vs. Δ humedad natural de la subbase 7 días, pavimento rígido de la Estación Alcalá.

Con respecto al pavimento flexible, los resultados muestran que existe una tendencia entre las variables evaluadas. No obstante, la calidad general de las correlaciones es baja y no se puede hablar de una correlación o tendencia determinada. Sin embargo, aun cuando existe una dispersión significativa en las relaciones presentadas, estas gráficas permiten obtener resultados interesantes. Tanto en el caso de la subbase granular como en la subrasante, se observa que para bajos periodos de acumulación de precipitación no hay un impacto en el cambio de la humedad natural de los suelos. En otras palabras, la precipitación natural requiere de un mayor tiempo para impactar dichas propiedades, lo que se evidencia por la falta total de afectación de la precipitación en el cambio de las propiedades de los suelos para bajos periodos de tiempo. Así mismo, se observa que cuando el periodo de acumulación de precipitación es muy alto, disminuye la calidad de la correlación. Por lo tanto, periodos de acumulación de 5 y 7 días de precipitación parecen ser los que presentan mejores correlaciones con el cambio generado en la humedad natural, tanto del suelo de subbase como del suelo de subrasante, respectivamente. En otras palabras, parecería que la precipitación que se registra en las zona cercana al pavimento requiere de aproximadamente de 5 días (para la subbase) a 7 días (para la subrasante) para impactar las propiedades hídricas de los materiales no cementados del pavimento.

Es importante mencionar que este tipo de correlaciones es muy particular de cada proyecto vial. Esto se debe a que condiciones como la existencia o inexistencia de separadores con cemento o vegetación expuesta, bermas pavimentadas y/o de sistemas superficiales y subsuperficiales

de drenaje afectan directamente la infiltración del agua y las posibilidades de ésta de llegar a las capas interiores del pavimento y de alterar sus condiciones hídricas.

En el caso del pavimento rígido, por otra parte, se observa un comportamiento diferente al reportado para el caso del pavimento flexible. En esta oportunidad los resultados del análisis sugieren que la humedad del suelo de subbase no es independiente de la precipitación acumulada en cortos periodos de tiempo. De hecho, la mejor correlación se observa para el caso de acumulación de precipitación de 1 y 3 días. Para periodos mayores, se observa que se pierde la correlación entre los datos, insinuando que periodos de acumulación de precipitación superiores a 3 días dejan de tener influencia sobre la humedad de este material. Aunque es difícil explicar con certeza este comportamiento, es probable que el agua de lluvia tenga acceso más fácil al suelo de subbase en este pavimento que en el pavimento flexible, debido a las condiciones de drenaje, sellado de juntas y/o otras condiciones locales. Específicamente, es importante mencionar que en este punto de instrumentación el separador adyacente al pavimento está cubierto de vegetación; es decir, existe una zona donde el agua se puede infiltrar fácilmente. Esta situación no ocurre en el caso del pavimento flexible en donde el separador se encuentra recubierto por concreto.

Por otra parte, las Figuras 7.17 a 7.20 presentan la relación que existe entre la precipitación acumulada en periodos de 1, 3, 5 y 7 días y el **cambio** generado en el nivel freático durante los mismos periodos de tiempo para el caso del pavimento flexible (Calle 80). De forma equivalente, las Figuras 7.21 a 7.24 presentan relaciones similares pero para el caso del pavimento rígido (Estación Alcalá). En ambos casos se busca determinar el tiempo que requiere la precipitación en la zona adyacente a las estructuras de pavimento en impactar el nivel freático.

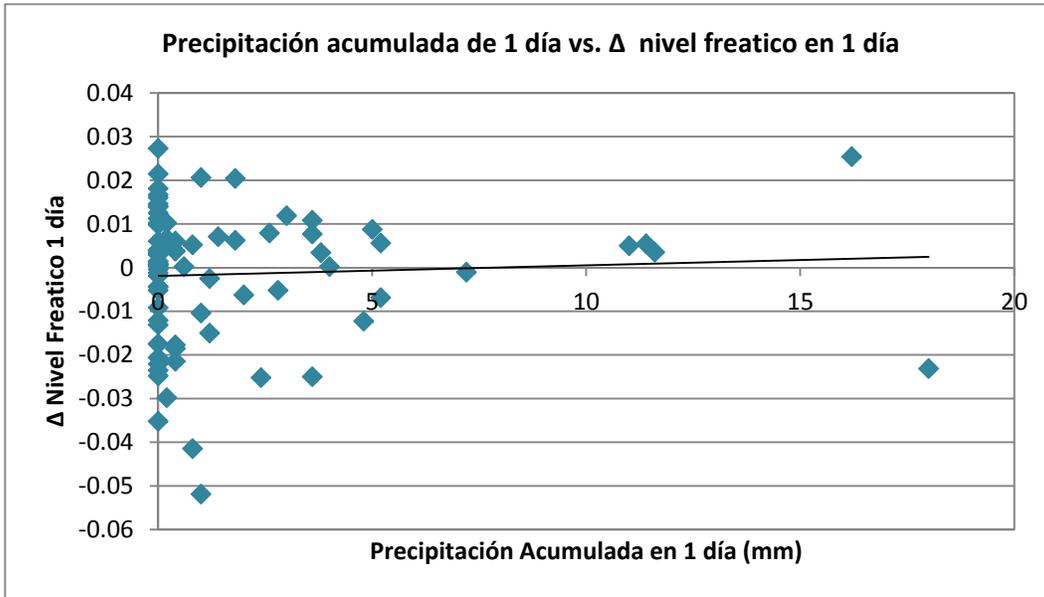


Figura 7.17. Precipitación acumulada 1 día vs. Δ nivel freático 1 día, pavimento flexible de la Calle 80.

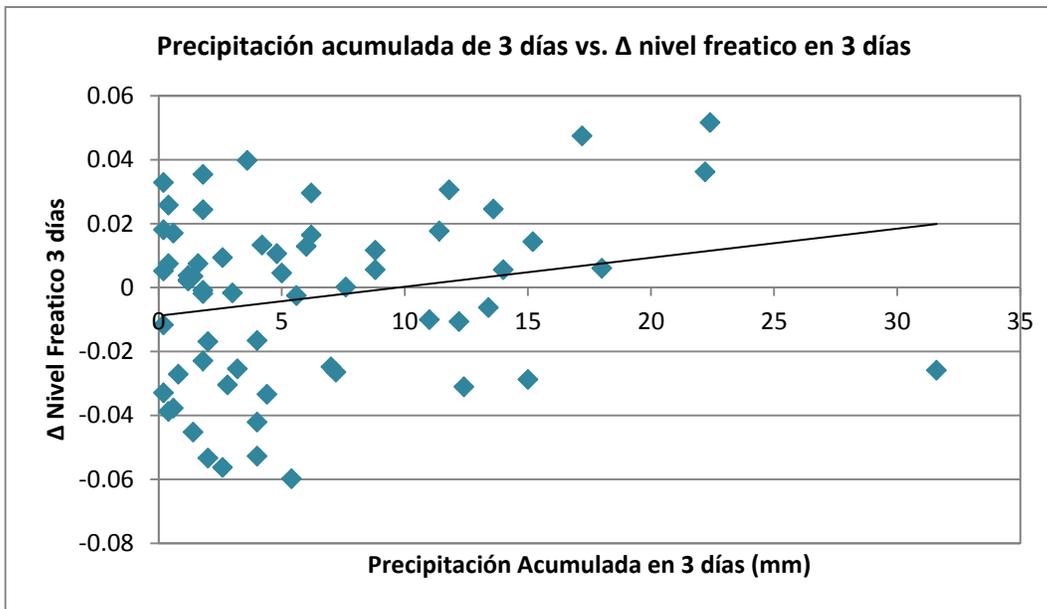


Figura 7.18. Precipitación acumulada 3 días vs. Δ nivel freático 3 días, pavimento flexible de la Calle 80.

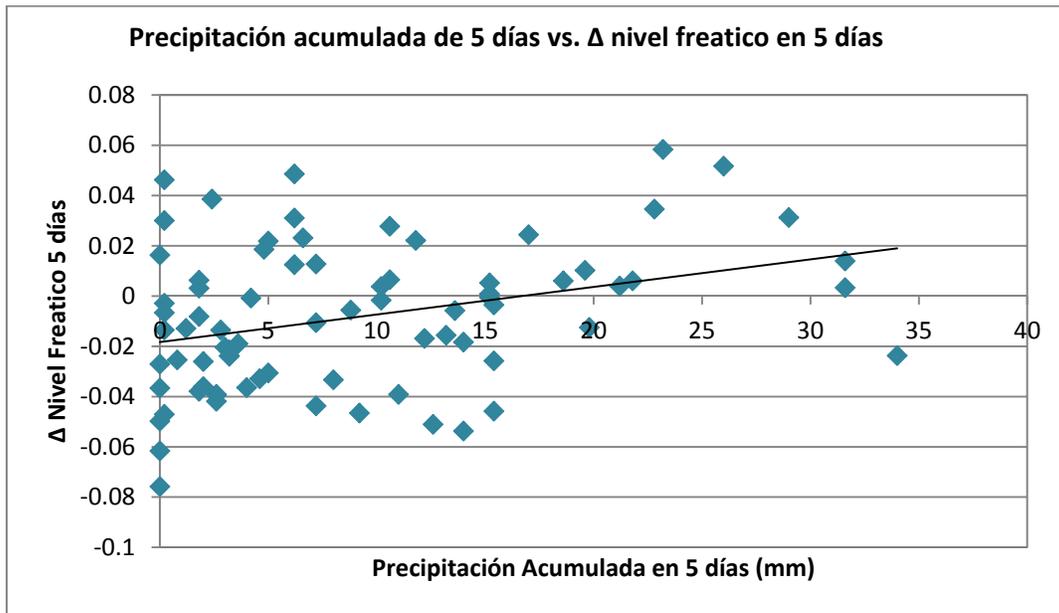


Figura 7.19. Precipitación acumulada 5 días vs. Δ nivel freático 5 días, pavimento flexible de la Calle 80.

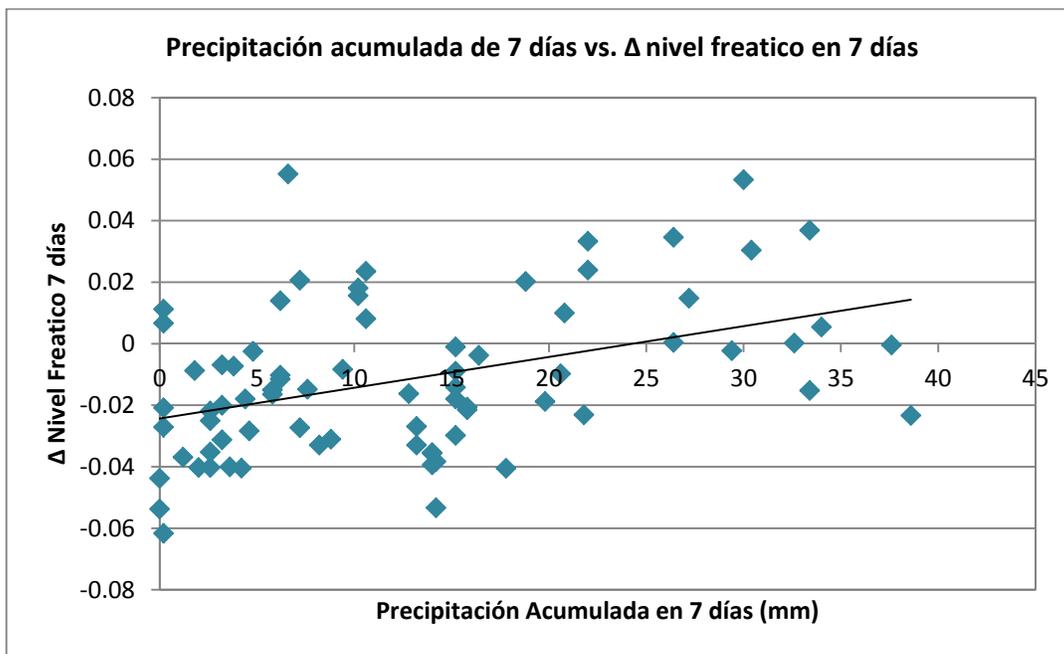


Figura 7.20. Precipitación acumulada 7 días vs. Δ nivel freático 7 días, pavimento flexible de la Calle 80.

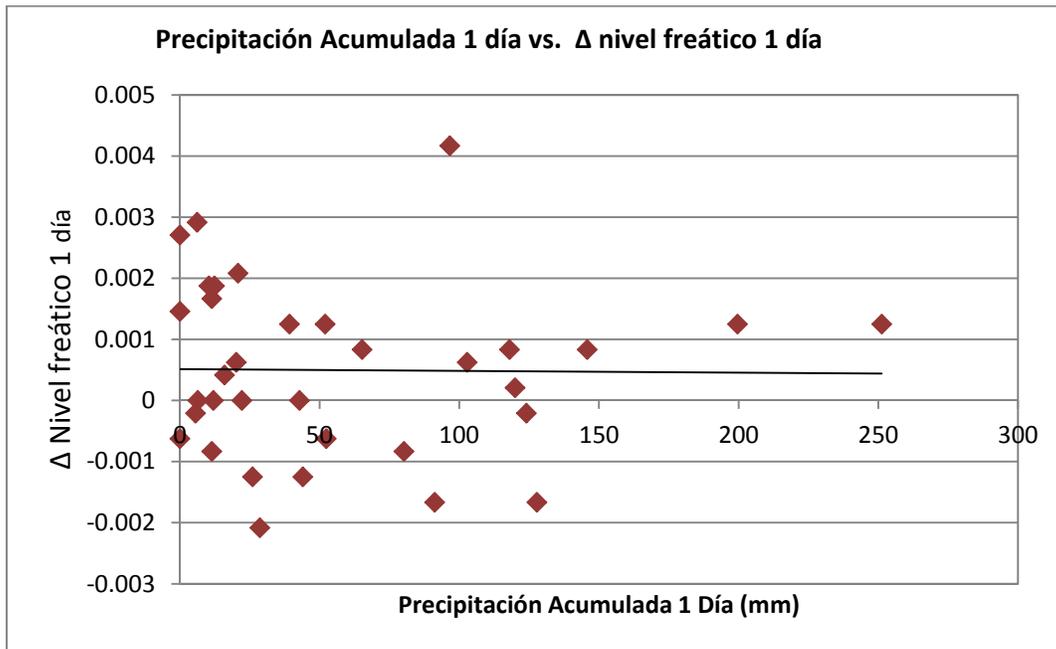


Figura 7.21. Precipitación acumulada 1 día vs. Δ nivel freático 1 día, pavimento rígido de la Estación Alcalá.

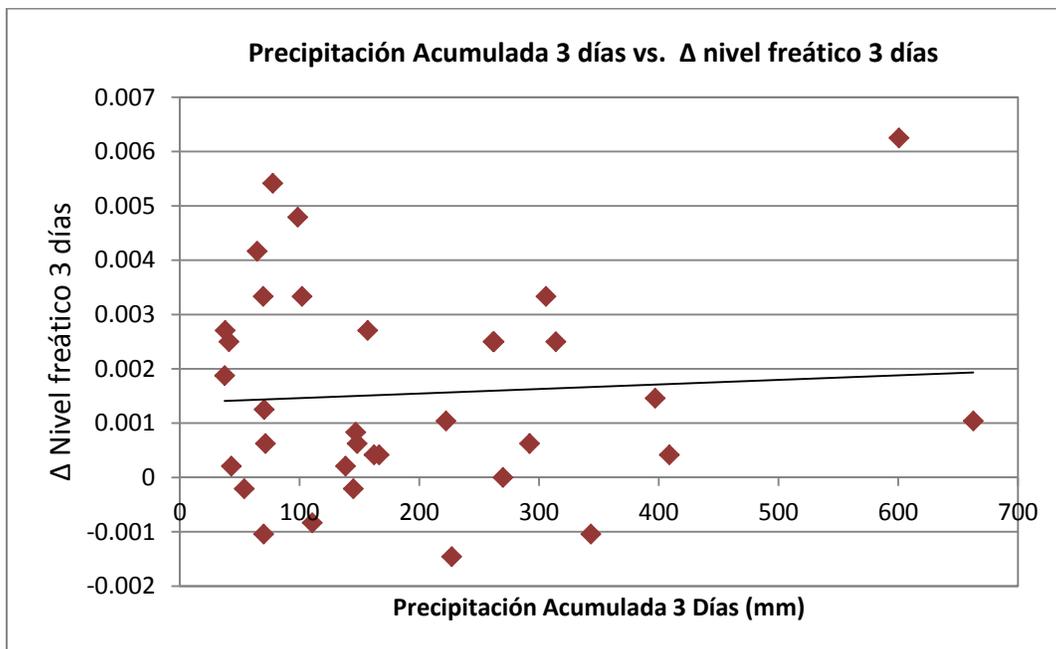


Figura 7.22. Precipitación acumulada 3 días vs. Δ nivel freático 3 días, pavimento rígido de la Estación Alcalá.

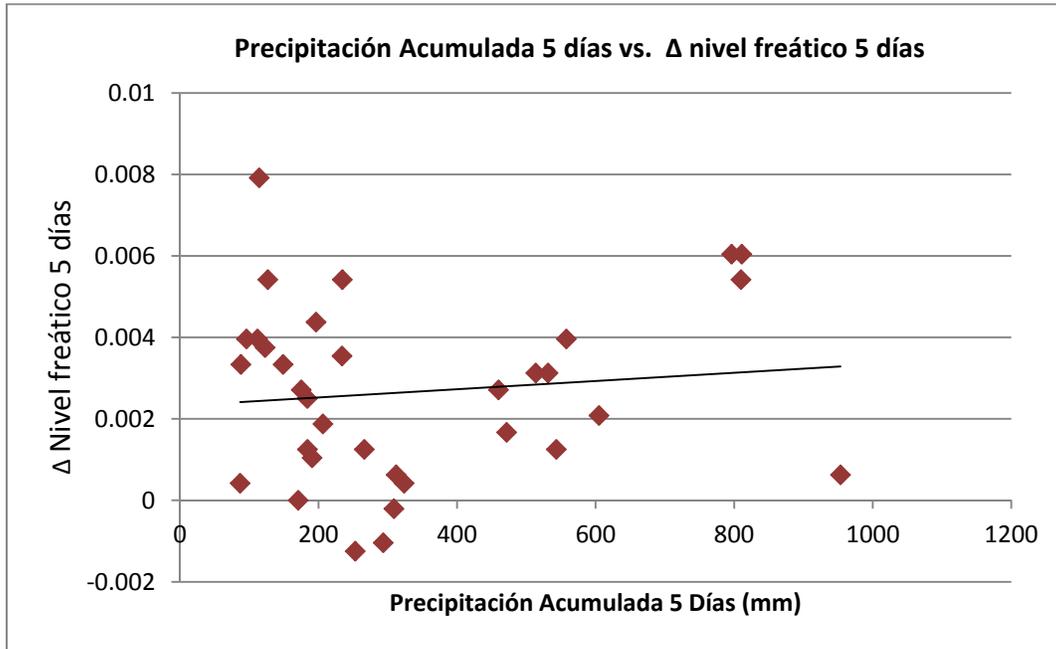


Figura 7.23. Precipitación acumulada 5 días vs. Δ nivel freático 5 días, pavimento rígido de la Estación Alcalá.

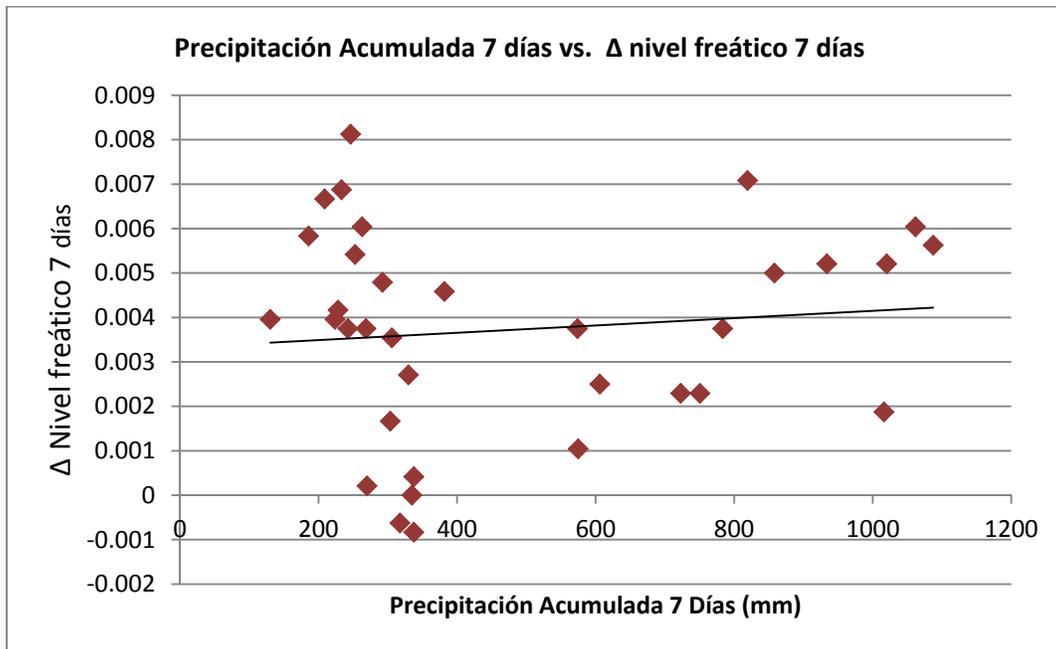


Figura 7.24. Precipitación acumulada 7 días vs. Δ nivel freático 7 días, pavimento rígido de la Estación Alcalá.

Para el caso del pavimento flexible (Calle 80), las figuras anteriores sugieren que para periodos muy cortos de tiempo (1 y 3 días) no existe ningún tipo de correlación o impacto de la precipitación registrada en la zona en el nivel freático del lugar. Dicho impacto se empieza a evidenciar cuando se analiza el efecto que tiene sobre esta variable la precipitación acumulada de 5 días y se hace más evidente en periodos de acumulación de precipitación de 7 días. Este resultado concuerda con lo observado para el impacto acumulado de la precipitación en la humedad natural de la capa de subrasante de este pavimento y su explicación puede estar relacionada a la existencia de bermas de concreto que le otorgan un carácter impermeabilizante, dificultando el ingreso de agua al interior del pavimento y al suelo circundante en la zona.

Por su parte, en el caso del pavimento rígido ubicado en la estación de Alcalá, se observa una alta dispersión en los datos. A pesar de esta alta dispersión, un análisis de la información presentada sugiere que la mayor correlación entre la precipitación acumulada y el cambio en el nivel freático ocurre para un periodo de acumulación de 5 días. Con anterioridad se mostró que periodos cortos de acumulación de precipitación de 1 y 3 días impactan la humedad natural del suelo de subbase, por lo que también es de esperar que el tiempo requerido para impactar el nivel freático (ubicado a una profundidad mayor que la del inicio de la subrasante) sea superior a 3 días, condición que coincide con los resultados observados.

Mediante el análisis de una variable indirecta, en este caso la tasa de variación del nivel freático, es posible concluir que la tasa de infiltración de agua al interior del pavimento rígido es mayor a la del pavimento flexible. Como se mencionó con anterioridad, la infiltración del agua depende de diversas condiciones, muchas de ellas ajenas al tipo de estructura (flexible versus rígida), las cuales incluyen las condiciones específicas circundantes al pavimento como la existencia de vegetación en el separador contiguo al pavimento, la existencia o inexistencia de obras de drenaje adecuadas, etc.

Por otra parte, las Figuras 7.25 y 7.26 presentan las curvas de retención de la subbase granular y la subrasante para el pavimento flexible de la Calle 80 y la Figura 7.27 presenta esta misma curvas para el material de subbase del pavimento rígido de la Estación Alcalá. La curva de retención es una propiedad fundamental de un suelo y muestra la relación que existe entre la succión y la humedad natural. Es importante mencionar que para un mismo suelo esta curva es diferente para fenómenos de humedecimiento y fenómenos de secado. En los datos disponibles del sistema de instrumentación no es posible distinguir entre estos dos casos. Por esta razón, la nube de datos que se obtuvo se puede interpretar como una “envolvente” de las curvas de humedecimiento y secado para la zona media de humedades, en donde la curva se encuentra en una zona estable (i.e., pendientes cercanas a cero). Es importante mencionar que, tal como se explicó en secciones anteriores, las magnitudes absolutas de los valores de succión son un poco más altos de lo esperado, aun cuando la verificación de las variables de calibración no arrojó inconsistencias que permitieran efectuar correcciones confiables a estos valores. No

obstante, la *tendencia* observada en las Figuras mencionadas no se ve afectada por esta condición.

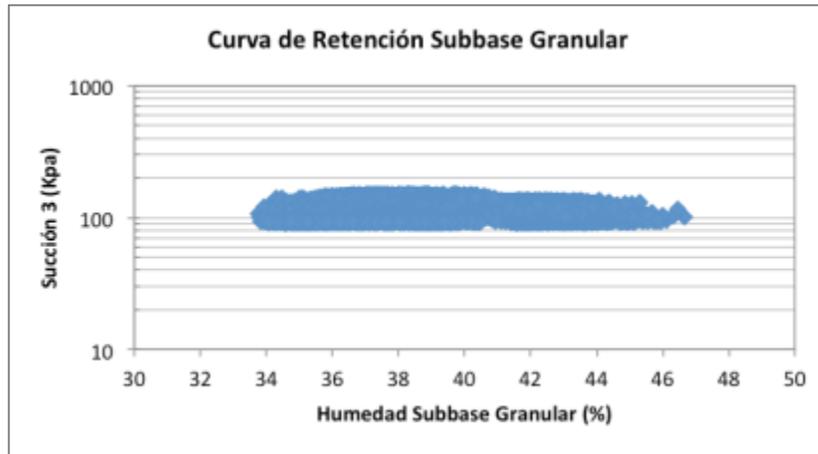


Figura 7.25. Curva de retención para el material de subbase en el pavimento flexible de la Calle 80.

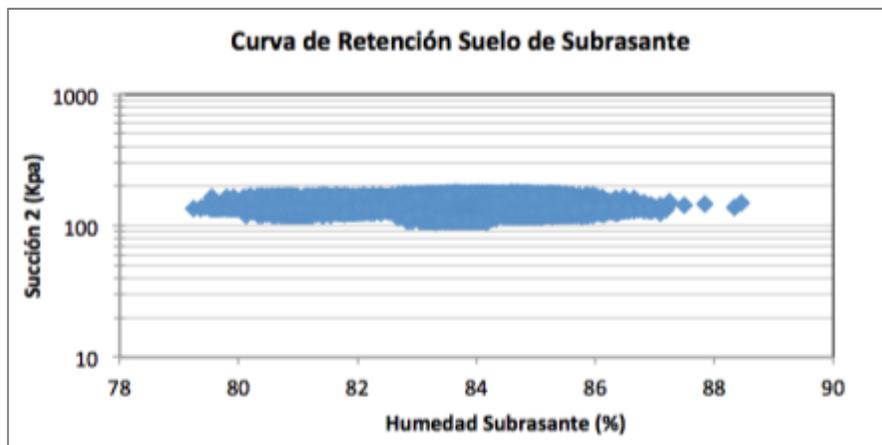


Figura 7.26. Curva de retención para el material de subrasante en el pavimento flexible de la Calle 80.

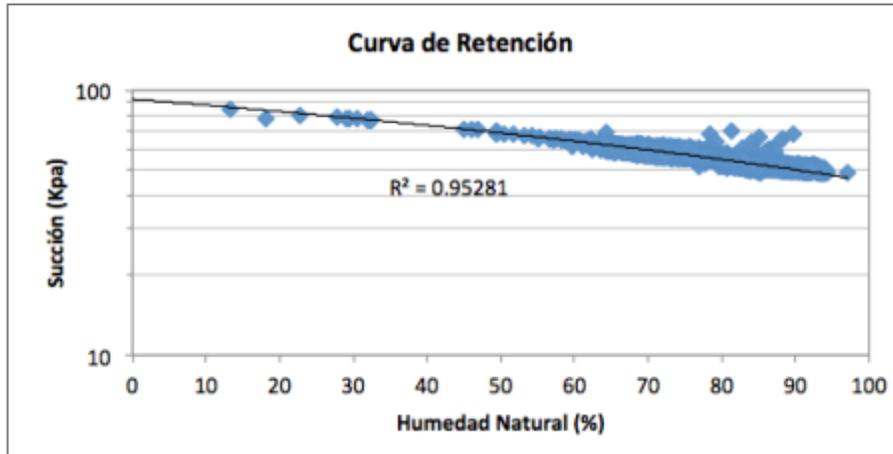
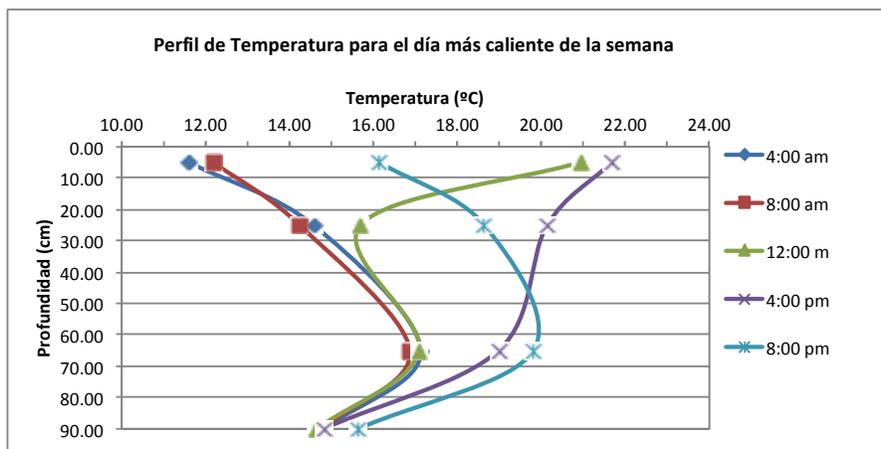
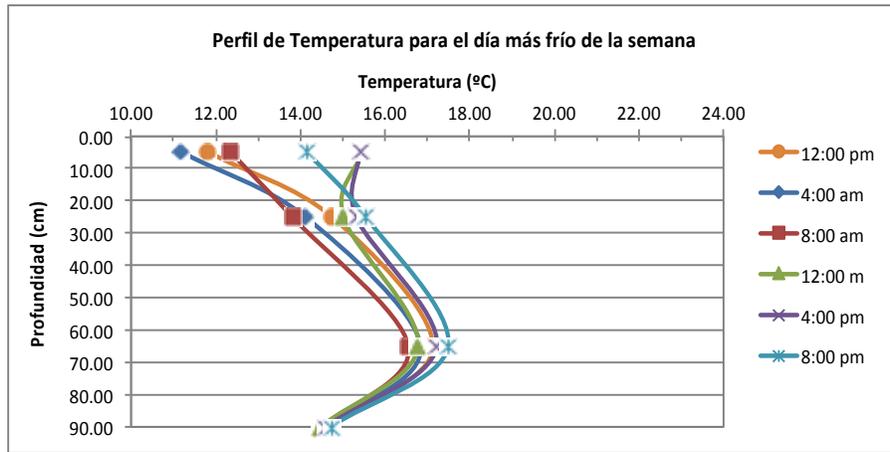


Figura 7.27. Curva de retención para el material de subbase en el pavimento rígido de la Estación Alcalá

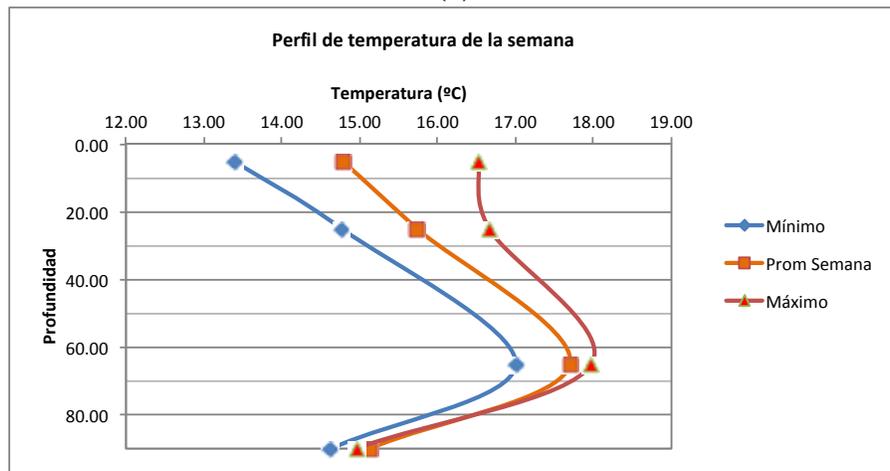
Adicionalmente a las correlaciones mencionadas con anterioridad, se realizó un análisis de los perfiles verticales de temperatura al interior del pavimento y del cambio de dichos perfiles a lo largo del día. La Figura 7.28 muestra un ejemplo de los perfiles obtenidos para la semana comprendida entre el 16 al 22 de Abril en el pavimento flexible y la Figura 7.29 muestra un resultado similar pero para el caso del pavimento rígido. Estos perfiles se realizaron para dos días en cada semana: el día que presenta las mayores temperaturas promedio y el día que presenta las menores temperaturas promedio. Además, se presenta el perfil de las condiciones de temperatura máxima, mínima y media para la semana.



(a)

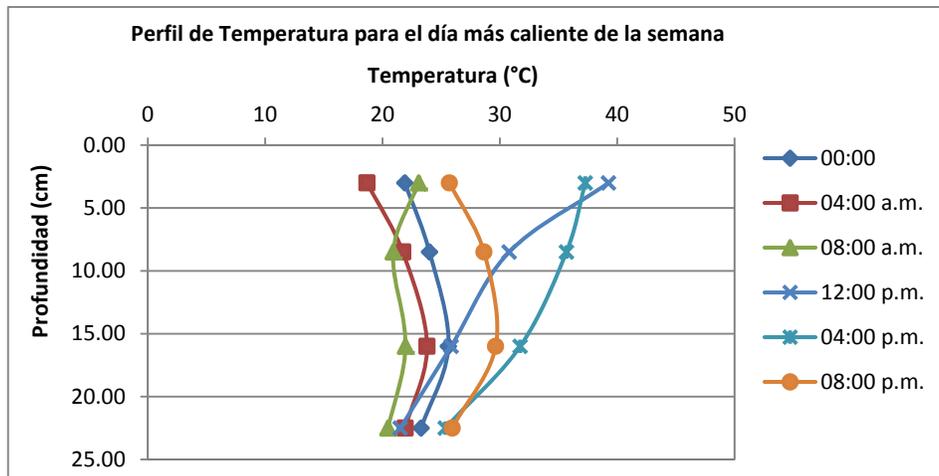


(b)

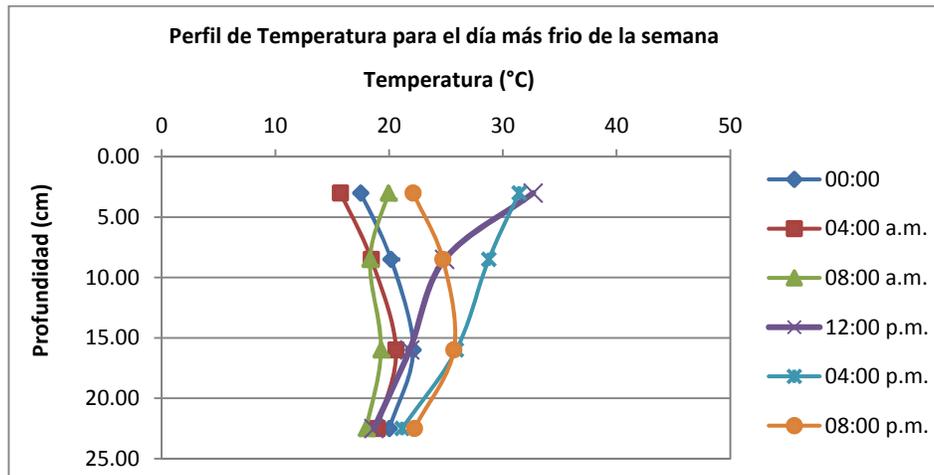


(c)

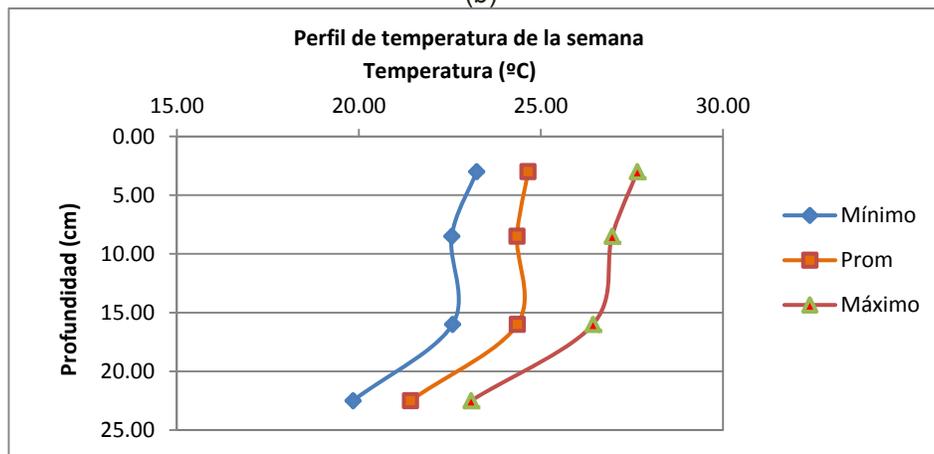
Figura 7.28. Perfiles de temperatura semanales en el pavimento flexible de la Calle 80 para una semana típica de Abril de 2012



(a)



(b)



(c)

Figura 7.29. Perfiles de temperatura semanales en el pavimento rígido de la Estación Alcalá para una semana típica de Octubre de 2012

En los dos casos las tendencias de los perfiles de temperatura mostradas en estas figuras son lógicas y capturan cómo el cambio de temperatura es muy alto en cercanías a la superficie del pavimento (i.e., cambios de hasta 11°C) y muy pequeño en la subrasante (Figura 7.28a). Para el caso del pavimento flexible, los perfiles muestran cómo la temperatura se modifica a lo largo del día influenciando principalmente los primeros 70 cm del pavimento, siendo máxima en horas de la tarde (i.e., cuando las máximas temperaturas del aire se ha difundido en el pavimento) y mínima en el periodo comprendido entre la madrugada y las 8:00 am. Así mismo, en la Figura 7.28b se observa que para el día de menores temperaturas los cambios en los perfiles son mínimos a lo largo del día, presentando cambios inferiores a los 4° o 5°C en cercanías a la superficie del pavimento; es decir, la variación de la temperatura en cercanías de la superficie del pavimento en el día más frío de la semana es menos de la mitad de la variación de temperatura en la misma zona para el día más caliente.

Con respecto al pavimento rígido, se observa que el comportamiento de la temperatura al interior de este pavimento es cualitativamente similar a la observada en el pavimento flexible. En las gráficas de las dos figuras iniciales (Figura 7.29 a y b) se puede concluir que el sensor más superficial alcanza la máxima temperatura entre las 12:00 del medio día y antes de las 4:00 p.m. De hecho, a las 4:00 pm el valor de la temperatura es ligeramente inferior al reportado a medio día. Es importante mencionar que en este pavimento el primer sensor se encuentra localizado a 2 cm de profundidad de la superficie del pavimento dentro de la losa de concreto, lo que genera que los valores de temperatura reportados por este sensor sean significativamente más altos que los observados para el pavimento flexible (i.e., superiores a los 40°C), cuyo primer sensor se encuentra localizado a aproximadamente 5 cm de profundidad.

Por otra parte, la Figura 7.30 muestra los valores de temperatura de diferentes sensores ubicados al interior del pavimento flexible de la Calle 80 con Estación Escuela Militar a través de un día típico. En esta gráfica se aprecia un desfase en los tiempos requeridos por cada una de las capas para alcanzar el valor máximo de temperatura diaria. Los sensores de esta gráfica se encuentran ubicados en orden descendente, donde TEMPERATURA 1, corresponde al sensor ubicado en la parte superior de la base asfáltica, TEMPERATURA 3, a aquel ubicado en la parte inferior de la capa de base asfáltica, ÁRBOL T1, el sensor ubicado en la capa granular, y ÁRBOL T2 en la capa de subrasante. De forma similar, la Figura 7.31 muestra relaciones de cambio de temperatura a lo largo de un día similares a las de la Figura 7.30, pero para el caso del pavimento rígido. En este caso también es posible identificar el desfase que existe entre los tiempos de llegada a las máximas temperaturas en las diferentes capas, con una diferencia muy visible entre la temperatura de la capa superior y el resto de capas inferiores.

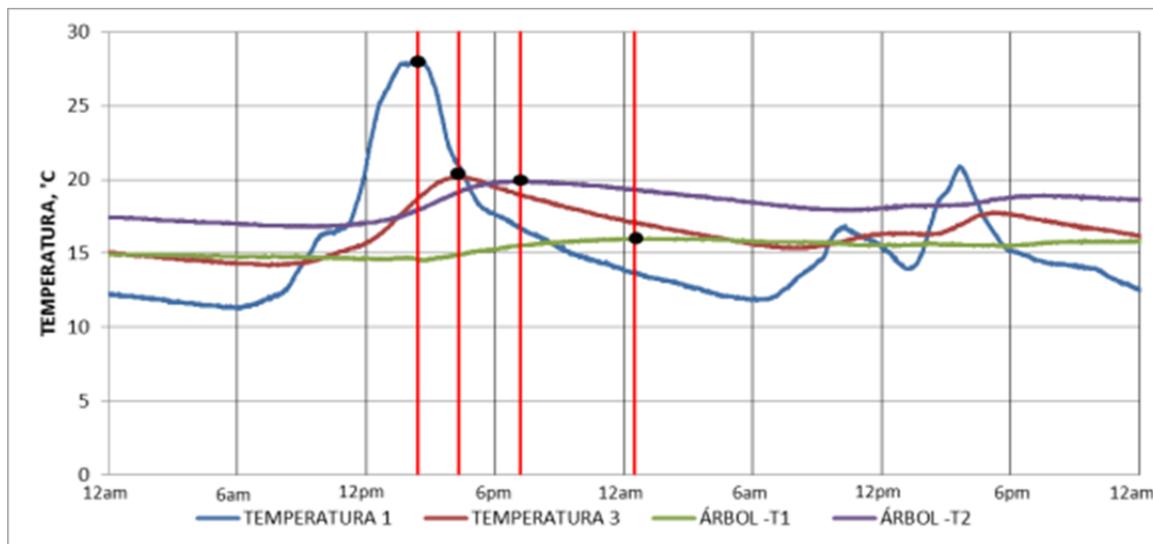


Figura 7.30. Desfase de tiempo en medidas de temperatura máxima para cada sensor en el pavimento flexible de la Calle 80.

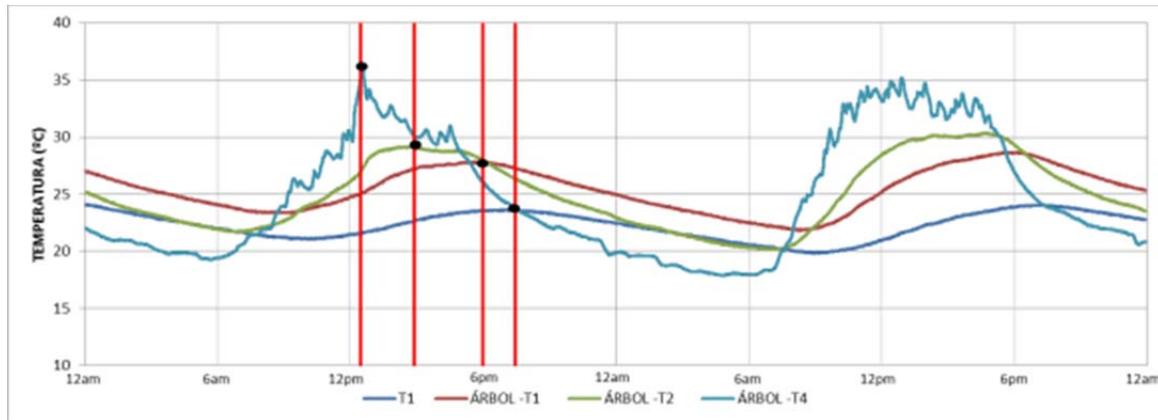


Figura 7.31. Desfase de tiempo en medidas de temperatura máxima para cada sensor e el pavimento rígido de la Estación Alcalá.

7.4. Análisis de las variables dinámicas

El análisis de las variables dinámicas se dividió en tres fases principales:

1. En la primera fase se determinaron los espectros de carga de los dos tramos instrumentados,
2. En la segunda fase se exploró la existencia de correlaciones en las condiciones de sollicitación de carga impuesta por el paso del tráfico y la respuesta de los vehículos, y
3. En la tercera fase se empleó la información recopilada y post-procesada de las variables dinámicas con el objetivo de realizar una validación de los datos que ofrecen los programas elásticos multi-capas empleados en el diseño mecanicista de pavimentos mediante una comparación con los reportados en pavimentos en servicio en la ciudad. En esta etapa la información recopilada también fue empleada para las pruebas realizadas al modelo numérico desarrollado en las Etapas 4 y 5 de este proyecto.

El **Anexo 4** de este documento incluye las tablas con valores típicos obtenidos de las variables dinámicas. En las siguientes secciones se explican las primeras dos fases mencionadas, mientras que la tercera se encuentra explicada en detalle en el Capítulo 10 de este informe.

7.4.1 Espectros de carga

Con la información válida recuperada de las mediciones de carga dinámica aplicada por los buses de Transmilenio a los dos pavimentos mediante las balanzas de carga WIM, se

construyeron espectros de carga típicos para cada uno de los ejes de los buses articulados. Vale la pena resaltar que estos valores de carga constituyen las solicitaciones estructurales a las que son sometidos los pavimentos. Por lo tanto, existe un interés especial en este proyecto para determinar cómo es la respuesta del pavimento ante estas solicitaciones y el impacto que tienen las variables ambientales asociadas con el momento de la aplicación de carga. Estas actividades se encuentran contempladas dentro de las fases 2 y 3 descritas con anterioridad.

En cuanto a las configuraciones de ejes y carga que transitan sobre los tramos de pavimento instrumentados, vale la pena recordar que un bus articulado típico posee tres ejes. El primero de ellos consiste en el eje direccional y es un eje simple con llantas simples. Los otros dos ejes (eje 2 y eje 3) corresponden a ejes simples con llantas duales. La Figura 7.32 muestra un esquema de la configuración típica de los ejes de uno de estos buses. Así mismo, la Figura 7.33 muestra el paso de un bus sobre las balanzas WIM instaladas en el punto de instrumentación. Vale la pena mencionar que en la Autopista Norte circulan buses bi-articulados. En este caso los buses cuentan con cuatro ejes (eje 1 o direccional, eje 2 o primer eje central, eje 3 o segundo eje central y eje 4 o eje trasero).

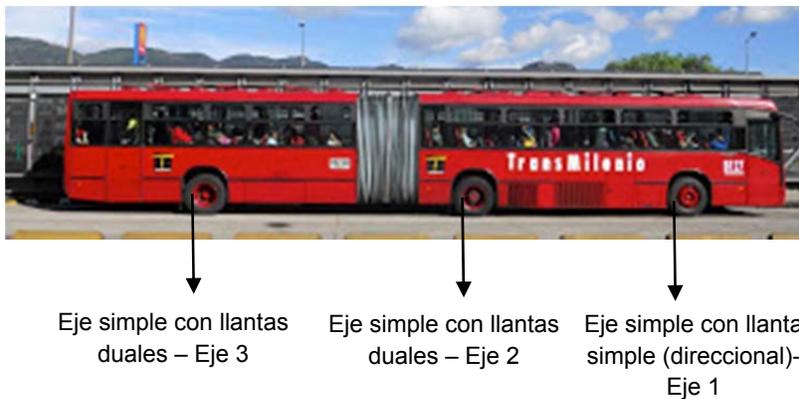


Figura 7.32. Configuración de ejes de los buses uni-articulados de Transmilenio



Figura 7.33. Detalle del paso de un bus de Transmilenio sobre las balanzas WIM instaladas en la Autopista Norte con Estación Alcalá

Las Figuras 7.34, 7.35 y 7.36 presentan los espectros de carga para los buses que circulan por el pavimento de la Calle 80 con Estación Escuela Militar, mientras que las Figuras 7.37 a 7.40 presentan los espectros equivalentes para los buses que circulan por la Autopista Norte con Estación Alcalá.

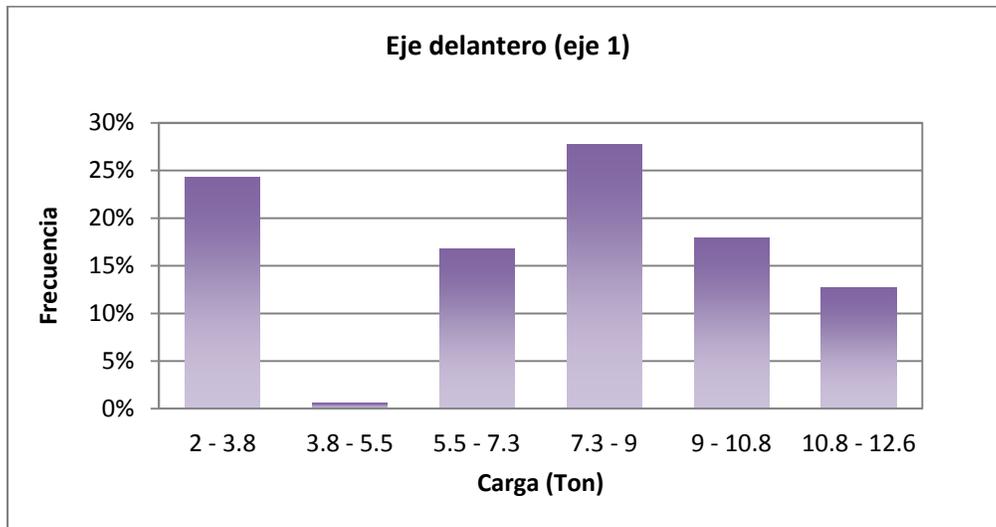


Figura 7.34. Espectro de carga para el eje delantero o direccional, pavimento flexible en Calle 80

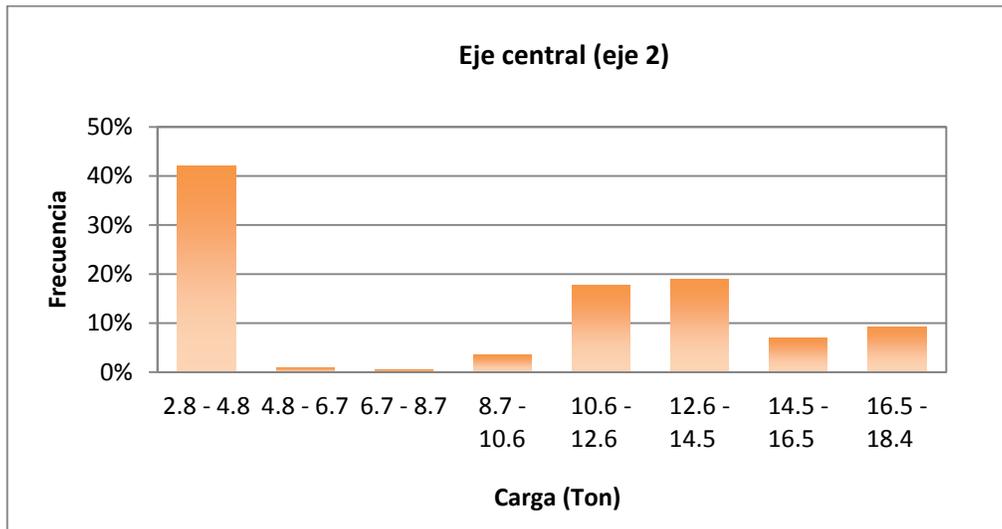


Figura 7.35. Espectro de caga para el eje central, pavimento flexible en Calle 80.

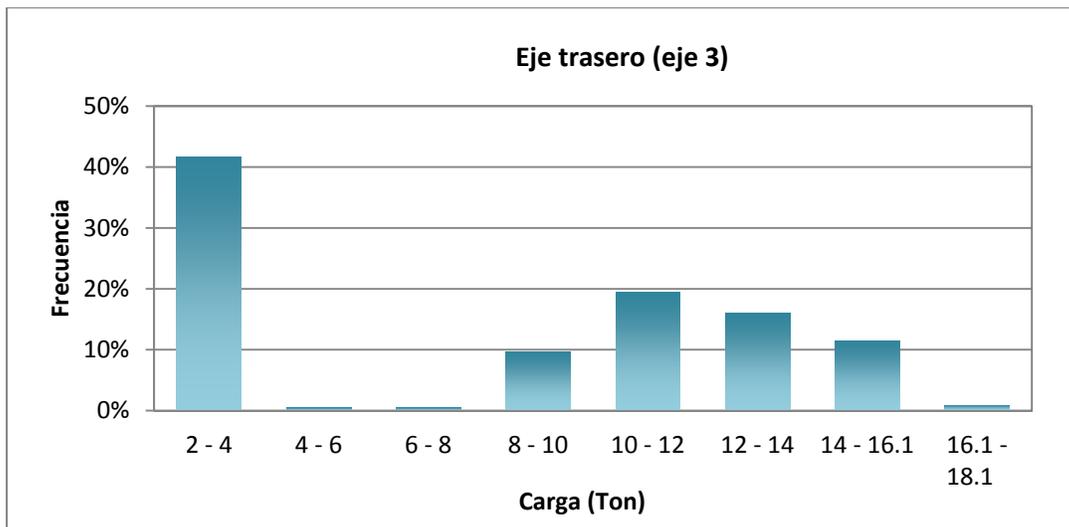


Figura 7.36. Espectro de caga para el eje trasero, pavimento flexible en Calle 80.

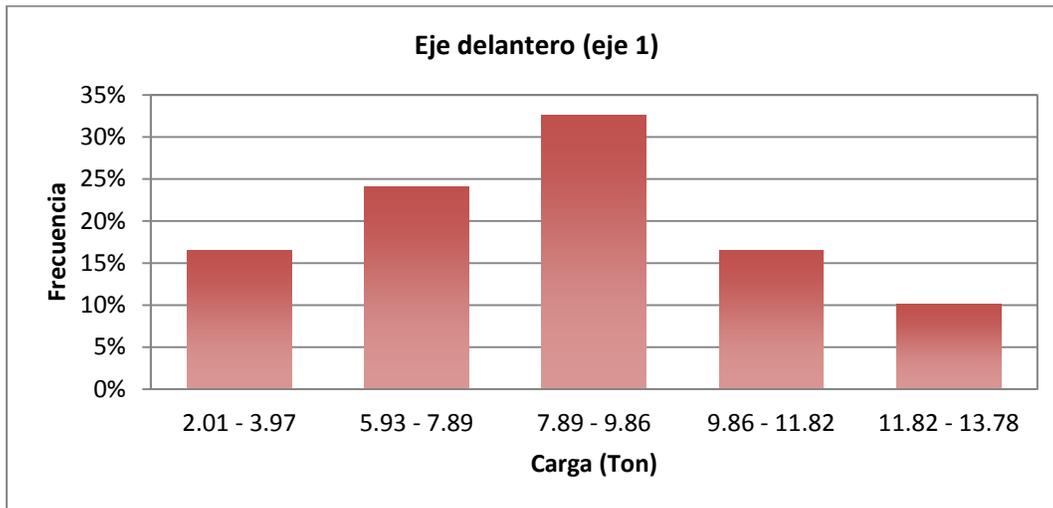


Figura 7.37. Espectro de caga para el eje delantero o direccional (Eje 1), pavimento rígido en Estación Alcalá.

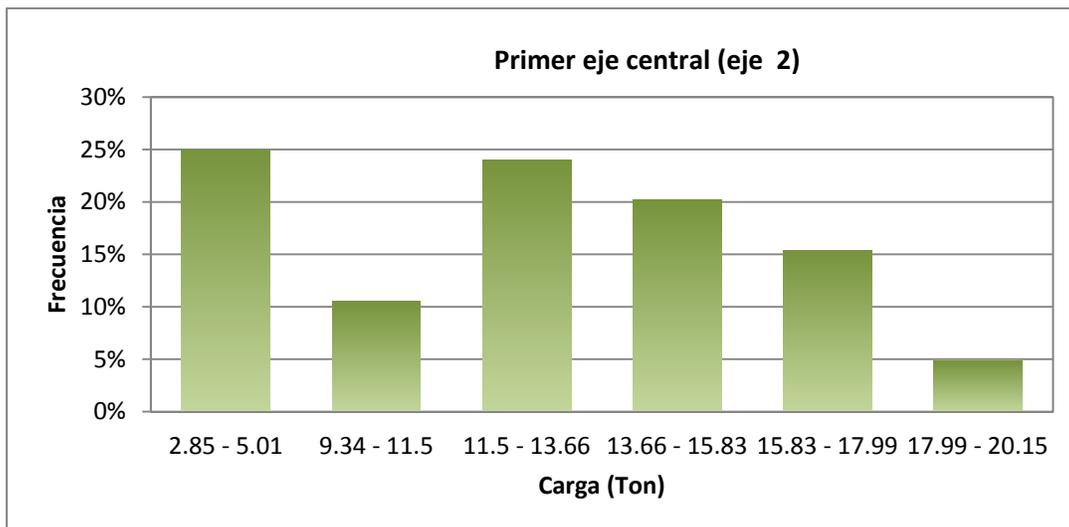


Figura 7.38. Espectro de caga para el primer eje central (Eje 2), pavimento rígido en Estación Alcalá.

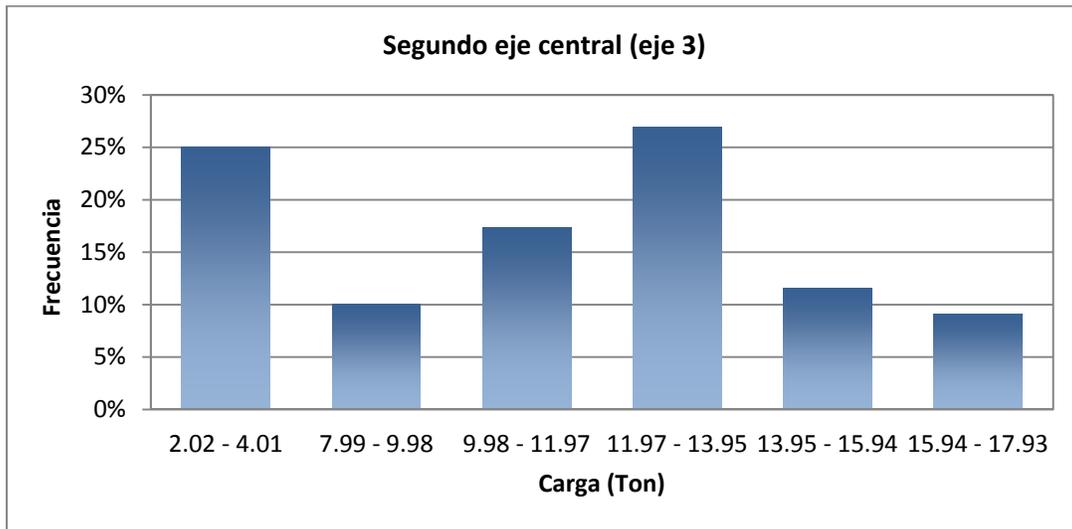


Figura 7.39. Espectro de carga para el segundo eje central (Eje 3), pavimento rígido en Estación Alcalá.

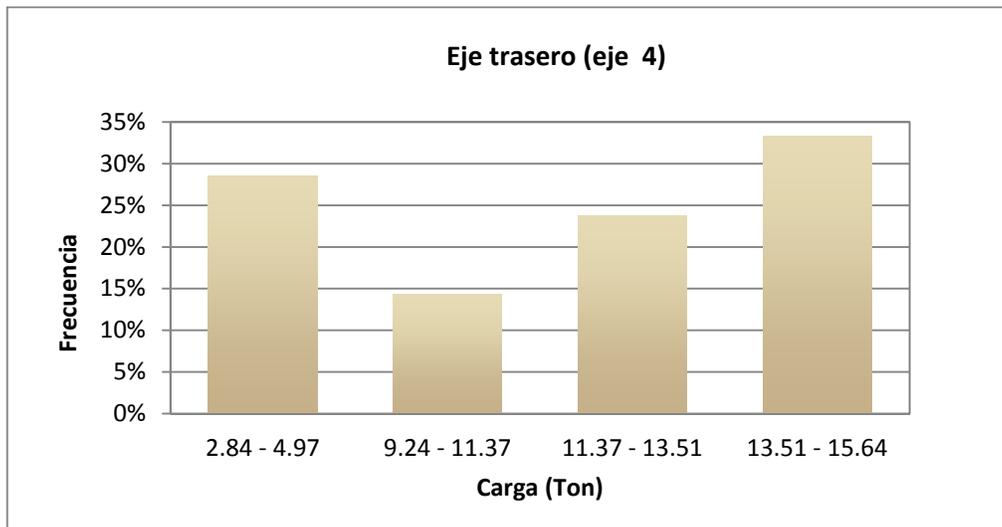


Figura 7.40. Espectro de carga para el eje trasero (Eje 4), pavimento rígido en Estación Alcalá.

Nota: Aparece un cuarto eje, para el caso de buses “bi-articulados” del Sistema Transmilenio. Para buses “uni-articulados”, se utilizan las mismas convenciones (eje 1, 2 y 3).

Es importante resaltar que en el caso específico de la Calle 80 se observó un evento inusual relacionado con los valores reportados de carga—capturados por las balanzas WIM—que, de no ser tratado con cautela, podría afectar los resultados del análisis de esta información. Este evento consiste en que se observa un pico definido en una de las balanzas mientras se registra

una señal débil, casi imperceptible, en la otra balanza. Observaciones del comportamiento de los buses en la zona permiten concluir que los vehículos tienden a desplazarse o desviarse al carril externo en cercanías de la zona instrumentada. Es importante recordar que, a diferencia del sistema de instrumentación localizado en cercanías de la Estación Alcalá en la Autopista Norte, en la Calle 80 a la altura de la Escuela Militar existen dos carriles exclusivos *sólo bus*. El desvío parcial de los buses hacia el carril sur puede tener varias causas, pero las observaciones realizadas en campo sugieren que la principal consiste en la presencia frecuente de obstáculos ubicados en cercanías del separador (e.g., motos de policía que se ubican en este lugar, etc.). La Figura 7.41 presenta un ejemplo de un caso como el mencionado anteriormente.

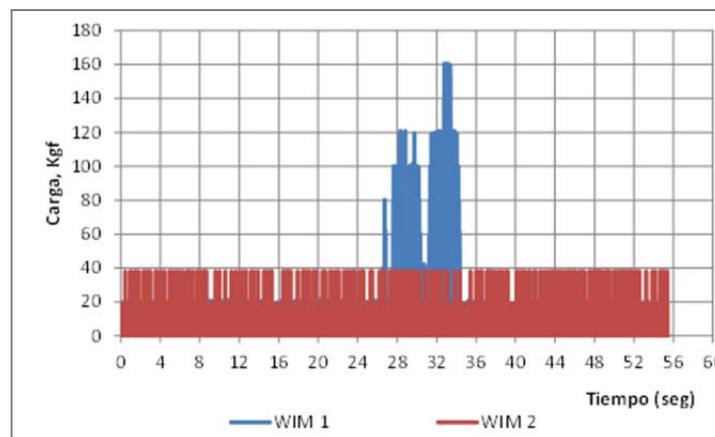


Figura 7.41. Reporte típico de valores de carga en las balanzas WIM que resulta del paso del desvío parcial de un bus de Transmilenio al carril ubicado en la calzada *sólo bus-sur* de la troncal.

La identificación de estos casos es vital para no incurrir en errores futuros. Efectivamente, en el caso de incluir esta información se estarían reportando valores de peso por eje muy inferiores a los que corresponden al bus que realmente se encuentra transitando por la vía. Por lo tanto, esta información fue excluida de todos los análisis de variables dinámicas. No obstante, en los espectros mostrados para la Calle 80 hay un pico inusual muy alto en valores de carga bajos, lo que podría significar que aun con la depuración de la información todavía hay presencia de un bajo porcentaje de dichos casos.

Los espectros de carga presentados con anterioridad corresponden a la **carga dinámica** reportada por las celdas de carga por el paso de los vehículos. En dinámicas de suelos y estructuras es muy conocido que cuando una carga se aplica a una superficie o sistema de forma dinámica, su valor es muy superior al de la carga estática correspondiente. El factor por el cual la carga estática se multiplica para llegar a la carga dinámica equivalente se conoce en la literatura como **Factor de Amplificación de Carga (FAC)** o **DAF**, por sus siglas en inglés (Dynamic Amplification Factor). En el caso del diseño de puentes, por ejemplo, las cargas de diseño de los vehículos que se espera transiten la vía se mayoran con el fin de considerar que

las cargas de los vehículos no se aplican de forma estática. Esto significa que los espectros mostrados corresponden a la carga real aplicada al pavimento, pero que esta carga es muy superior a la carga estática que se habría tomado en una balanza de pesaje tradicional de un bus detenido. Como la mayoría de análisis en pavimento, incluyendo aquellos que se realizan para el diseño de las estructuras en los programas elásticos multi-capas, se realizan suponiendo cargas estáticas, se tomó la decisión de realizar los espectros de carga estática equivalentes a aquellos mostrados con anterioridad. En el caso de comparar las cargas máximas por eje con respecto a aquellas estipuladas como máximas permitidas por los entes reguladores, por ejemplo, se deben usar los datos de estos espectros de carga estáticos y no los dinámicos.

Para transformar los espectros de carga dinámicos a sus equivalentes estáticos se requiere conocer el Factor de Amplificación de Carga o FAC. Este factor varía significativamente dependiendo de las características de la estructura de soporte de la carga, de los instrumentos empleados para capturar los valores de las cargas y de las magnitudes típicas de dichas cargas. Después de consultar diversas fuentes bibliográficas, se decidió tomar los resultados presentados en un estudio específico (González et al., 2009) en donde se comparan las mediciones dinámicas de cargas tomadas mediante balanzas tipo WIM con aquellas estáticas tomadas sobre los mismos vehículos en balanzas tradicionales en condiciones de quietud en un puente. La Figura 7.42 muestra los resultados de este estudio. Los resultados reportados muestran que el valor **promedio** del FAC para este caso es del 30%. Es decir, que las cargas dinámicas son un 30% superior, en promedio, a las cargas estáticas. Por lo tanto, los espectros de carga estáticos de los dos puntos de instrumentación fueron determinados considerando esta reducción en el valor de carga reportado por sistemas WIM.

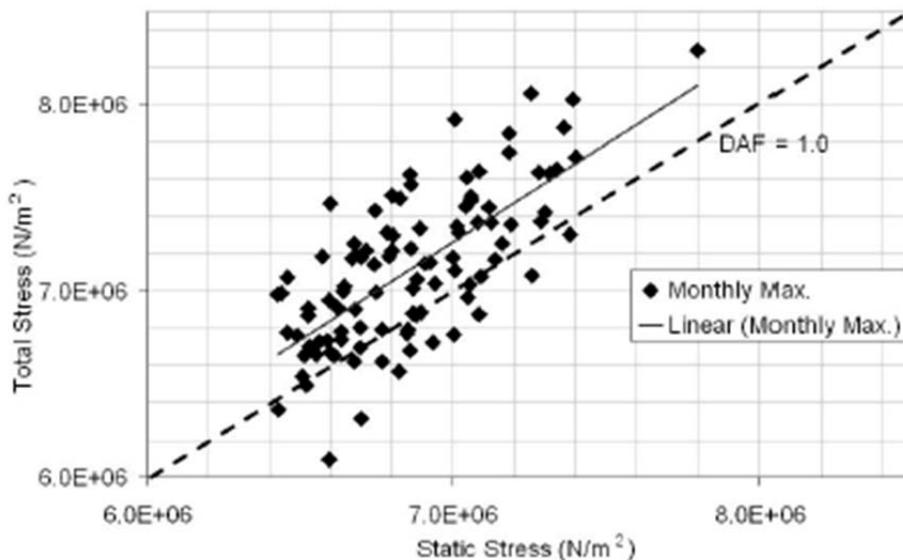


Figura 7.42. Relación entre cargas estáticas y cargas dinámicas de un estudio realizado sobre vehículos medidos con balanzas estáticas y mediante balanzas WIM (tomado de González et al. 2009)

Como resultado de este análisis, las Figuras 7.43 a 7.50 muestran los espectros de carga estática de los dos sistemas de instrumentación.

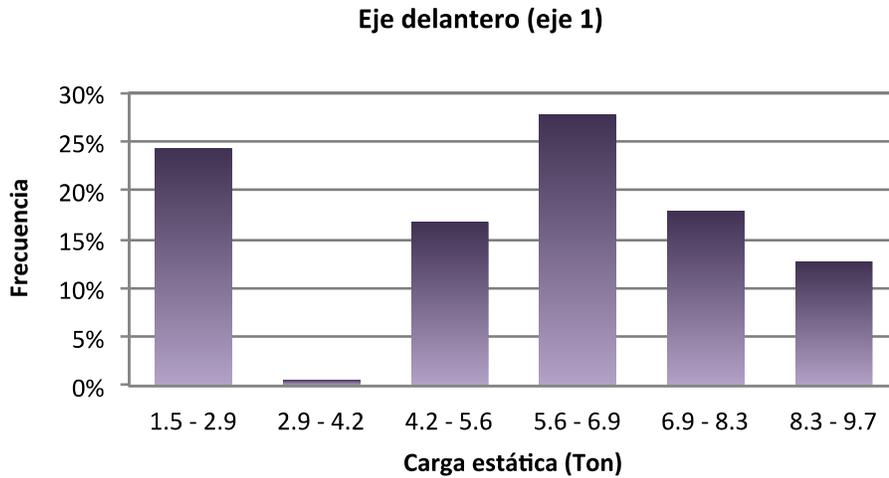


Figura 7.43. Espectro de carga **estática** para el eje delantero o direccional, pavimento flexible en Calle 80

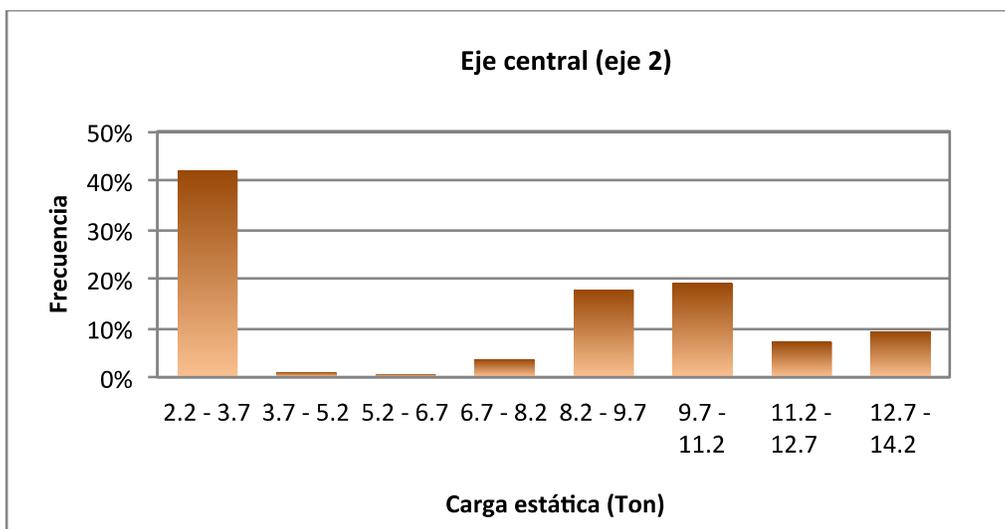


Figura 7.44. Espectro de carga **estática** para el eje central, pavimento flexible en Calle 80.

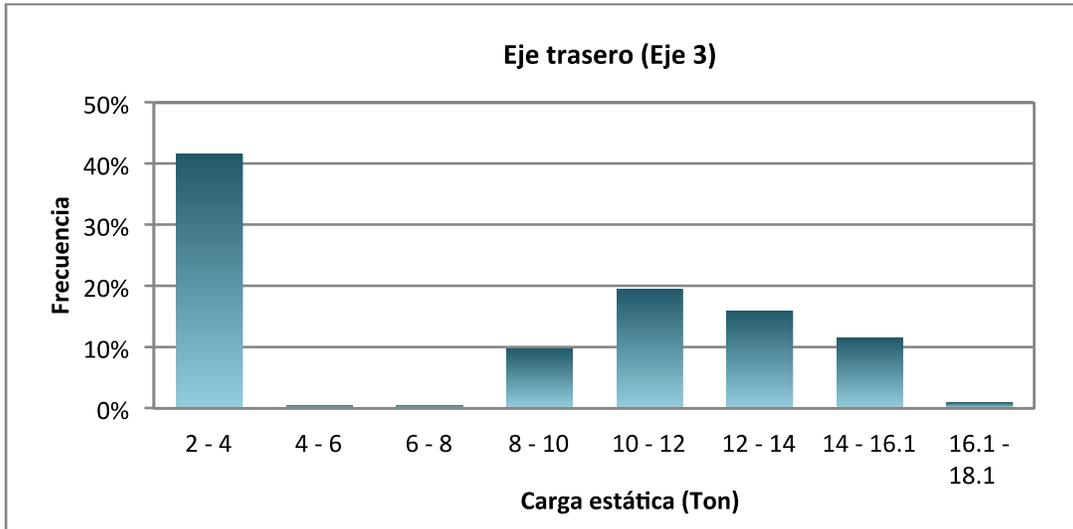


Figura 7.45. Espectro de carga **estática** para el eje trasero, pavimento flexible en Calle 80.

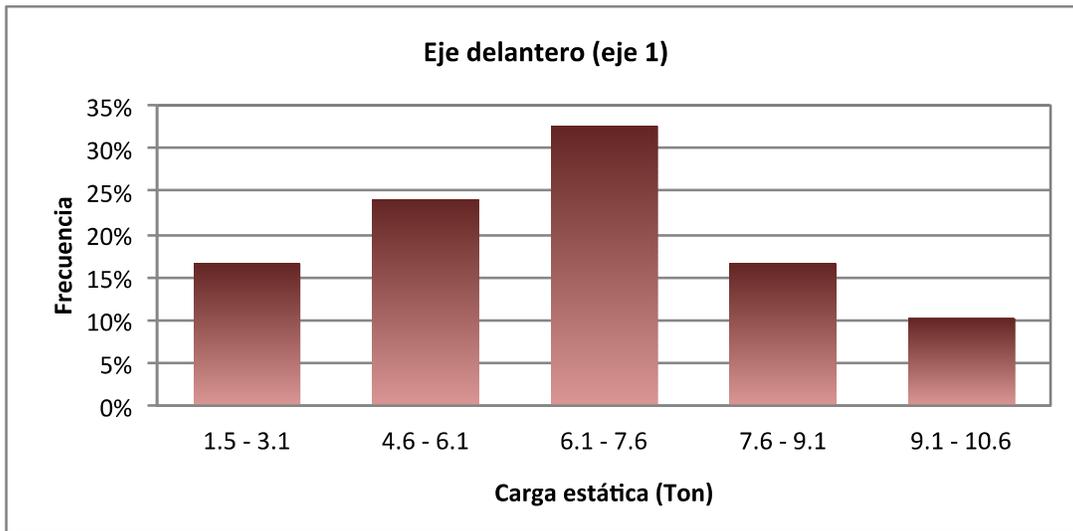


Figura 7.46. Espectro de carga **estática** para el eje delantero o direccional (Eje 1), pavimento rígido en Estación Alcalá.

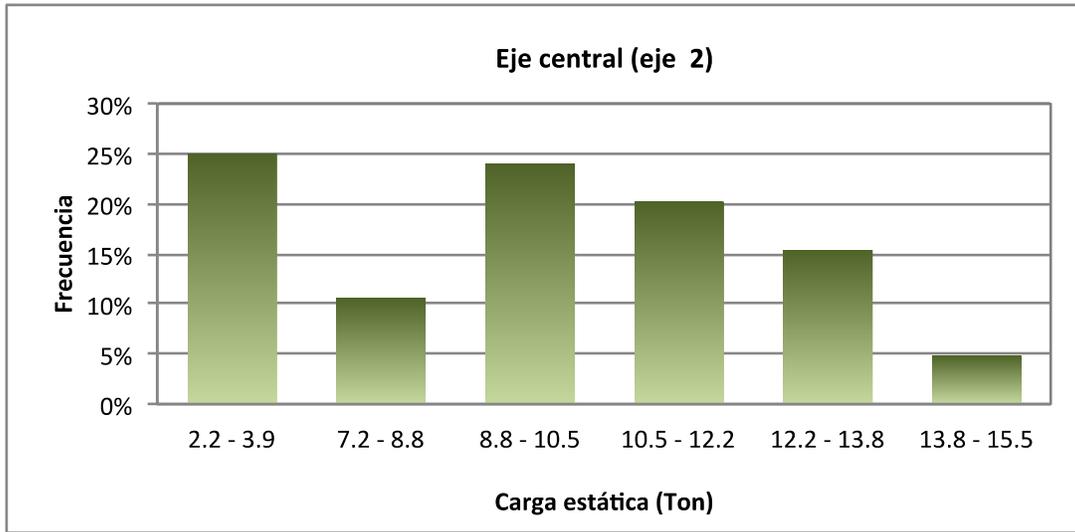


Figura 7.47. Espectro de carga **estática** para el primer eje central (Eje 2), pavimento rígido en Estación Alcalá.

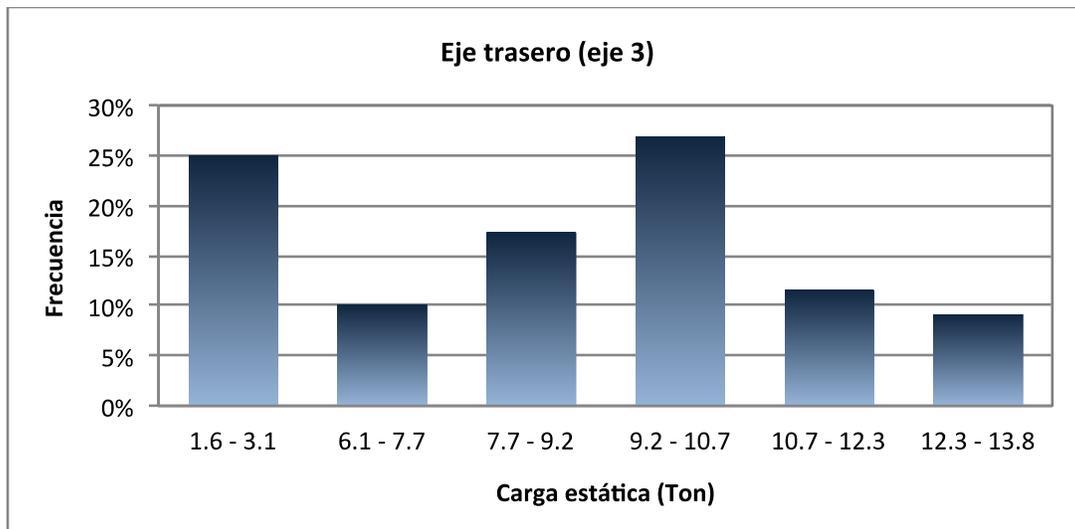


Figura 7.48. Espectro de carga **estática** para el segundo eje central (Eje 3), pavimento rígido en Estación Alcalá.

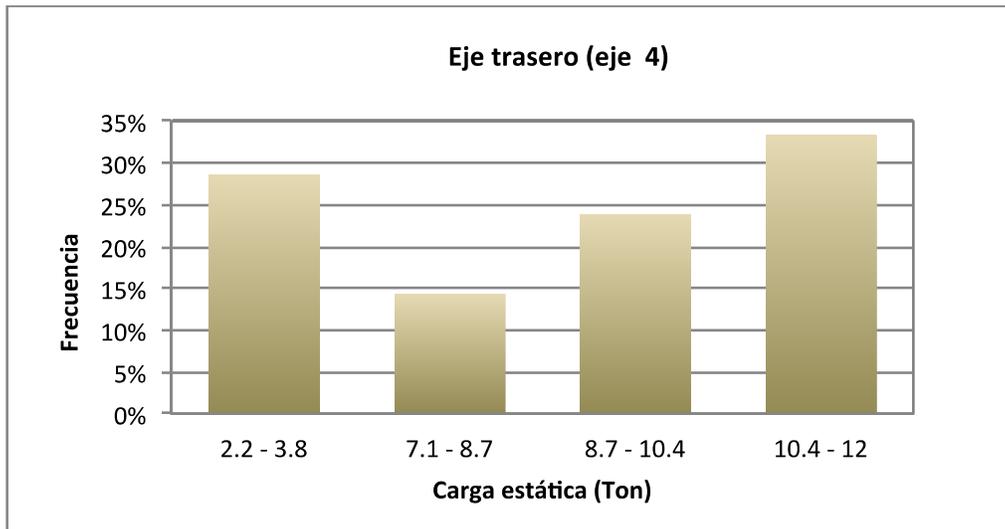


Figura 7.49. Espectro de carga **estática** para el eje trasero (Eje 4), pavimento rígido en Estación Alcalá.

De acuerdo con los espectros de carga obtenidos mediante las mediciones de campo, como medida de control de las cargas que se están imponiendo a las estructuras de pavimento instrumentadas, se presenta el siguiente análisis sencillo que permite identificar el exceso de carga que podrían los vehículos del sistema Transmilenio, para las diferentes tipologías de ejes y de buses.

- **Pavimento Flexible**

Dentro de los datos extractados y procesados, se observaron un total de 232 vehículos con información identificada como válida para los diversos análisis.

Para la identificación de excesos en las cargas permitidas por el IDU, se presenta la capacidad de carga por cada eje según las fichas técnicas de los buses articulados de Transmilenio. La Figura 7.50 presenta la capacidad técnica de carga de los buses articulados, y la Figura 7.51 presenta la capacidad de carga de los vehículos biarticulados.

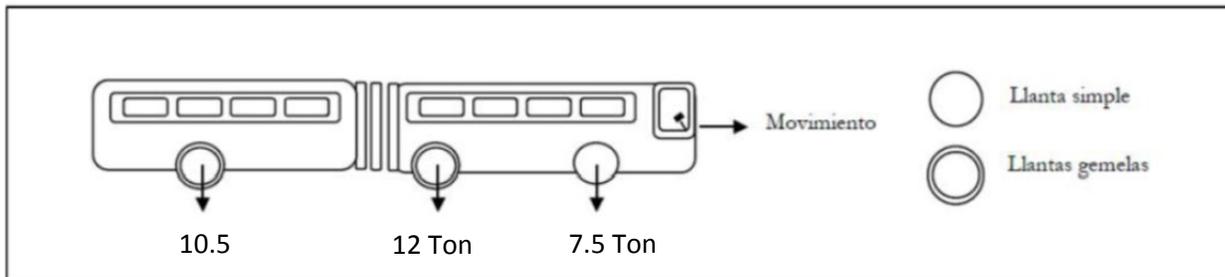


Figura 7.50. Capacidad de carga por eje, vehículos articulados.

Fuente: Ficha técnica Volvo B12 M Articulado.

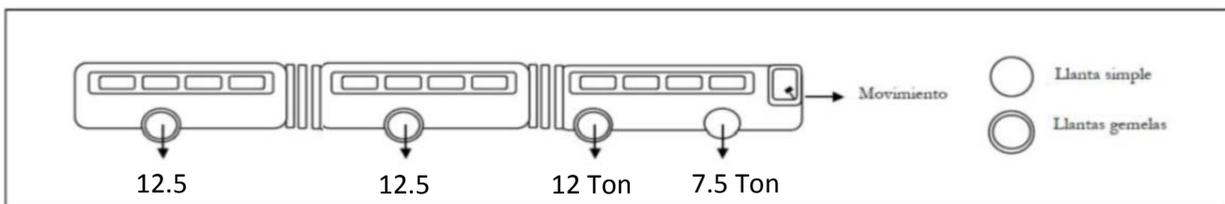


Figura 7.51. Capacidad de carga por eje, vehículos biarticulados.

Fuente: Especificaciones Bus Biarticulado – Transmilenio S.A.

En la Figura 7.52 se presenta la cantidad de ejes que exceden la capacidad técnica de los vehículos articulados respecto a la muestra estudiada. En su orden, las proporciones de vehículos que exceden la capacidad del eje No.1 (delantero, simple direccional), eje No. 2 (intermedio, simple dual) y eje No. 3 (trasero, simple dual) son: 18.1%, 12.5% y 13.8%.

Las Figuras 7.53 a 7.55 representan la cantidad de lecturas que exceden la capacidad máxima para los ejes delanteros, intermedios y traseros respectivamente.

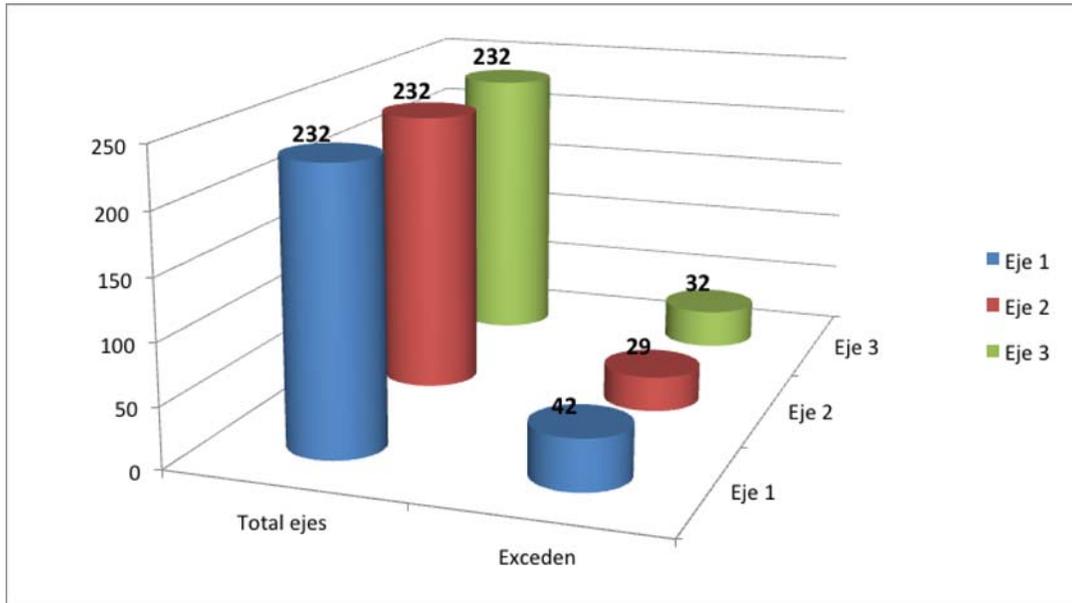


Figura 7.50. Exceso de carga en el pavimento flexible

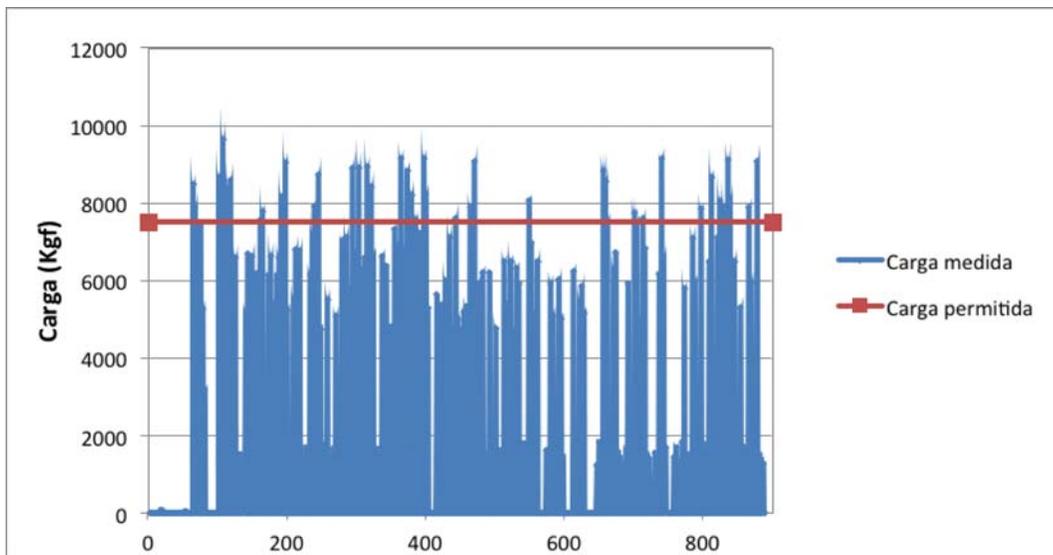


Figura 7.51. Exceso de carga, eje 1 (delantero), pavimento flexible.

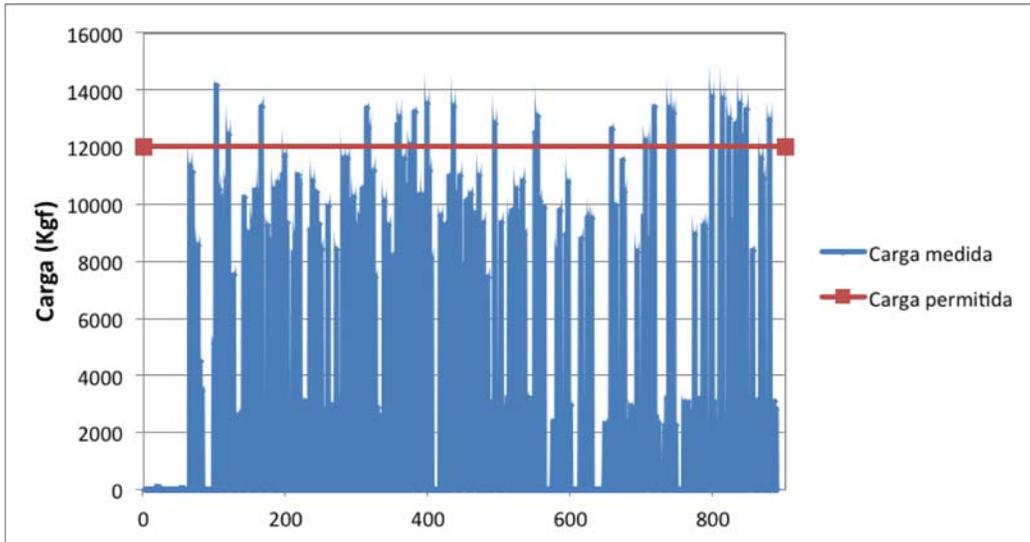


Figura 7.52. Exceso de carga, eje 2 (intermedio), pavimento flexible.

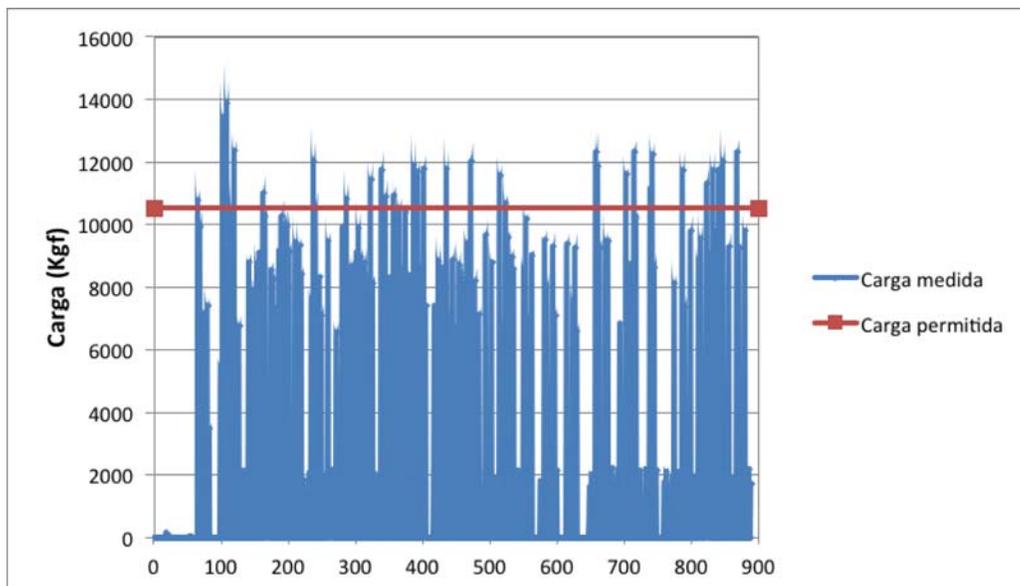


Figura 7.53. Exceso de carga, eje 3 (trasero), pavimento flexible.

- Pavimento Rígido**

Dentro de los datos extractados y procesados, se observaron un total de 188 buses articulados y 21 buses biarticulados con información identificada como válida para los diversos análisis.

En la Figura 7.54 se presenta la cantidad de ejes que exceden la capacidad técnica de los mismos respecto a la muestra estudiada. En su orden, las proporciones de ejes medidos que

exceden la capacidad del eje No.1 (delantero, simple direccional), eje No. 2 (intermedio, simple dual), eje No. 3 (intermedio, simple dual) y eje No. 4 (trasero, simple dual) son: 24%, 17.7%, 5,7% y 0%.

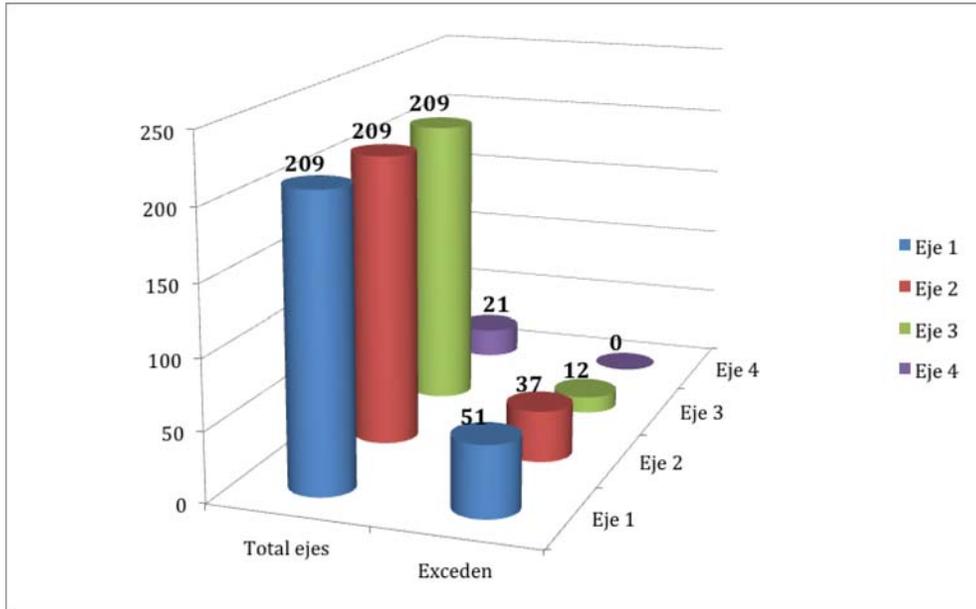


Figura 7.54. Exceso de carga en el pavimento flexible.

En las Figuras 7.55 a 7.58 se representa la cantidad de lecturas que exceden la capacidad máxima para los ejes delanteros, intermedios y traseros respectivamente.

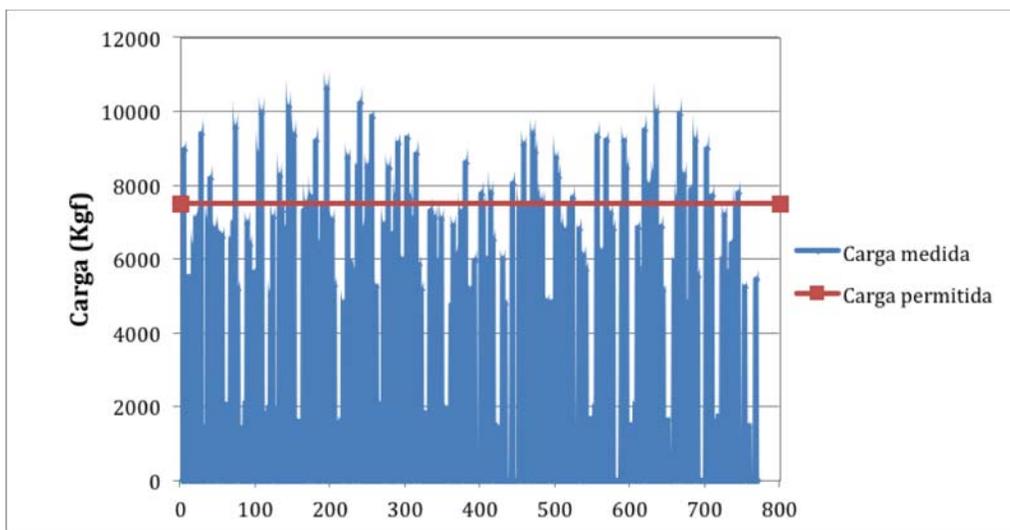


Figura 7.55. Exceso de carga, eje 1 (delantero), pavimento rígido.

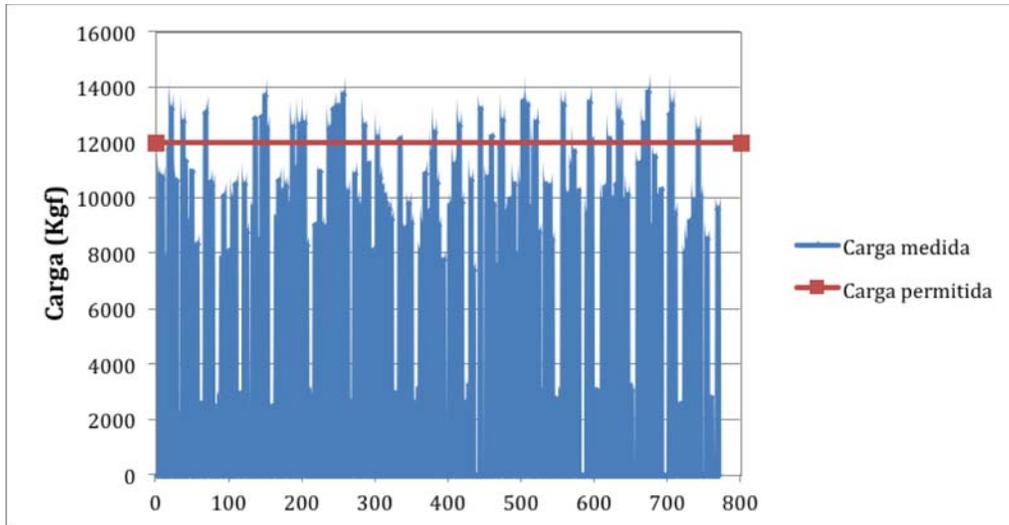


Figura 7.56. Exceso de carga, eje 2 (intermedio), pavimento rígido.

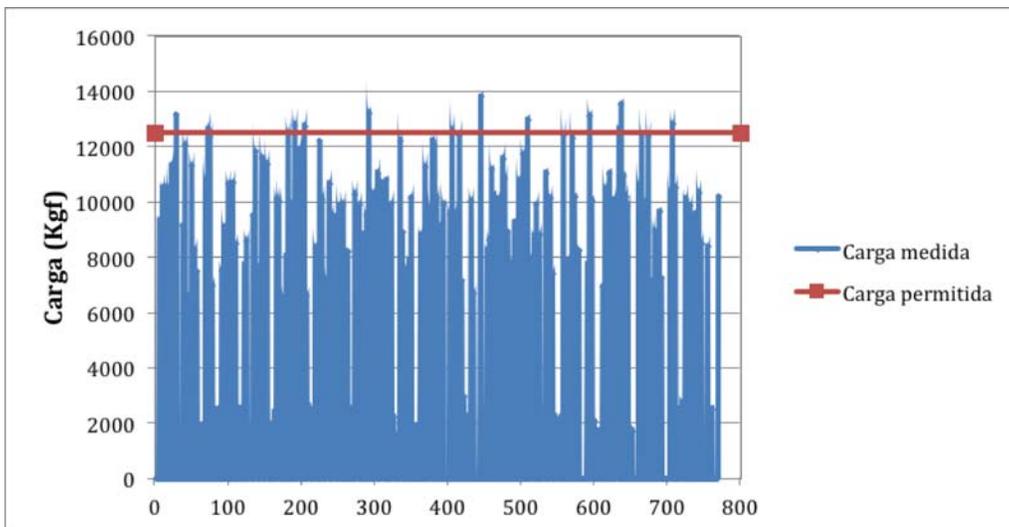


Figura 7.57. Exceso de carga, eje 3 (intermedio), pavimento rígido.

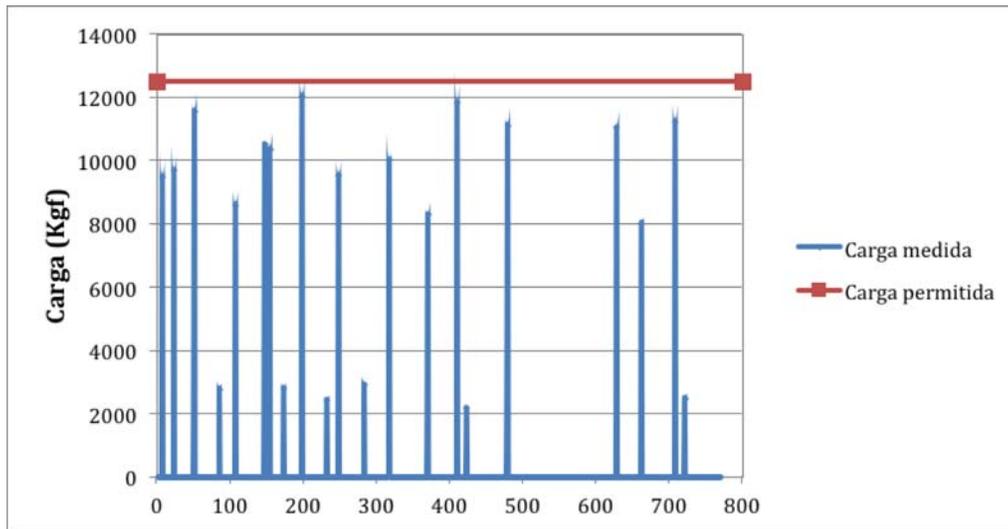


Figura 7.58 Exceso de carga, eje 4 (trasero), pavimento rígido.

No obstante el análisis previo, vale recordar que los espectros de carga estática se obtuvieron empleando un valor promedio de FAC que no corresponde exactamente al del caso particular de estudio. Por lo tanto, estas excedencias tienen una incertidumbre asociada. Una mejor estimación de los valores de excedencia requeriría un estudio que permita determinar un valor de FAC específico para cada uno de los pavimentos estudiados. Por lo tanto, estos valores listados con anterioridad son sólo una primera estimación de lo que podría ser el valor de excedencia de carga real sobre el pavimento.

7.4.2 Correlación de variables dinámicas

En esta fase se exploró la existencia de correlaciones entre las diferentes variables mecánicas del pavimento. En este punto, es importante recordar que una misma carga impuesta por el tráfico al pavimento puede generar diversas respuestas de la estructura, debido a que dicha carga puede transitar la vía en diferentes momentos del día. Es decir, una misma carga se puede aplicar sobre la superficie varias veces a lo largo de un día, pero las propiedades mecánicas de la estructura son diferentes durante ese día. Por esta razón, en algunos casos se presentarán las relaciones observadas en **rangos** de valores máximos y mínimos reportados por los sistemas.

- **Pavimento Flexible**

La Figura 7.59 permite identificar la tendencia de crecimiento de la deformación unitaria, en la fibra inferior de la carpeta de rodadura (a 9 cm de la superficie aproximadamente), a medida que se incrementa la carga vehicular. Si bien se observa un rango de deformaciones bastante amplio, sobre todo para las magnitudes de carga más grandes, la tendencia creciente es

bastante clara y se obtienen coeficientes de correlación alrededor del 57%, como es el caso del deformímetro No. 1.

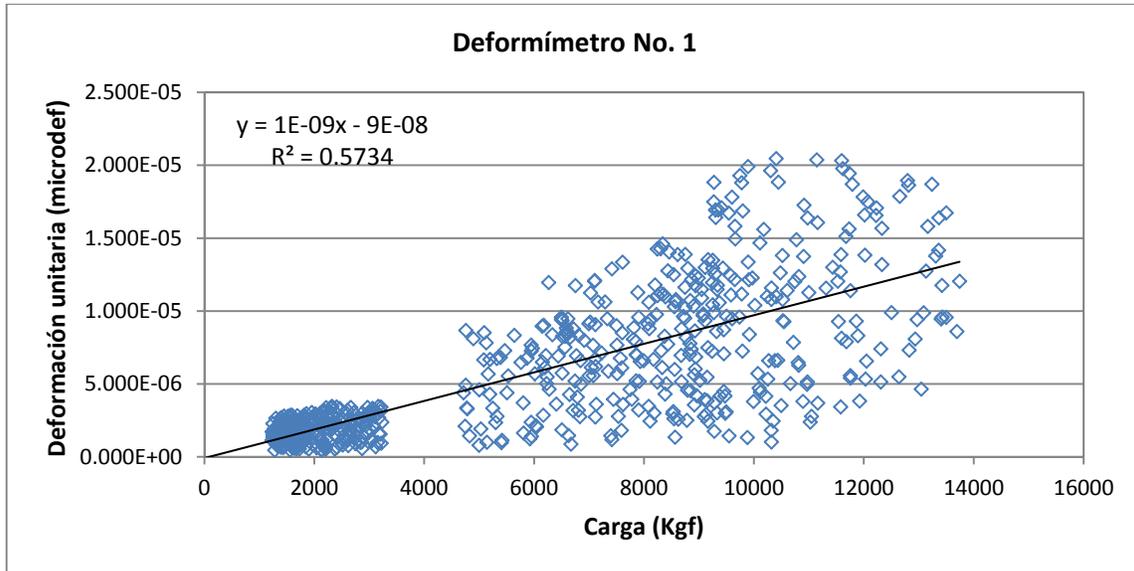


Figura 7.59. Deformación unitaria horizontal vs. carga, fibra inferior de la carpeta de rodadura.

Lo mismo ocurre para el caso de la capa subsiguiente instrumentada, es decir, la fibra inferior de la mezcla MD-20 (a unos 21 centímetros de la superficie). En la Figura 7.60 se observa un ejemplo para esta condición, en el que –para el deformímetro No. 4- se obtiene un coeficiente de correlación cercano al 60%.

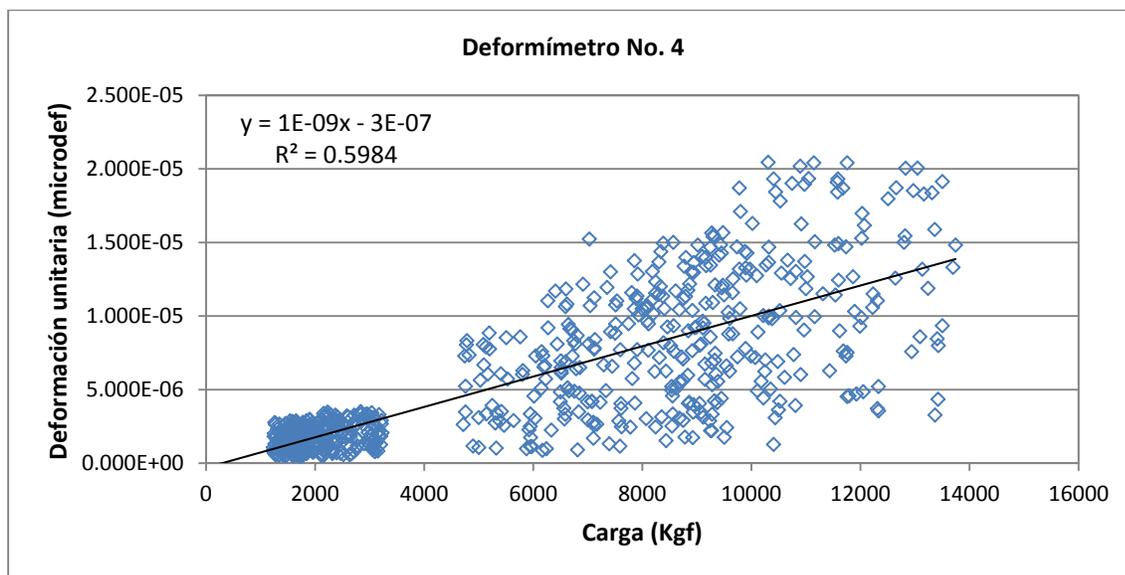


Figura 7.60. Deformación unitaria horizontal vs. carga, fibra inferior de la capa asfáltica MD-20.

Con el objetivo de identificar rangos de deformación unitaria medidos en campo bajo las condiciones reales de aplicación de carga vehicular a la estructura de pavimento flexible, se presenta la Figura 7.61, en la cual se identificaron los valores máximos y mínimos de deformación unitaria horizontal para las dos capas, para diferentes valores de rangos de carga vehicular.

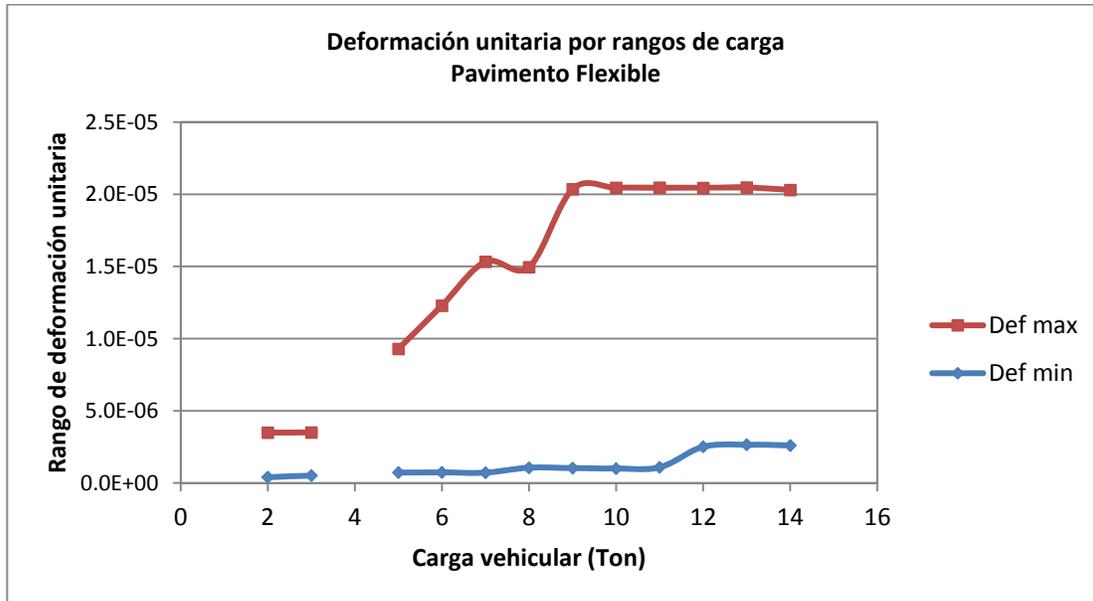


Figura 7.61. Relación entre la carga vehicular y las deformaciones máximas y mínimas reportadas.

La tendencia en la envolvente obtenida es creciente a medida que se aplica una mayor carga. Sin embargo, el límite superior (deformación máxima) evidencia un cambio más brusco que el límite inferior (deformación mínima). Se observa un salto en los valores de 3.5 a 4.5 ton, en los que no se identificaron mediciones. Adicionalmente, llama la atención la pendiente de crecimiento de la deformación unitaria en los valores de carga entre 5 y 7 ton, y entre 8 y 9 ton, en donde parece ser relativamente lineal y “constante”, aparentando una relación directamente proporcional y creciente. Para valores de carga superiores a las 10 toneladas, se observan mediciones de deformación unitaria que “permanecen en un mismo rango de magnitud”.

Un procedimiento similar se llevó a cabo para encontrar la envolvente de deflexiones de la estructura, los resultados se presentan en la Figura 7.62.

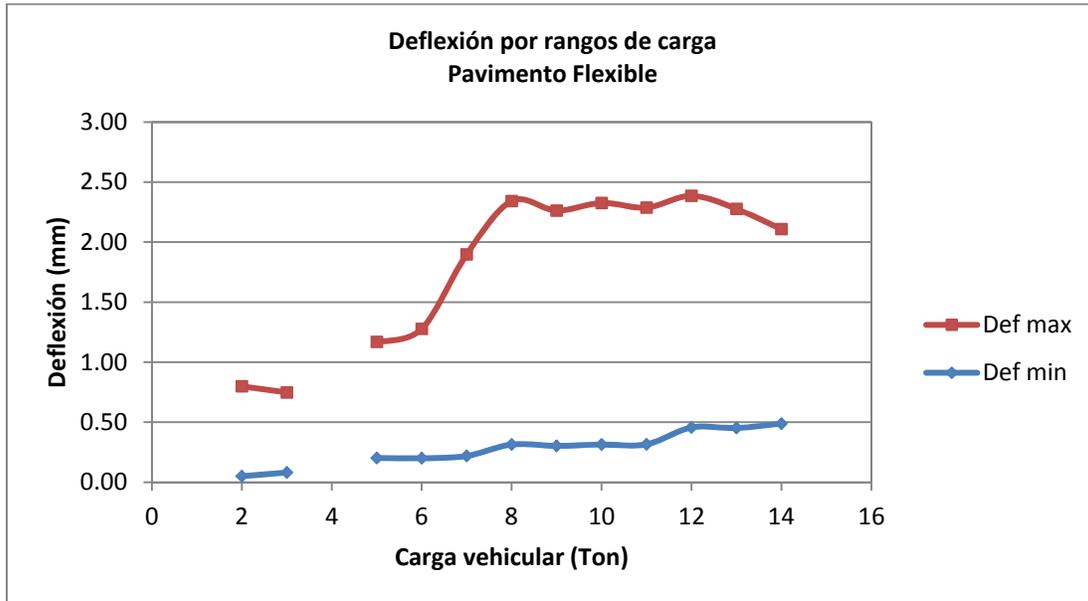


Figura 7.62. Relación entre las carga vehicular y las deflexiones máximas y mínimas reportadas.

La tendencia de deflexión de la estructura de pavimento flexible es creciente, con variaciones muy leves y casi insignificantes para “bajas cargas” (entre 2 y 3 ton). Al igual que para las deformaciones, se observa una tendencia directamente proporcional y creciente en el rango de carga de 5 a 8 ton (con deflexiones del orden de 0.2 a 2.4 milímetros). Para cargas superiores a las 9 ton la tendencia es más constante, no se observan grandes cambios para la frontera superior. Sin embargo, para la frontera inferior, la tendencia al incremento se hace un poco más evidente.

- **Pavimento Rígido**

A continuación se presentan algunos análisis que permiten determinar la correlación entre la deformación unitaria de manera global en la estructura de pavimento rígido, y en cada uno de los dos niveles instrumentados, a saber: nivel superior a 5 centímetros de la superficie y nivel inferior a 5 centímetros de la fibra inferior de la losa.

La Figura 7.62 permite identificar la tendencia de crecimiento de la deformación unitaria horizontal en la fibra inferior de la carpeta de losa de concreto (a 5 cm del borde aproximadamente), a medida que se incrementa la carga vehicular. Si bien, se observa un rango de deformaciones bastante amplio, sobre todo para las magnitudes de carga más grandes, la tendencia creciente es bastante clara y se obtienen coeficientes de correlación alrededor del 43%, como es el caso del deformímetro No. 2, ubicado perpendicular al tráfico vehicular.

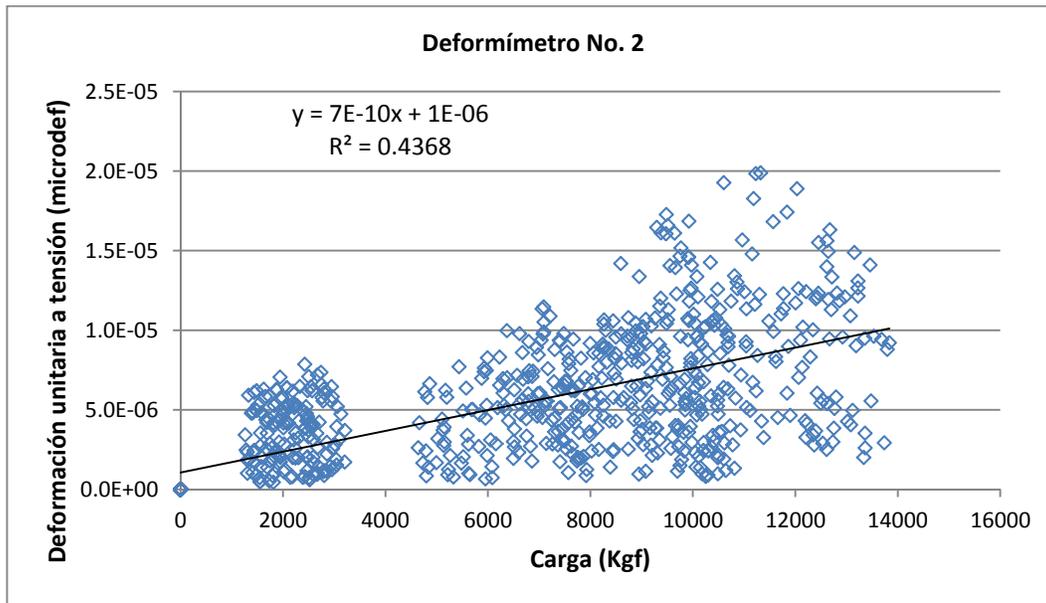


Figura 7.62. Deformación unitaria vs. Carga, fibra inferior de la losa.

Lo mismo ocurre para el caso de la parte superior de la losa, es decir, a unos 5 centímetros de la superficie. En la Figura 7.63 se observa un ejemplo para esta condición, en el que –para el deformímetro No. 7- se obtiene un coeficiente de correlación cercano al 50%.

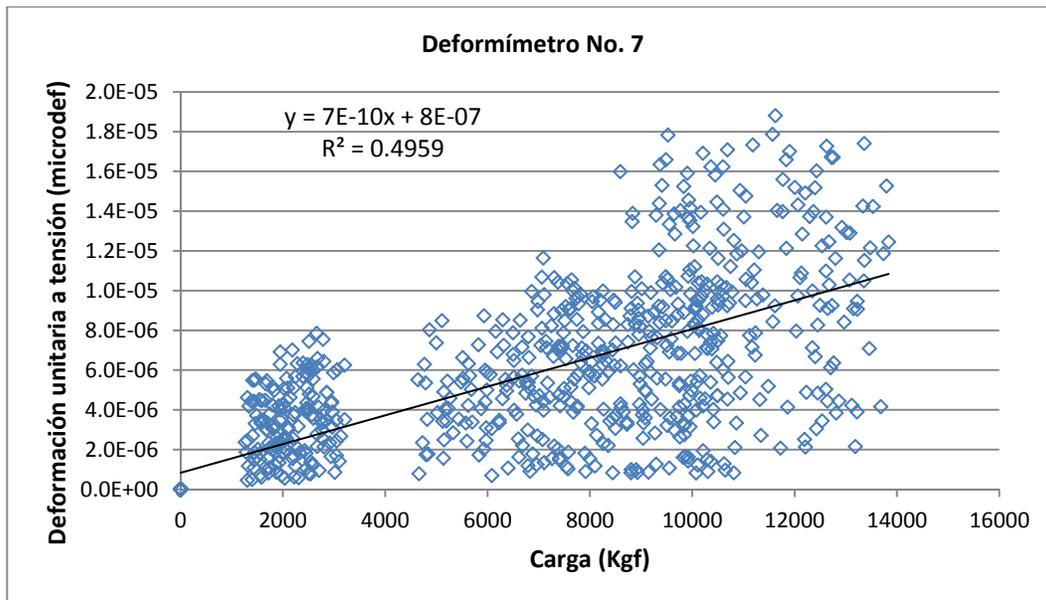


Figura 7.63. Deformación unitaria vs. Carga, fibra superior de la losa.

Con el objetivo de identificar rangos de deformación unitaria horizontal medidos en campo bajo las condiciones reales de aplicación de carga vehicular a la estructura de pavimento rígido, se presenta la Figura 7.64, en la cual se identificaron los valores máximos y mínimos de deformación unitaria para diferentes valores de rangos de carga vehicular.

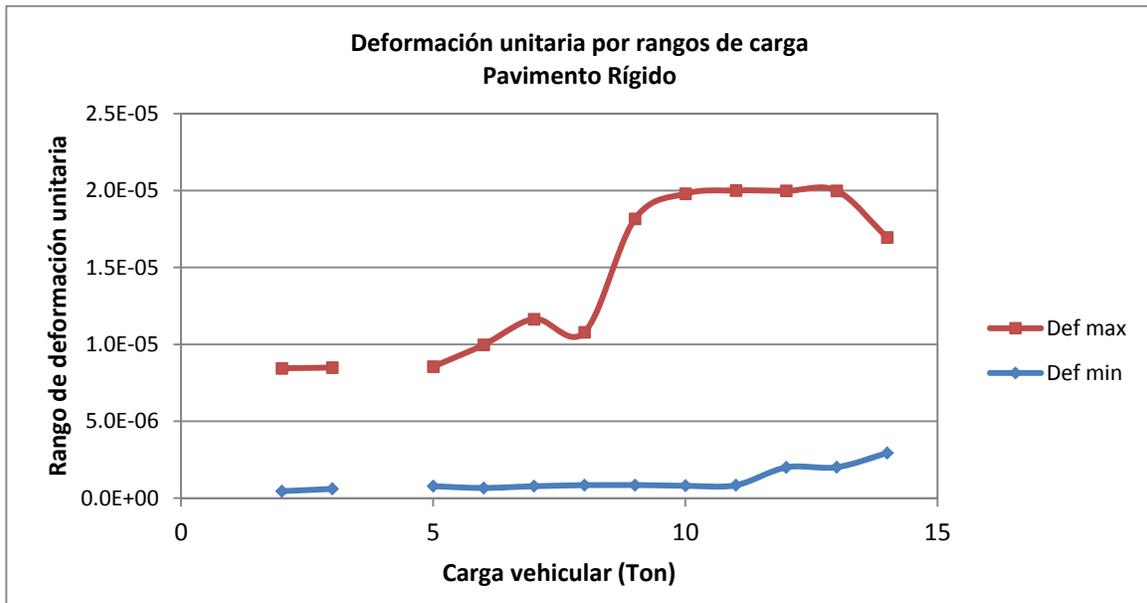


Figura 7.64. Relación entre las deformaciones máximas y mínimas y la deformación unitaria encontrada.

La tendencia en la envolvente obtenida es creciente a medida que se aplica una mayor carga. Sin embargo, el límite superior (deformación máxima) evidencia un cambio más brusco que el límite inferior (deformación mínima). Se observa un salto en los valores de 3.5 a 4.5 ton, en los que no se identificaron mediciones.

Adicionalmente, al igual que el caso del pavimento flexible, se observa que la pendiente de crecimiento de la deformación unitaria en los valores de carga entre 8 y 10 ton es máxima y el incremento en el rango de deformaciones es más elevado, con una relación directamente proporcional y creciente. Para valores de carga superiores a las 10 toneladas, se observan mediciones de deformación unitaria con baja variabilidad.

Un procedimiento similar se llevó a cabo para encontrar la envolvente de deflexiones de la estructura, los resultados se presentan en la Figura 7.65.

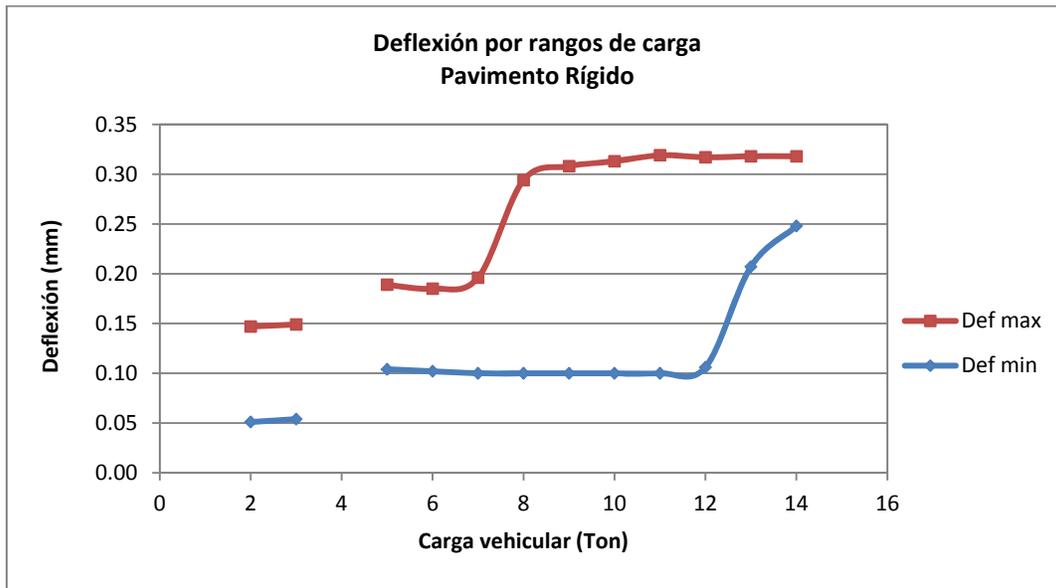


Figura 7.65. Relación entre las deflexiones máximas y mínimas y la deformación unitaria encontrada.

La tendencia general de deflexión de la estructura de pavimento rígido es creciente, con variaciones muy leves y casi insignificantes para “bajas cargas” (entre 2 y 3 toneladas). Se observa una tendencia directamente proporcional y creciente en el rango de carga de 7 a 9 ton (con deflexiones del orden de 0.1 a 0.3 milímetros). Para cargas superiores a las 9 ton la tendencia es más constante y no se observan grandes cambios para la frontera superior. Sin embargo, para la frontera inferior la tendencia se hace un poco más evidente al incremento para cargas mayores a las 12 ton; de allí que se observa que la envolvente de deflexiones medidas “tiende a cerrarse” hacia los valores más grandes de carga.

8. Estudio de Envejecimiento del Pavimento Asfáltico

El estudio de envejecimiento de carpetas asfálticas en la ciudad constituye la contrapartida de la Universidad de Los Andes en este convenio. La metodología general del estudio consistió en seleccionar un tramo de pavimento de vía en servicio que tuviera una carpeta de rodadura característica de los pavimentos de la ciudad, realizar extracciones o realizar la toma de núcleos de la carpeta de rodadura de dicho tramo en períodos de tres meses y efectuar sobre el asfalto recuperado de los núcleos ensayos de caracterización reológica y química que permitieran identificar la evolución del envejecimiento ocurrido en la carpeta de rodadura.

El sitio de extracción de las muestras para la realización de los ensayos de caracterización y evaluación de la oxidación de la mezcla es puntualmente el tramo de la Carrera 9 entre la Calle 165 y la Calle 165 A, en el costado oriental.

Luego de seleccionar el tramo de estudio el día viernes 16 de marzo de 2012 se realizó la toma de 4 especímenes (núcleos de campo) de mezcla asfáltica densa en caliente tipo MD 12, realizada con asfalto convencional 80 /100. Las características de la mezcla asfáltica son presentadas en la Sección 8.1 de este capítulo. La caracterización reológica y química de las muestras obtenidas de estos núcleos se considera la condición inicial o *base* del estudio. Es decir, esta información constituye el punto de comparación para analizar la evolución del envejecimiento de la carpeta de rodadura obtenido a partir de posteriores extracciones y análisis. La Tabla 8.1 resume los aspectos generales de los núcleos del escenario base, 4 en total, los cuales se extrajeron con un diámetro de 3 pulgadas:

Tabla 8.1. Fecha de instalación y espesores de la mezcla asfáltica.

Especímen No.	Abscisa	Fecha de instalación	Espesor (cm)
1	K0+550	30-Nov-2011	4.5
2	K0+525	30-Nov-2011	4.5
3	K0+425	30-Nov-2011	4.5
4	K0+081	09-Dic-2011	5.0

Fuente: MHC Laboratorio. Diseño de mezcla densa tipo MD 12 – Avenida Novena con calle 170. Mario Huertas Cotes. Contrato IDU 066 de 2009.

Como se mencionó anteriormente, posterior a esta extracción se realizaron nuevas extracciones en campo con una frecuencia de 3 meses con el ánimo de comparar la evolución de los parámetros de reología y de medición del envejecimiento por oxidación a través del ensayo FTIR. En la Tabla 8.2 se resume la información de los muestreos realizados.

Tabla 8.2. Muestreos realizados para estudio de envejecimiento de la mezcla asfáltica.

Muestreo No.	Abscisa	Fecha de extracción	Diámetro de los núcleos (pulg)	Espesor promedio rodadura (cm)
1 – Base	K0+480	16-Mar-2012	3	5.8
2	K0+500	15-Jun-2012	6	6.0
3	K0+540	14-Sep-2012	6	6.0
4	K0+530	14-Dic-2012	6	5.6
5	K0+520	01-Mar-2013	6	5.7

A partir del segundo muestreo, como se observa en la Tabla 8.2, se extrajeron tan sólo 2 núcleos pero de diámetro mayor (6 pulgadas), en comparación con los núcleos tomados durante la primera extracción (escenario base). Esta decisión se tomó después de calcular que el asfalto extraído y recuperado de estos núcleos debía ser suficiente para poder realizar los ensayos de caracterización dinámica y de composición química del asfalto. Con el ánimo de ilustrar los especímenes extraídos para evaluación, las Figuras 8.1 y 8.2 muestran especímenes extraídos durante los muestreos del estudio.



Figura 8.1. Especímen extraído en el muestreo base.



Figura 8.2. Especímenes extraídos en el muestreo 5.

Una vez se los núcleos extraídos eran conducidos al laboratorio, se procedía a realizar las siguientes actividades:

1. Cortar el núcleo obtenido de la zona de rodadura en dos “tajadas” de igual espesor (identificadas como capa superior e inferior, o capa 1 y 2, respectivamente),
2. Extraer y recuperar el asfalto de cada una de las capas mediante técnica de centrifugado y rotovapor,
3. Realizar un análisis reológico al asfalto extraído mediante la caracterización del módulo de corte complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) para barridos de frecuencia y temperatura,
4. Realizar un ensayo de FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) sobre una muestra del asfalto recuperado de cada capa con el fin de determinar si mediante esta técnica se puede hacer seguimiento al cambio en la composición química del asfalto que resulta de los procesos de envejecimiento.

En las siguientes secciones se describe en detalle las características de la mezcla asfáltica empleada en la construcción de la carpeta de rodadura, así como los resultados obtenidos de las actividades de caracterización reológica y química de las muestras de asfalto recuperadas de los núcleos.

8.1. Fórmula de trabajo

El contratista de la obra, *Mario Huertas Cotes*, hizo entregó a la Universidad de los Andes de las características de las mezclas asfálticas presentes en el pavimento de estudio seleccionado. La información concerniente a la mezcla asfáltica empleada en la carpeta de rodadura se resume a continuación:

- Tipo de mezcla: densa en caliente MD 12
- Tipo de asfalto: convencional 80/100 – Ecopetrol
- Temperatura de mezcla: 160 °C
- Temperatura de compactación recomendada: 134 °C

La fórmula de trabajo de la mezcla es: 30% triturado pasa 3/4" (Cantera La Suiza) + 25% triturado pasa 3/8" (Cantera La Suiza) + 25% arena de trituración pasa #4 (Cantera La Suiza) + 20% arena de río Saldaña (Casamotor) + 6.1% asfalto convencional 80/100 (Ecopetrol).

8.2. Criterios de diseño y caracterización de la mezcla asfáltica

En la Tabla 8.3 se presentan las características de la mezcla bituminosa de acuerdo con el diseño por el Método Marshall, bajo las especificaciones IDU-ET-2005 510.7.

Tabla 8.3. Caracterización de la mezcla asfáltica MD 12.

Característica	Norma de ensayo	Mezclas densas Requisito categoría tránsito T4 – T5.	Resultados Mezcla MD 12
Compactación (golpes/cara)	INV E-748	75	75
Estabilidad mínima (Kg)	INV E-748	900	1648
Flujo (mm)	INV E-748	2 – 3.5	3.3
Vacios con aire (Va) %	INV E-736	4 – 6	5.0
Vacios en los agregados minerales (VAM) %	Manual MS-2	≥ 15	15
% Vacíos llenos de asfalto (VFA)	Manual MS-2	65 – 75	67
Relación llenante / asfalto, en peso	N.A.	0.8 – 1.2	1.2
Relación Estabilidad / Flujo (Kg/mm)	INV E-748	300 – 600	499
Índice de película del asfalto	Austroroads AGPT/T327	7.5	7

Fuente: MHC Laboratorio. Diseño de mezcla densa tipo MD 12 – Avenida Novena con calle 170. Mario Huertas Cotes. Contrato IDU 066 de 2009.

8.3. Caracterización reológica del asfalto recuperado

La capa de rodadura de uno de los núcleos extraídos se separó del resto del espécimen –el otro se conserva como muestra de respaldo- (i.e., parte superior del núcleo mostrado en la Figura 8.1). Como se mencionó previamente, esta capa se dividió en dos subcapas: la capa superficial, denominada *capa 1*, y la capa inferior, denominada *capa 2*. Muestras de asfalto de cada subcapa fueron obtenidas mediante los procedimientos estandarizados de extracción de asfalto y recuperación de asfalto mediante la técnica de rotovapor. Estas muestras fueron empleadas para caracterizar el material a través de: 1) caracterización reológica mediante barrido de frecuencias y temperaturas mediante reómetro dinámico de corte, o DSR, y 2) ensayo de FTIR (Fourier Transform Infrared Espectroscopy).

A continuación se presenta el resumen de los resultados del ensayo de laboratorio con DSR el cual permite la caracterización del asfalto mediante el módulo complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ). Para una caracterización completa se realizaron barridos de frecuencias y temperaturas. Específicamente, se realizó un barrido de frecuencias desde 1 Hz hasta 20 Hz, para las siguientes temperaturas de ensayo: 25°C, 35°C, 45°C, 55°C, 65°C y 75°C; empleando una deformación angular controlada (γ) del 1%.

8.3.1 Gráficas consolidadas por muestreo en campo (evolución del material en el tiempo)

A continuación se presentan las gráficas consolidadas del comportamiento del módulo complejo para los 5 muestreos realizados, para las dos capas (superficial o capa 1 e inferior o capa 2).

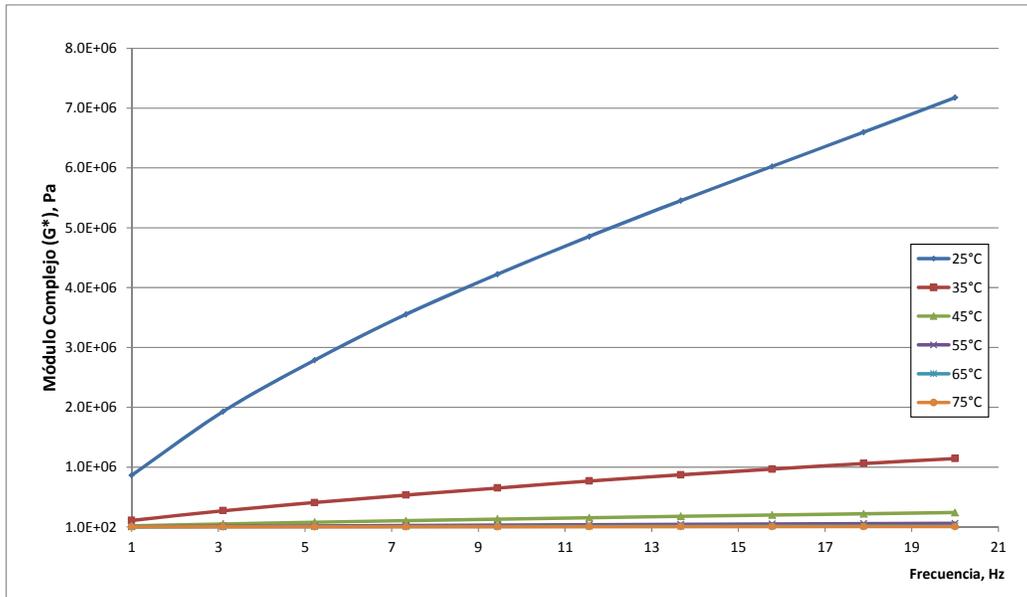


Figura 8.3. Comportamiento del módulo complejo de la capa 1 (superior), muestreo 1.

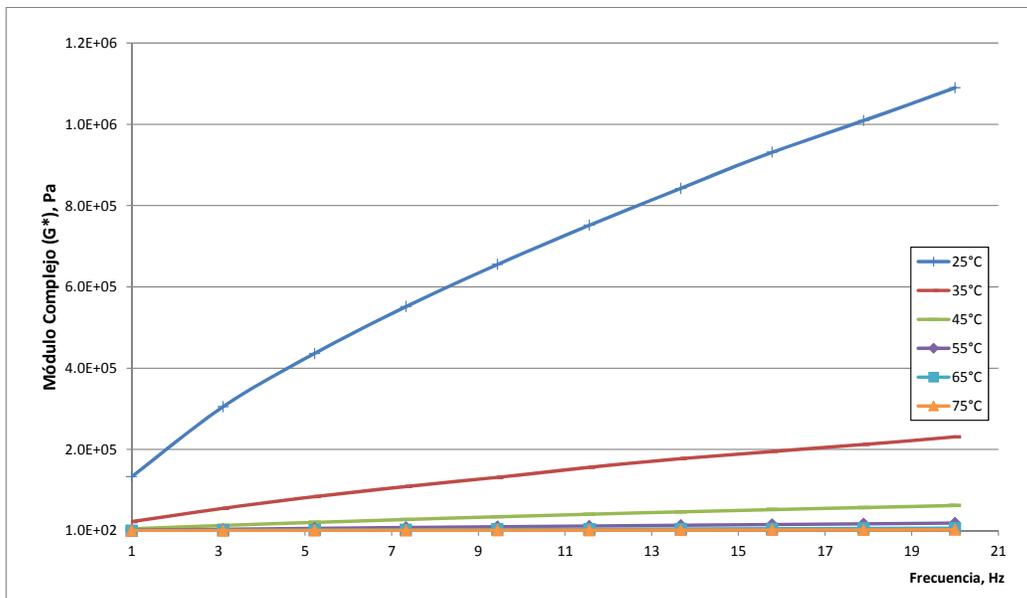


Figura 8.4. Comportamiento del módulo complejo de la capa 2 (inferior), muestreo 1.

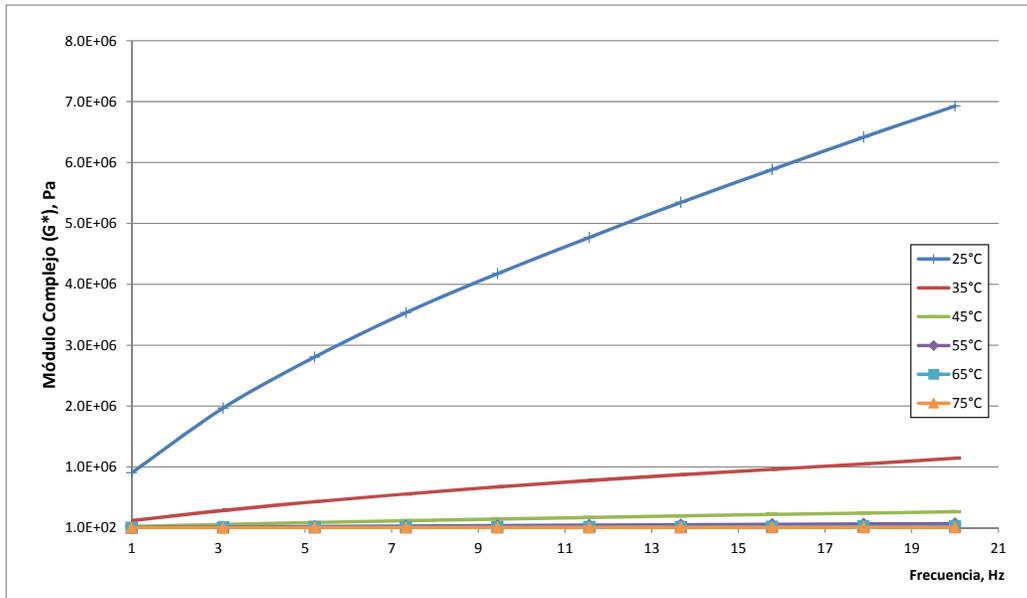


Figura 8.5. Comportamiento del módulo complejo de la capa 1 (superior), muestreo 2.

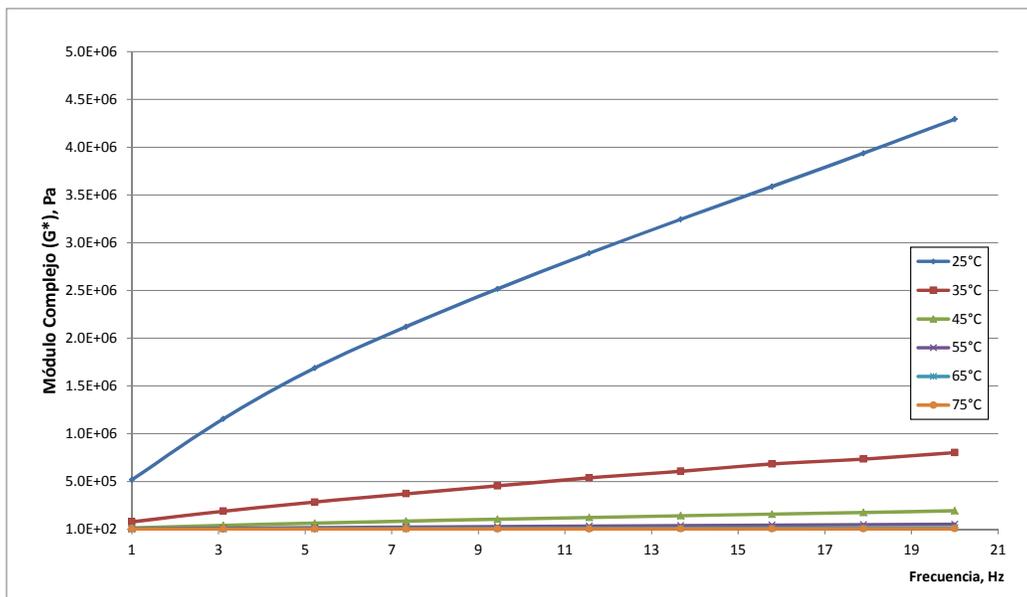


Figura 8.6. Comportamiento del módulo complejo de la capa 2 (inferior), muestreo 2.

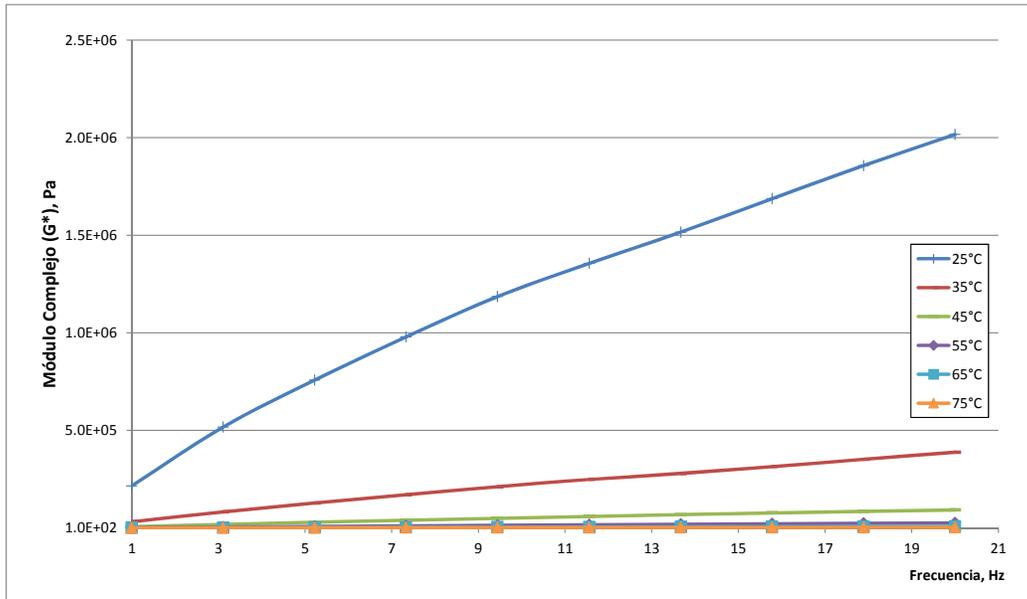


Figura 8.7. Comportamiento del módulo complejo de la capa 1 (superior), muestreo 3.

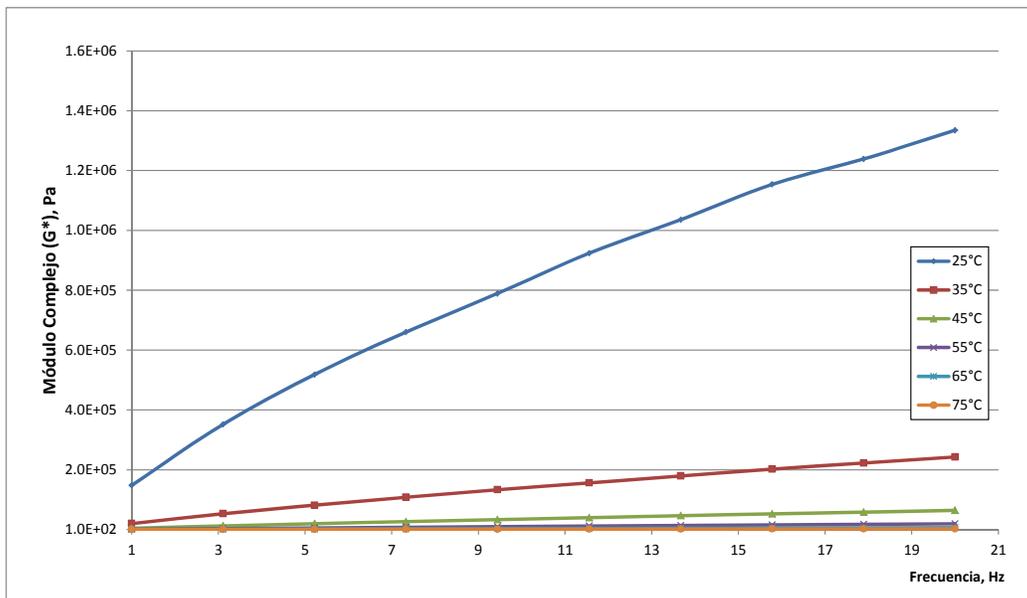


Figura 8.8. Comportamiento del módulo complejo de la capa 2 (inferior), muestreo 3.

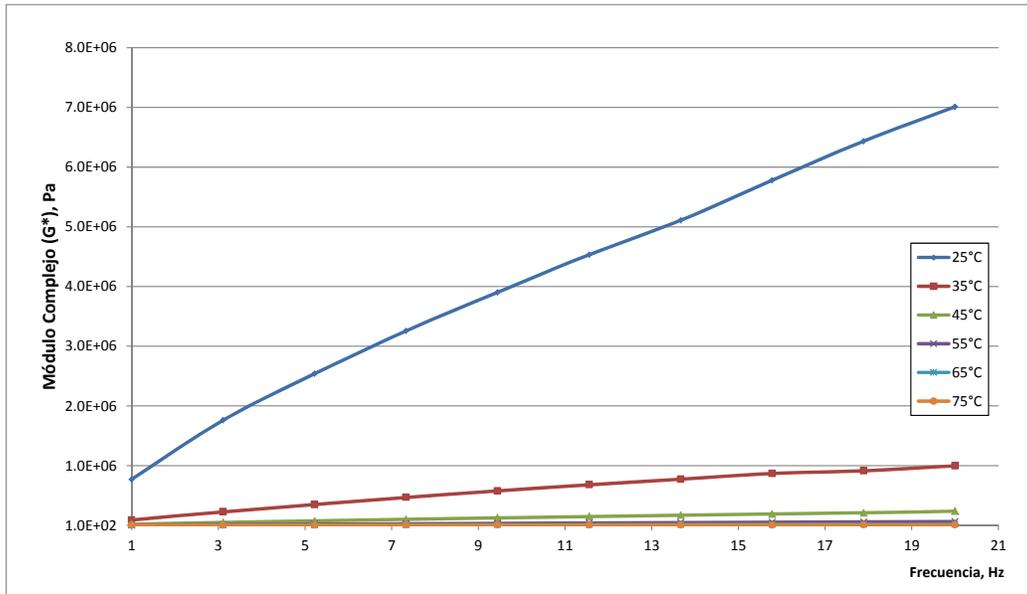


Figura 8.9. Comportamiento del módulo complejo de la capa 1 (superior), muestreo 4.

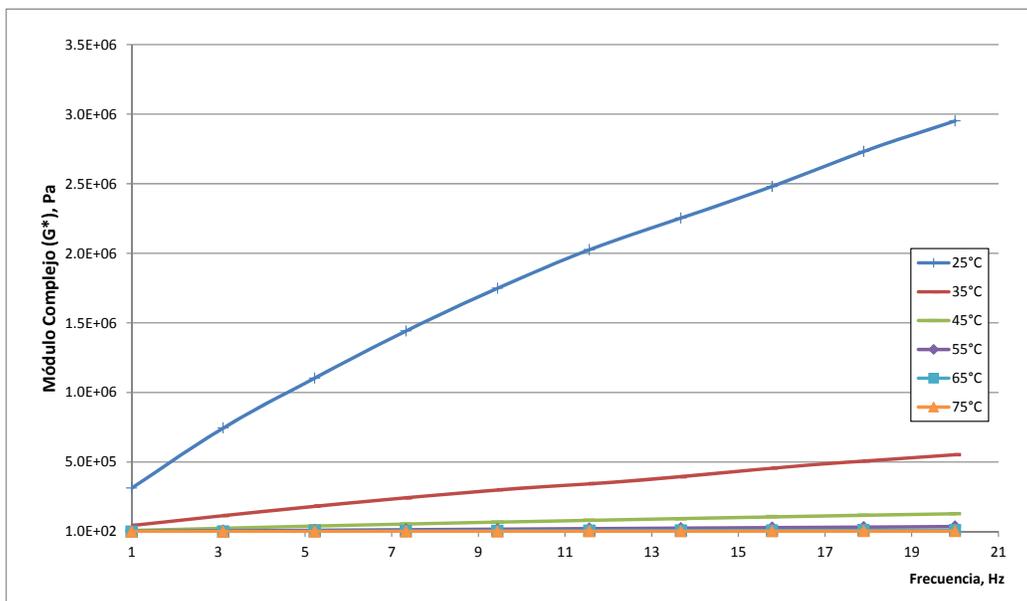


Figura 8.10. Comportamiento del módulo complejo de la capa 2 (inferior), muestreo 4.

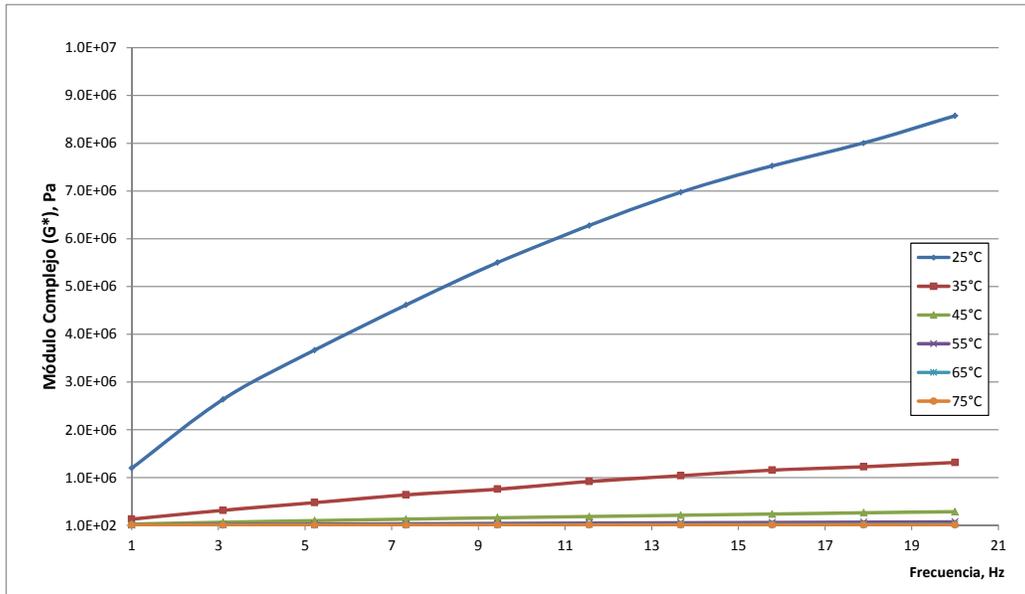


Figura 8.11. Comportamiento del módulo complejo de la capa 1 (superior), muestreo 5.

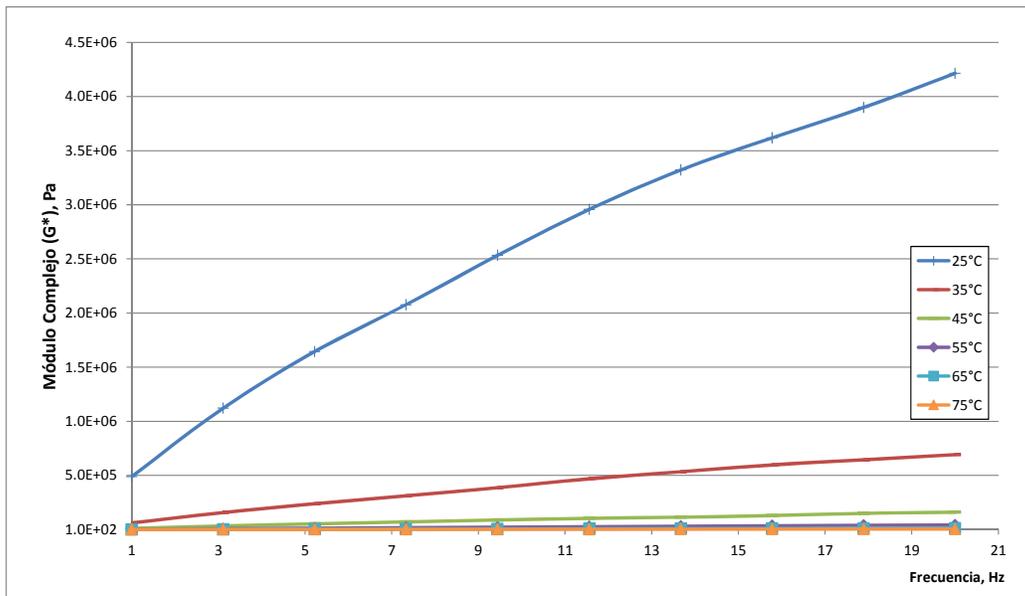


Figura 8.12. Comportamiento del módulo complejo de la capa 2 (inferior), muestreo 5.

En las Figuras 8.3 a 8.12, se demuestra que el comportamiento reológico del ligante asfáltico evaluado es consistente con la teoría viscoelástica. Esto se debe a que en todos los casos se observa que a mayor temperatura existe una disminución del módulo dinámico y que a mayor frecuencia de aplicación de carga empleada en el ensayo existe un aumento significativo en el módulo del material. Adicionalmente, comparando las gráficas de las capas 1 y 2 de un mismo

muestreo se puede observar que el material asfáltico en contacto directo con el oxígeno de la atmósfera (capa 1 o superior), presenta consistentemente mayores valores de módulos dinámicos que la capa 2 o inferior, lo que podría sugerir que, efectivamente, el material en contacto con el ambiente sufre un mayor envejecimiento por oxidación.

Aunque interesantes, estas gráficas no permiten observar el comportamiento del material a través del tiempo, es decir, los valores de los módulos de los asfaltos recuperados de los núcleos extraídos en los diferentes muestreos. Para esto, a continuación se presentan gráficas que consolidan la información obtenida y que permiten realizar este análisis comparativo.

8.3.2 Resultados consolidados para los diferentes muestreos realizados

En las Figuras 8.13 a 8.17 se presentan los resultados de módulo complejo (G^*) del asfalto recuperado de las cinco extracciones realizadas para las dos capas en las que se separan los núcleos y las diversas temperaturas de ensayo. Posteriormente, y para un análisis más detallado de esta información, se presentan gráficas separadas en donde se puede observar el comportamiento de las muestras de asfalto estudiadas en función de la temperatura, del muestreo (tiempo de extracción) y de la frecuencia de ensayo.

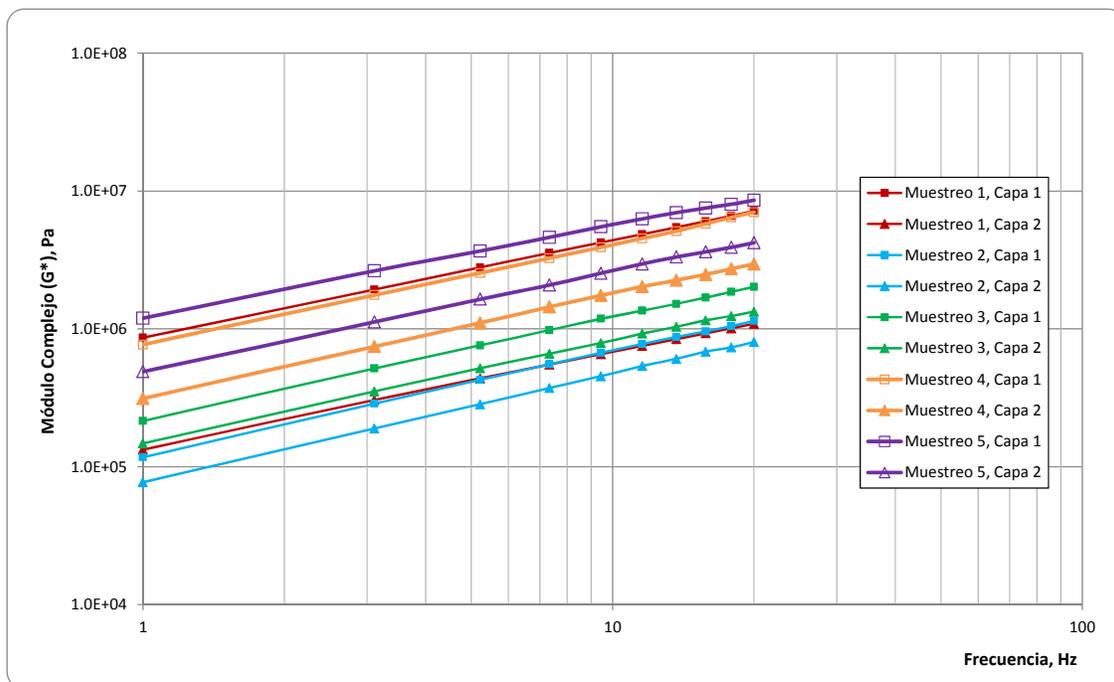


Figura 8.12. Módulo complejo en función de la frecuencia para el asfalto recuperado en las diferentes extracciones a una temperatura de ensayo de 25°C.

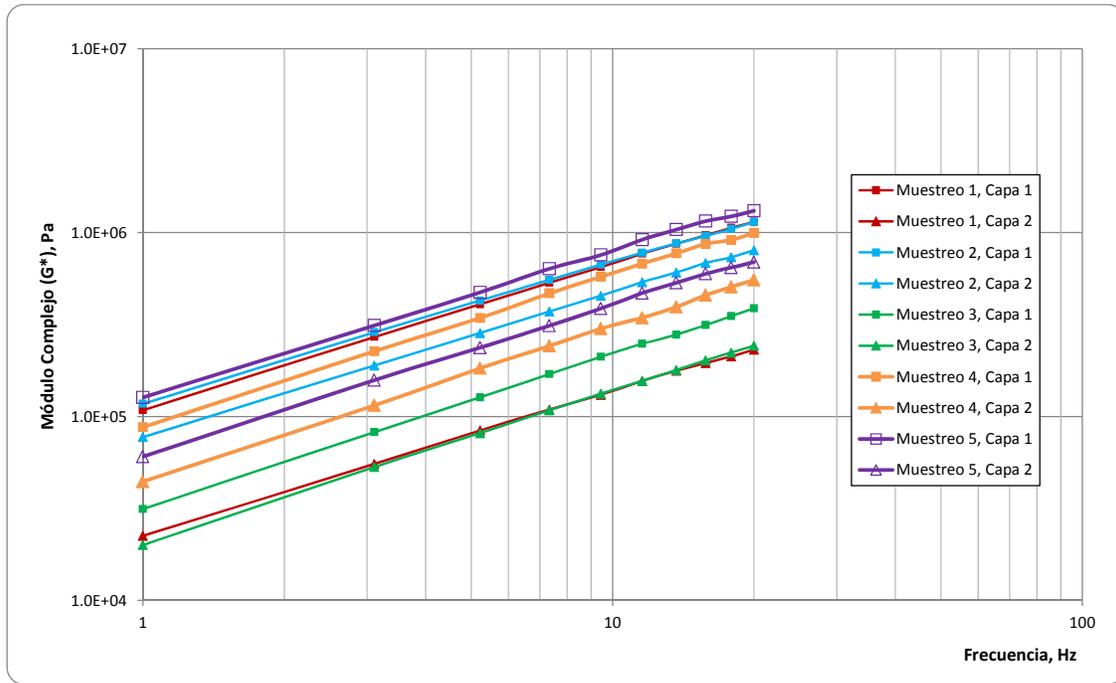


Figura 8.13. Módulo complejo en función de la frecuencia para el asfalto recuperado en las diferentes extracciones a una temperatura de ensayo de 35°C.

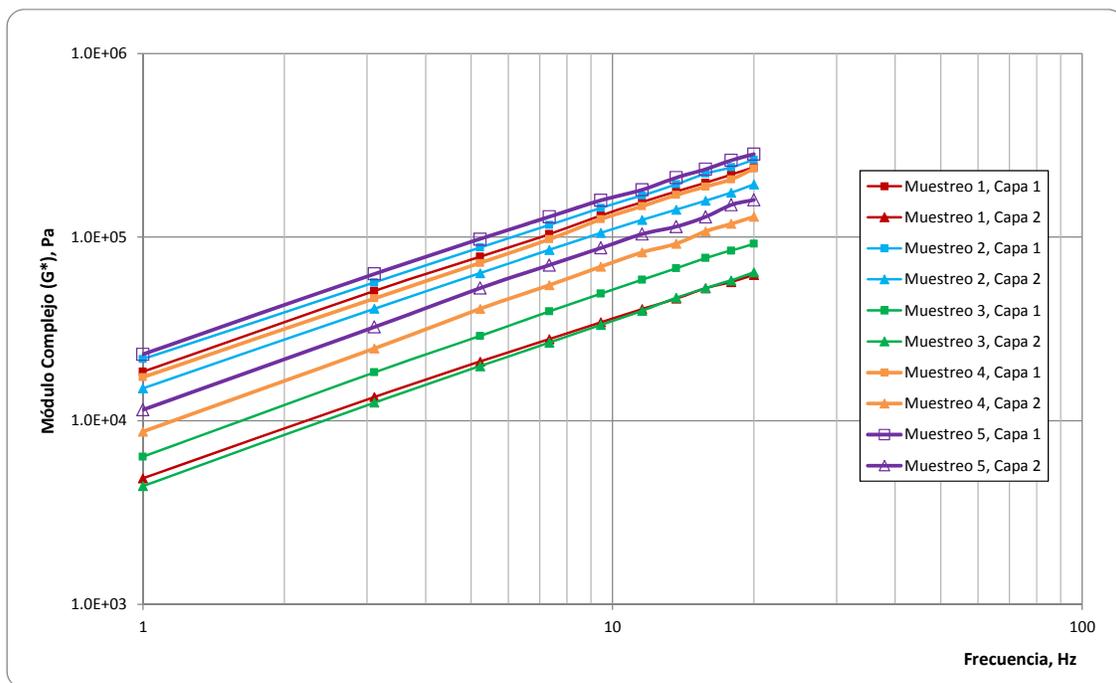


Figura 8.14. Módulo complejo en función de la frecuencia para el asfalto recuperado en las diferentes extracciones a una temperatura de ensayo de 45°C.

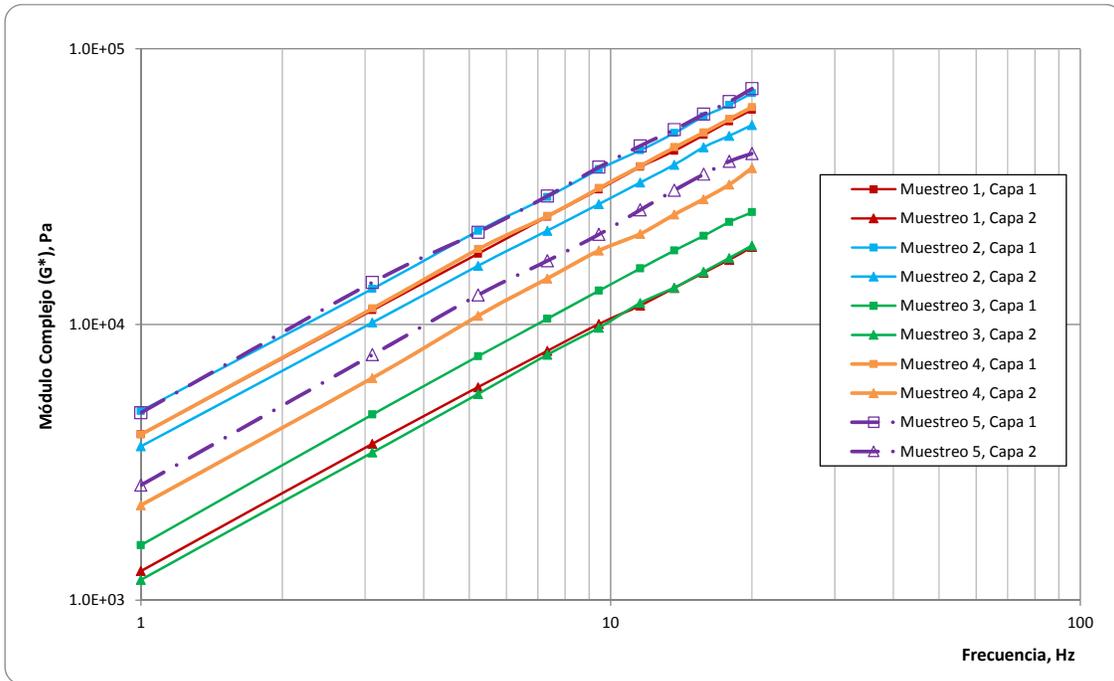


Figura 8.15. Módulo complejo en función de la frecuencia para el asfalto recuperado en las diferentes extracciones a una temperatura de ensayo de 55°C.

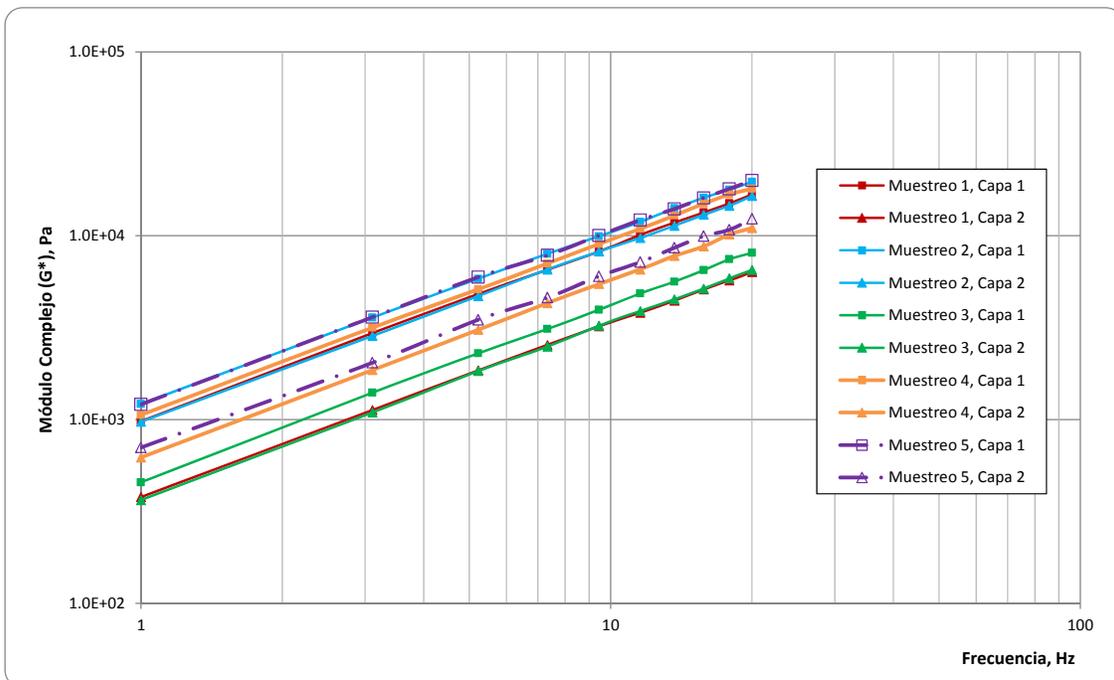


Figura 8.16. Módulo complejo en función de la frecuencia para el asfalto recuperado en las diferentes extracciones a una temperatura de ensayo de 65°C.

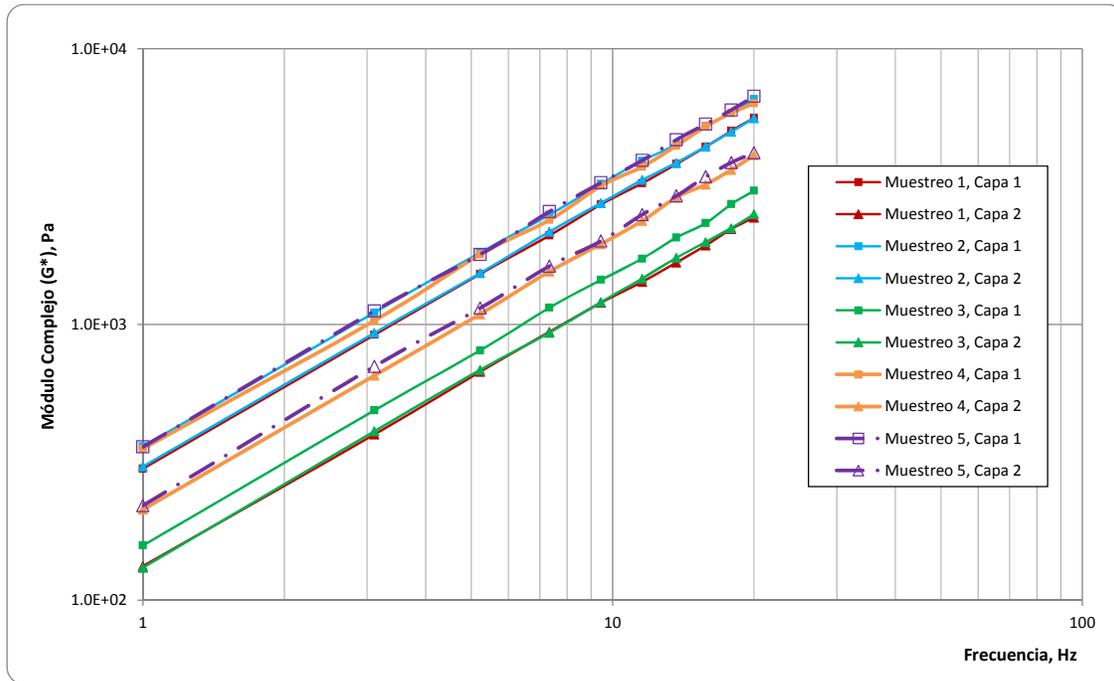


Figura 8.17. Módulo complejo en función de la frecuencia para el asfalto recuperado en las diferentes extracciones a una temperatura de ensayo de 75°C.

De las gráficas anteriores se puede observar una vez más que, para un mismo muestreo e independientemente de la temperatura, el módulo complejo de la capa inferior es siempre inferior al módulo complejo de la capa superior. Como se mencionó en la sección anterior, esta observación parece apoyar la hipótesis de que la capa más superficial de cada núcleo sufre mayores procesos de envejecimiento en comparación con la capa más profunda, debido a su contacto directo con el aire circundante. Por otra parte, se observa que los módulos complejos de la última extracción para las dos capas son superiores a los del muestreo inmediatamente anterior. Este resultado, que es el esperado (i.e., la oxidación genera una rigidización en el material a través de tiempo), no se había observado de forma consistente en todas las extracciones; sin embargo, en los muestreos 3, 4 y 5 se observa la tendencia teórica esperada.

En los resultados presentados con anterioridad también se observa que, independientemente de la temperatura, existe una disminución del módulo del asfalto extraído del tercer muestreo (a los 6 meses de haber realizado la extracción base) en comparación con los módulos complejos determinados en los dos primeros muestreos. La reversión en la tendencia de disminución de módulos que se observó en el asfalto extraído en los últimos muestreos (muestreo 4 y 5), sin embargo, soporta la afirmación de que los resultados obtenidos a través de estudio no son concluyentes. En estos casos se observa que los módulos de los asfaltos recuperados de la penúltima y última extracción si muestran una rigidización del material a través del tiempo (i.e., módulos superiores a los de las extracciones anteriores).

Los resultados mixtos observados a lo largo de este estudio pueden tener diversas causas, dentro de las cuales se destacan:

- la incertidumbre sobre la calidad de la mezcla asfáltica,
- la incertidumbre sobre la homogeneidad de la misma,
- la incertidumbre sobre la calidad de las técnicas constructivas empleadas durante la fabricación, transporte, extensión y compactación del material,
- la probable existencia de efectos locales que exponen a la carpeta a condiciones diferentes en los puntos seleccionados dentro el tramo para las extracciones de los núcleos, y
- posibles deficiencias en la obtención de los núcleos y en la recuperación del asfalto (corte del núcleo, centrifugado, destilación para recuperación del asfalto),

Aunque estas causas no se pueden comprobar, permitirían explicar parcialmente el cambio errático en el comportamiento del material a través del tiempo.

Como complemento a las Figuras anteriores, en la Figura 8.18 se presenta un ejemplo comparativo del comportamiento del módulo cortante complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) para una frecuencia de 10 Hz, en función de la temperatura, para los asfaltos obtenidos de los diferentes muestreos. En esta figura se observa una vez más que el comportamiento reológico teórico para una muestra específica de asfalto es el esperado. No obstante, de nuevo se comprueba que existe un comportamiento mixto entre las muestras obtenidas de diferentes muestreos. Por ejemplo, a una temperatura de 25°C el módulo complejo para el muestreo 5 (realizado 1 año después del muestreo base), es muy superior al de los muestreos anteriores (1.23 veces mayor al siguiente módulo obtenido a esta temperatura)—sugiriendo efectos de rigidización del mismo debidos al envejecimiento. Sin embargo, los módulos de los asfaltos obtenidos en los muestreos 1 y 2 a la misma temperatura son superiores a los obtenidos en los muestreos 3 y 4, lo que muestra, una vez más, la potencial inconsistencia en los resultados.

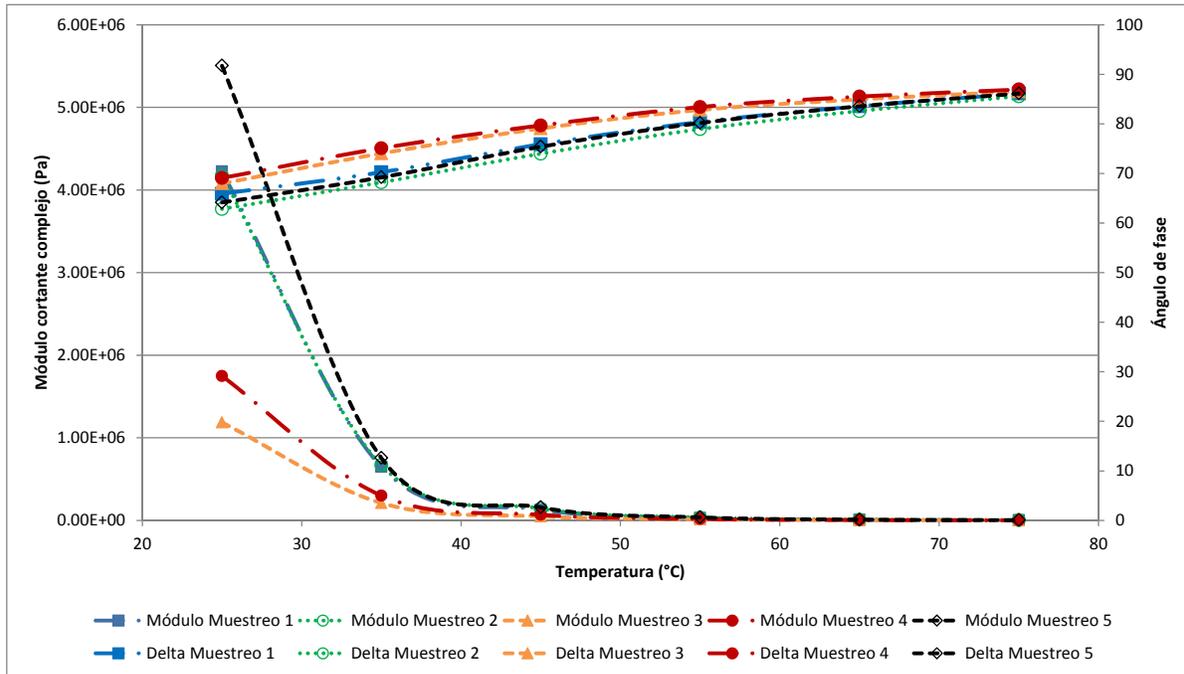


Figura 8.18. Comparación de G^* y δ para 10 Hz en función de la temperatura. Capa 1 (superficial).

8.3.3 Gráficas consolidadas por temperatura de ensayo

A continuación se presentan las gráficas consolidadas de la evolución del módulo complejo en el tiempo, para cada temperatura de ensayo, en los 5 muestreos realizados a las dos capas (superficial o capa 1 e inferior o capa 2).

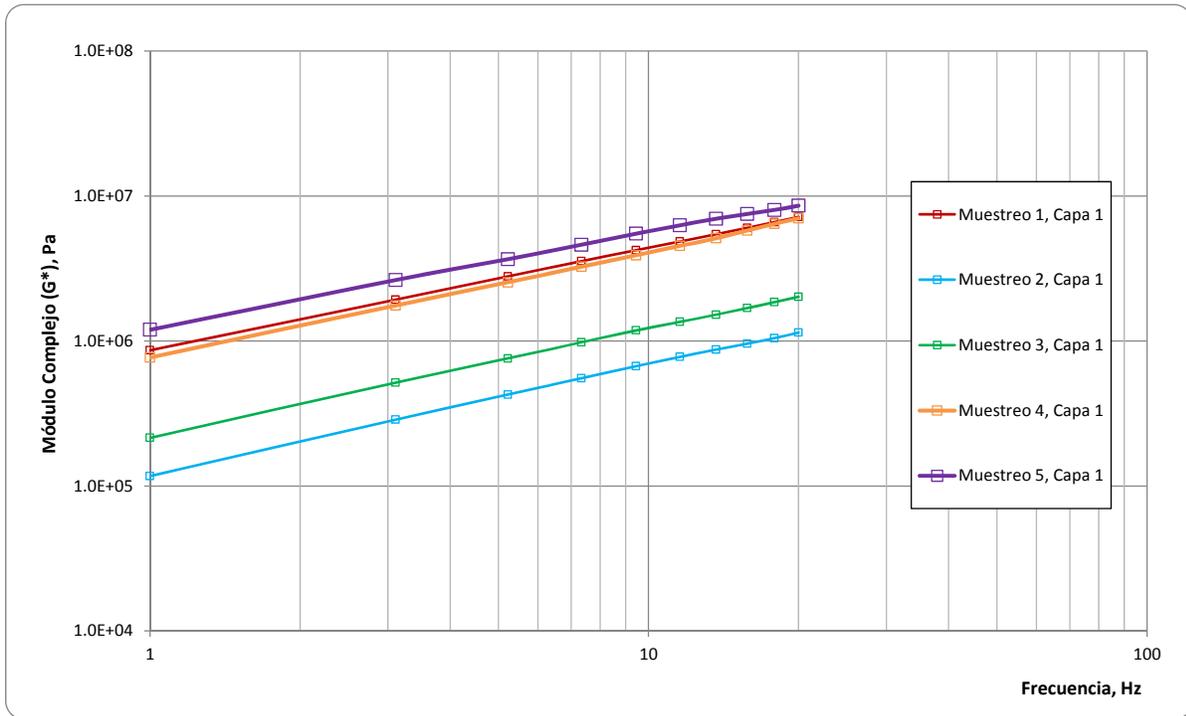


Figura 8.19. Evolución del módulo complejo de la capa 1 (superficial) a 25°C.

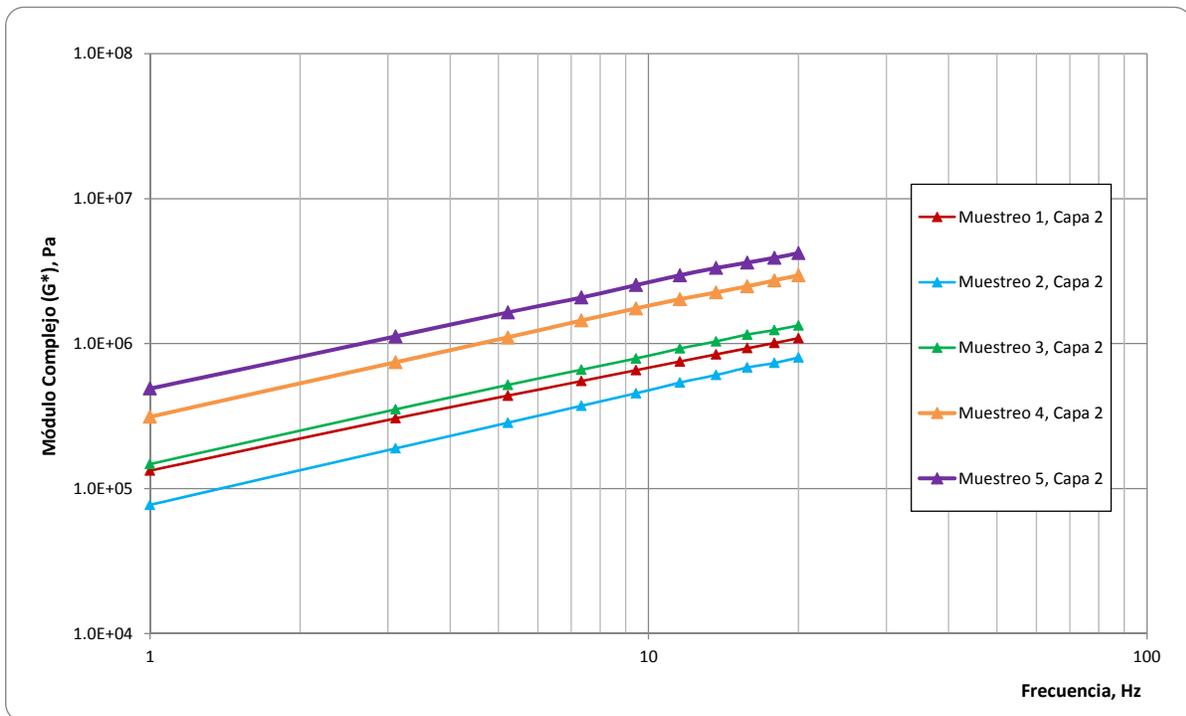


Figura 8.20. Evolución del módulo complejo de la capa 2 (inferior) a 25°C.

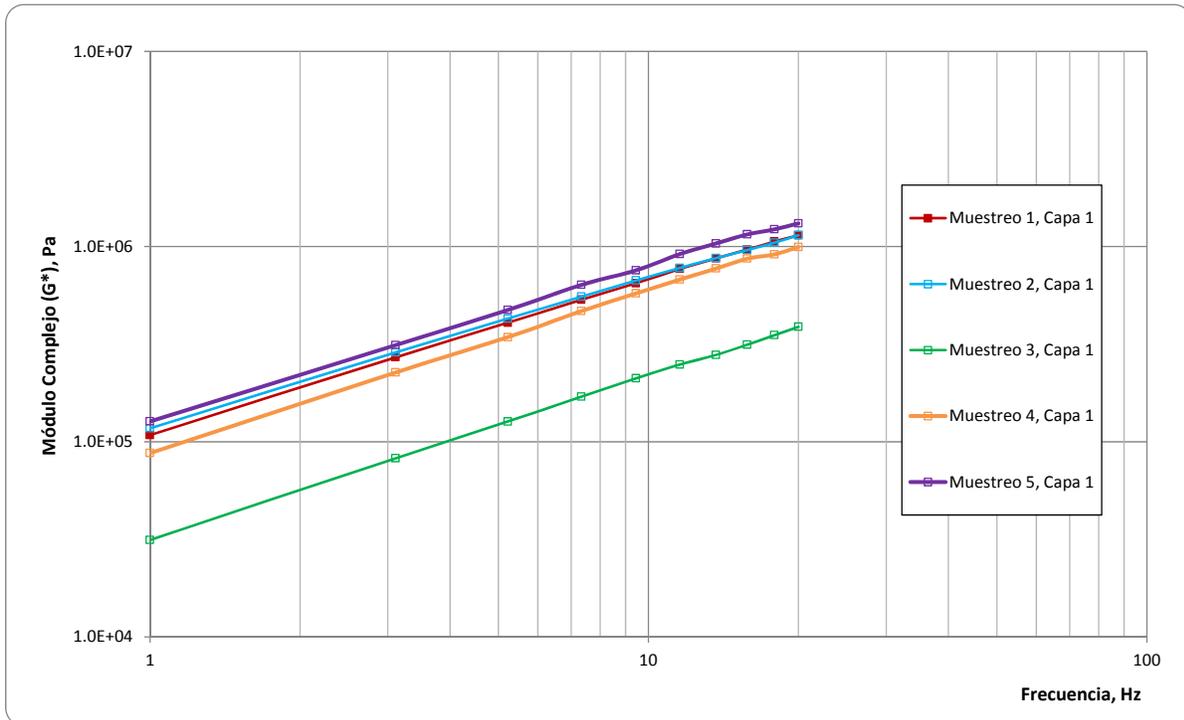


Figura 8.21. Evolución del módulo complejo de la capa 1 (superficial) a 35°C.

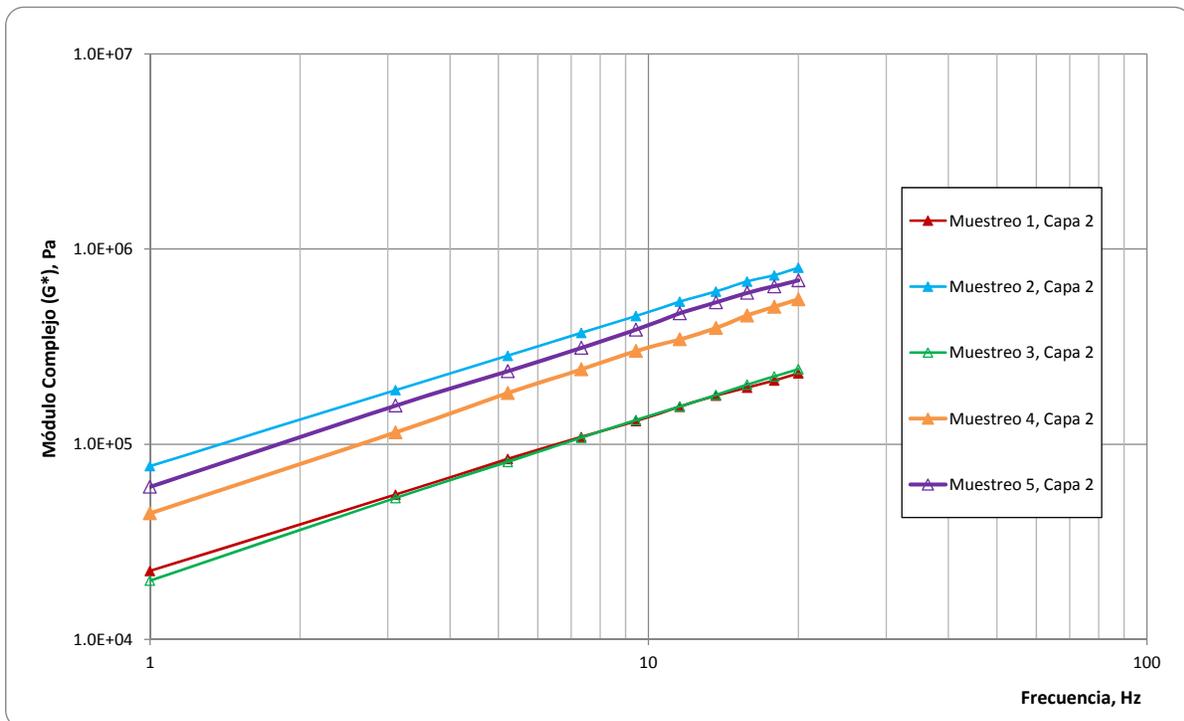


Figura 8.22. Evolución del módulo complejo de la capa 2 (inferior) a 35°C.

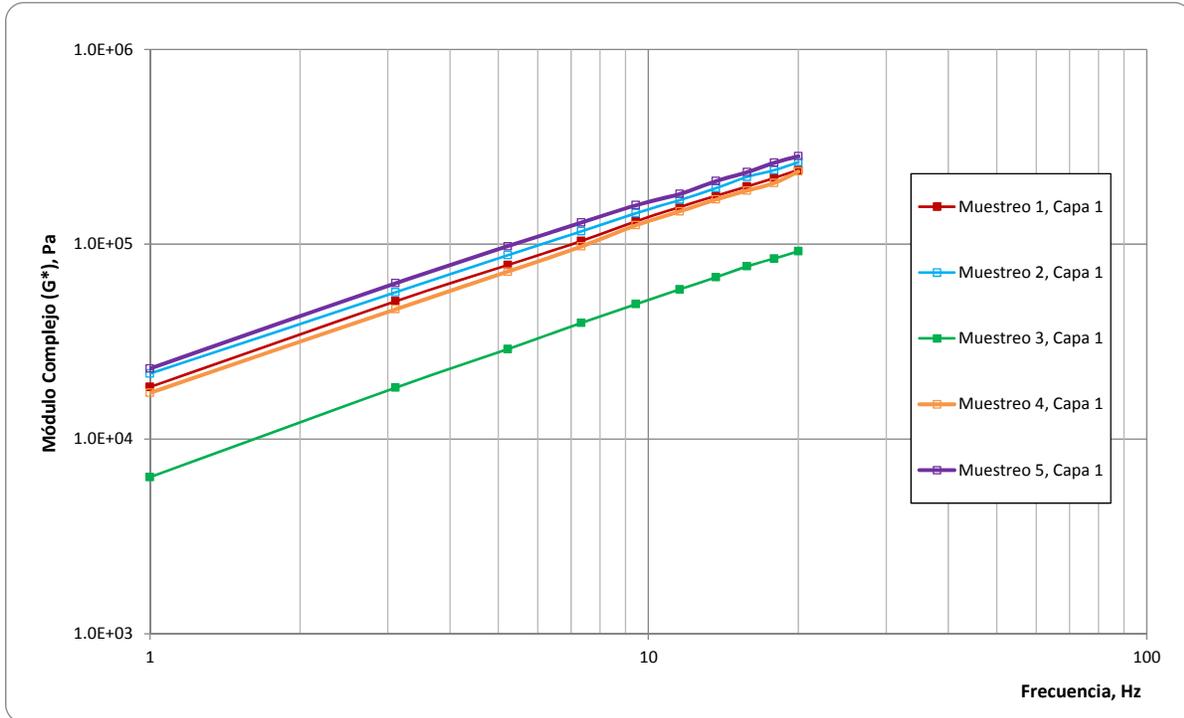


Figura 8.23. Evolución del módulo complejo de la capa 1 (superficial) a 45°C.

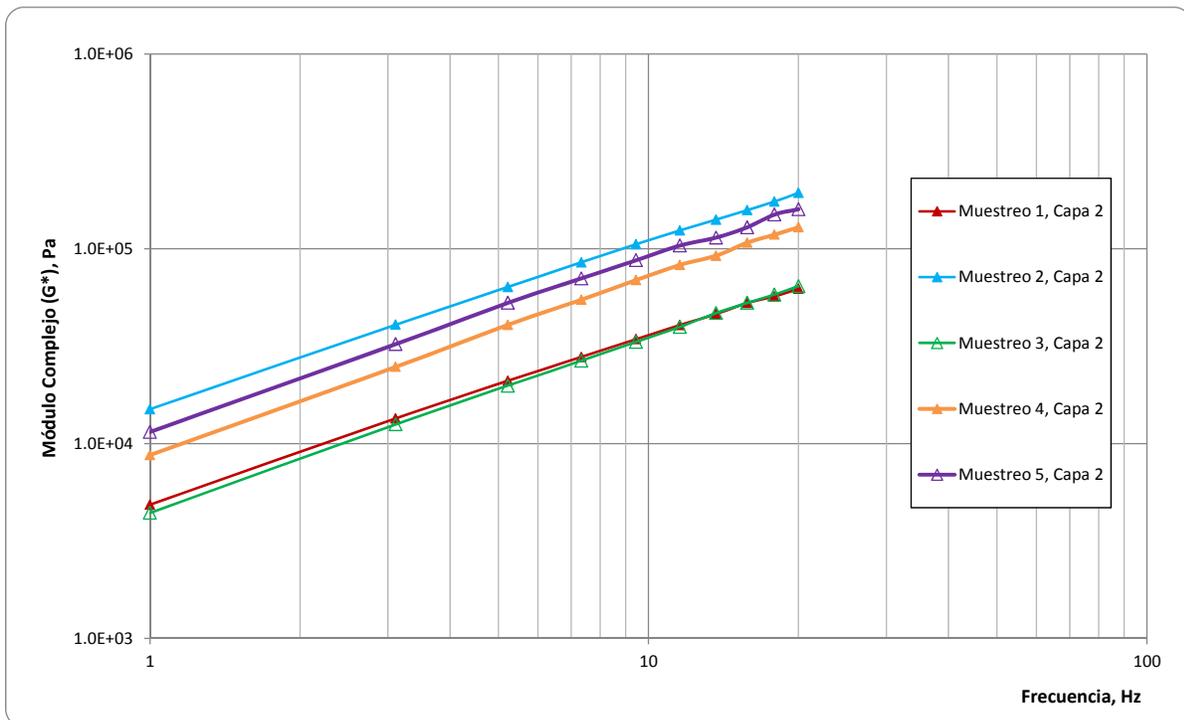


Figura 8.24. Evolución del módulo complejo de la capa 2 (inferior) a 45°C.

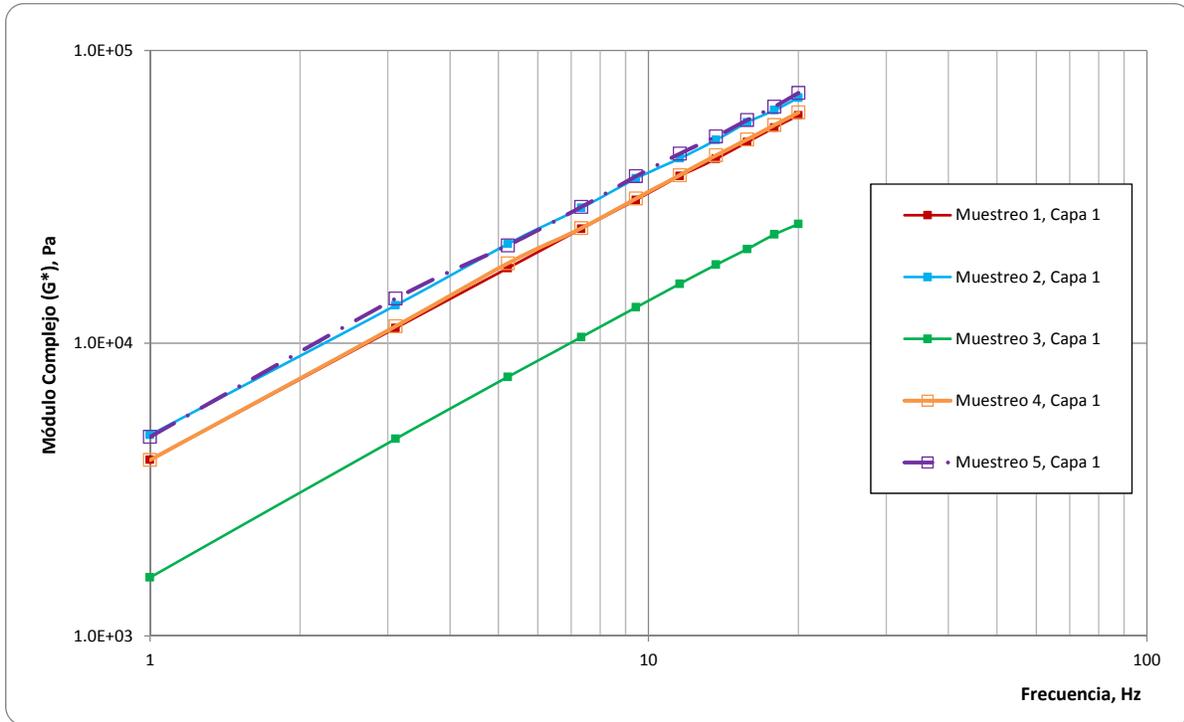


Figura 8.25. Evolución del módulo complejo de la capa 1 (superficial) a 55°C.

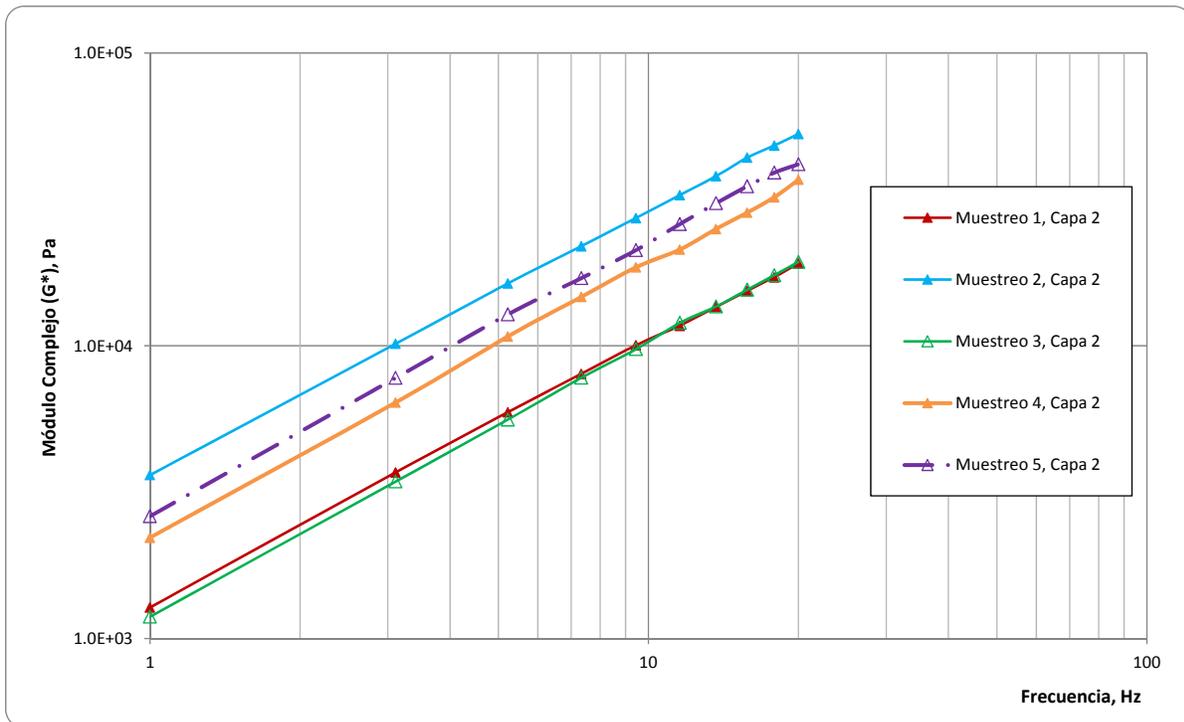


Figura 8.26. Evolución del módulo complejo de la capa 2 (inferior) a 55°C.

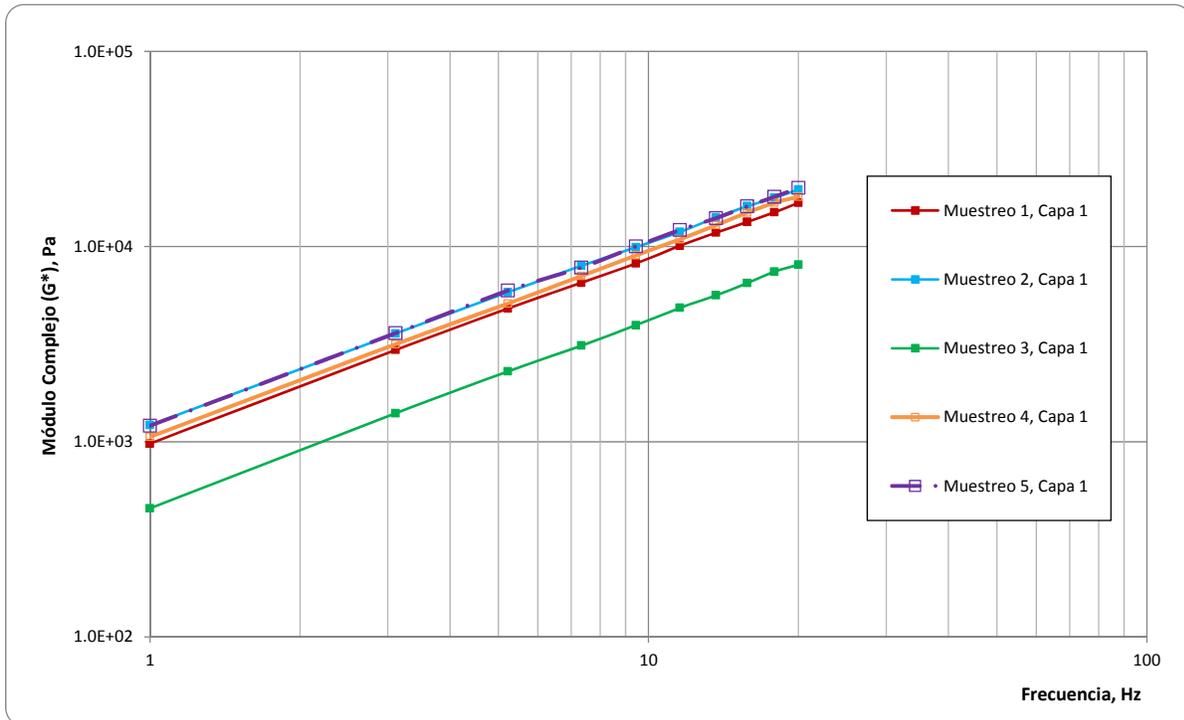


Figura 8.27. Evolución del módulo complejo de la capa 1 (superficial) a 65°C.

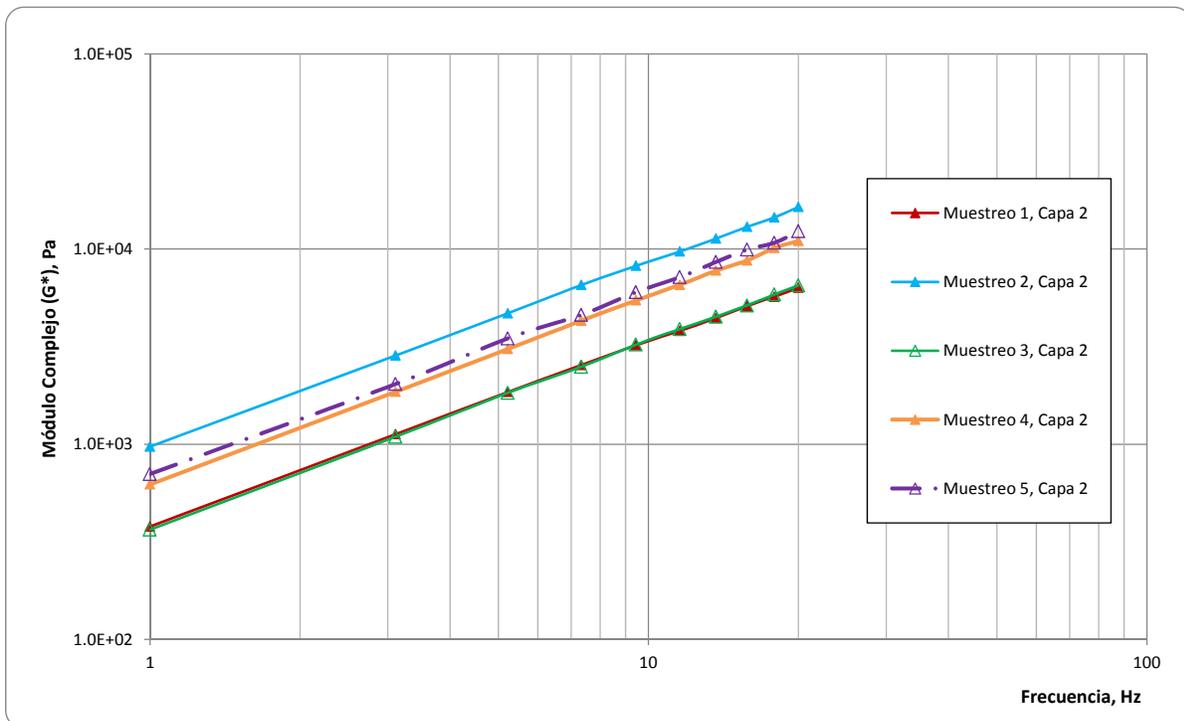


Figura 8.28. Evolución del módulo complejo de la capa 2 (inferior) a 65°C.

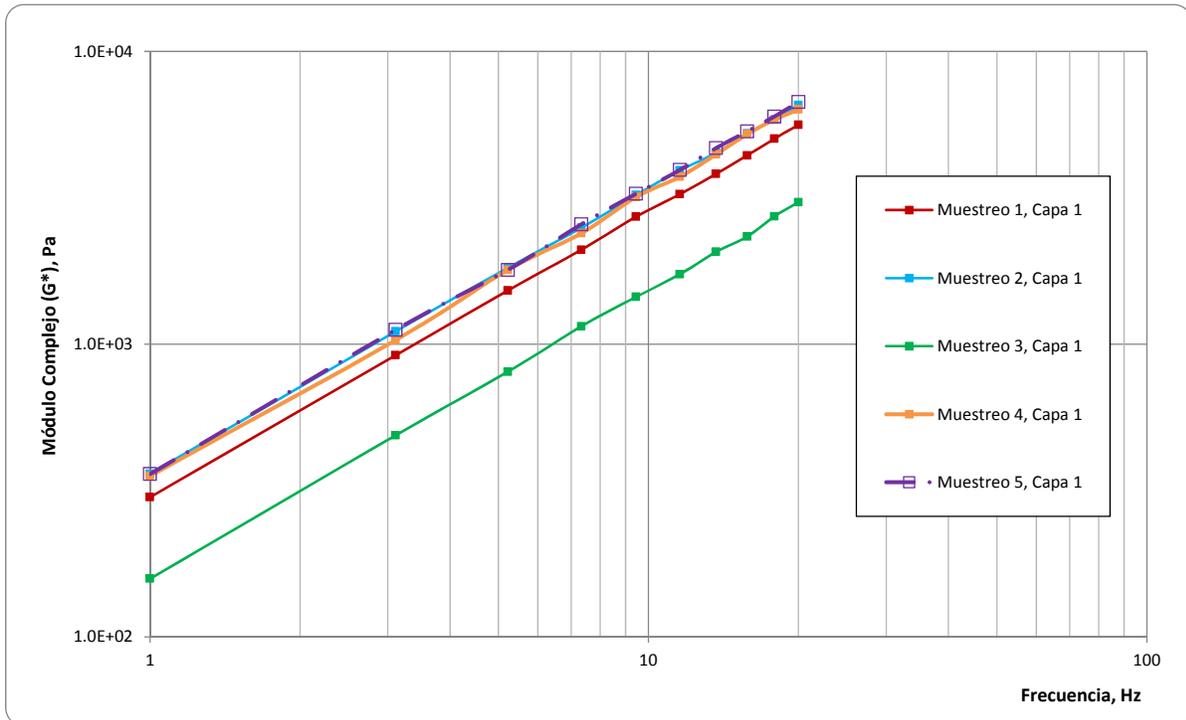


Figura 8.29. Evolución del módulo complejo de la capa 1 (superficial) a 75°C.

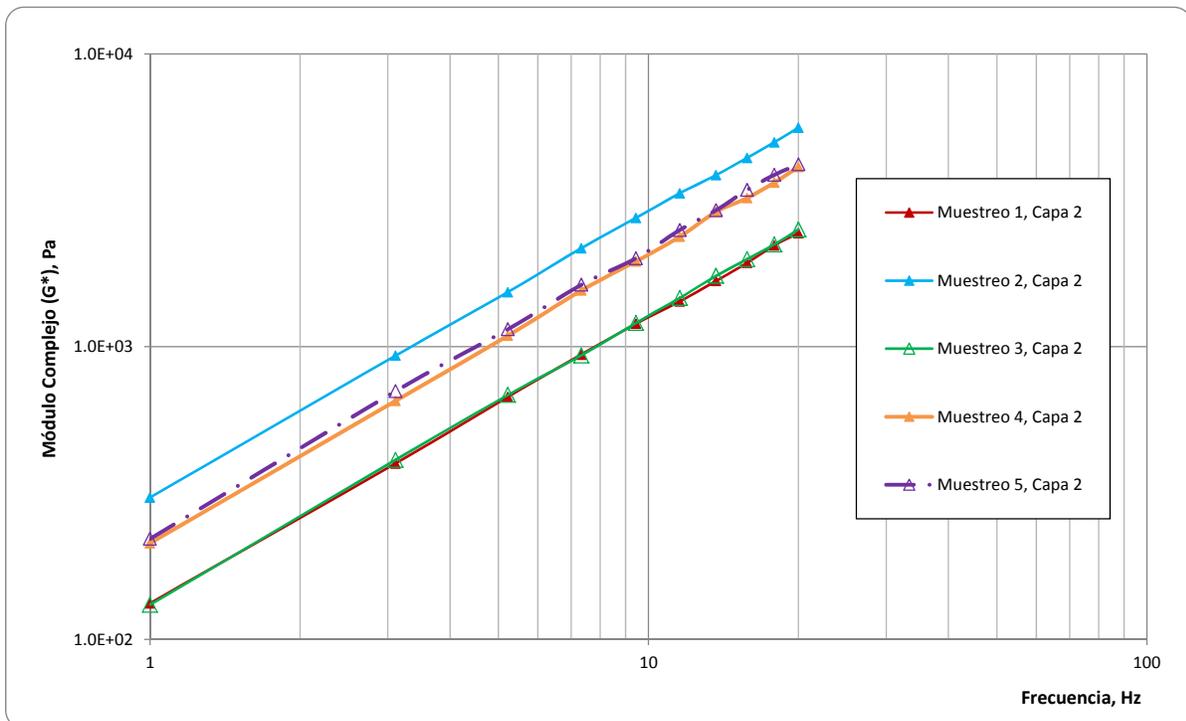


Figura 8.30. Evolución del módulo complejo de la capa 2 (inferior) a 75°C.

Con base en las gráficas anteriores se observa que para una temperatura intermedia (25°C) los asfaltos extraídos de las dos capas muestran un incremento de su módulo complejo a través del tiempo, con excepción de los resultados obtenidos para el primer muestreo o muestreo base. Es decir, que el módulo del asfalto de la capa 1 del muestreo 2 (correspondiente a 3 meses de análisis) es inferior al del muestreo 3 (correspondiente a 6 meses de análisis), el cual a su vez es inferior al obtenido del muestreo 4 (correspondiente a 9 meses de análisis) y, finalmente, el módulo del último muestreo (correspondiente a 12 meses de análisis) es superior a todos los módulos de los muestreos anteriores. Este comportamiento, teóricamente esperado, también se observa a esta temperatura para la capa 2. No obstante, para temperaturas de ensayo superiores a los 25°C, el patrón de aumento del módulo en función del tiempo de muestreo se pierde, e incluso se observa nuevamente cómo de forma consistente el asfalto recuperado del muestreo 3 (correspondiente a 6 meses de análisis) es sustancialmente inferior al de todos los demás muestreos. Las potenciales causas de este comportamiento fueron explicadas con anterioridad.

8.4. Resultados de caracterización mediante ensayo FTIR

En cuanto a los ensayos de caracterización química mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), a continuación se presentan los resultados obtenidos para cada una de las dos capas evaluadas (superficial o capa 1 e inferior o capa 2) de la carpeta de rodadura, para los 4 muestreos ensayados. De común acuerdo con el IDU, se estableció que no se realizaría este ensayo para el último muestreo (muestreo 5) debido a que su ejecución se realiza en un laboratorio externo al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y a que su duración típica es usualmente superior a un par de meses desde su recuperación.

La Figura 8.31 ilustra las muestras típicas de asfalto recuperado por la técnica de rotovapor y que fueron ensayadas en los laboratorios de Química de la Universidad de los Andes. En general, 1 gramo de cada muestra de asfalto recuperado es suficiente para el ensayo. El principal reto que se detectó en la ejecución de este procedimiento experimental, sin embargo, consistió en que se observó que el espesor y homogeneidad de la muestra influyen drásticamente en los resultados obtenidos. Esto, como se explicará a continuación, induce incertidumbre en los resultados obtenidos.



Figura 8.31. Muestras de asfalto recuperado, por cada subcapa.

En la Figura 8.32 se presenta el espectro completo obtenido por el ensayo para los 4 muestreos, de donde se destaca comparativamente para las dos subcapas y cada uno de los muestreos, la evolución del grupo de carbonilos a través del tiempo bajo las diversas variables que impactan al pavimento durante la operación del tránsito.

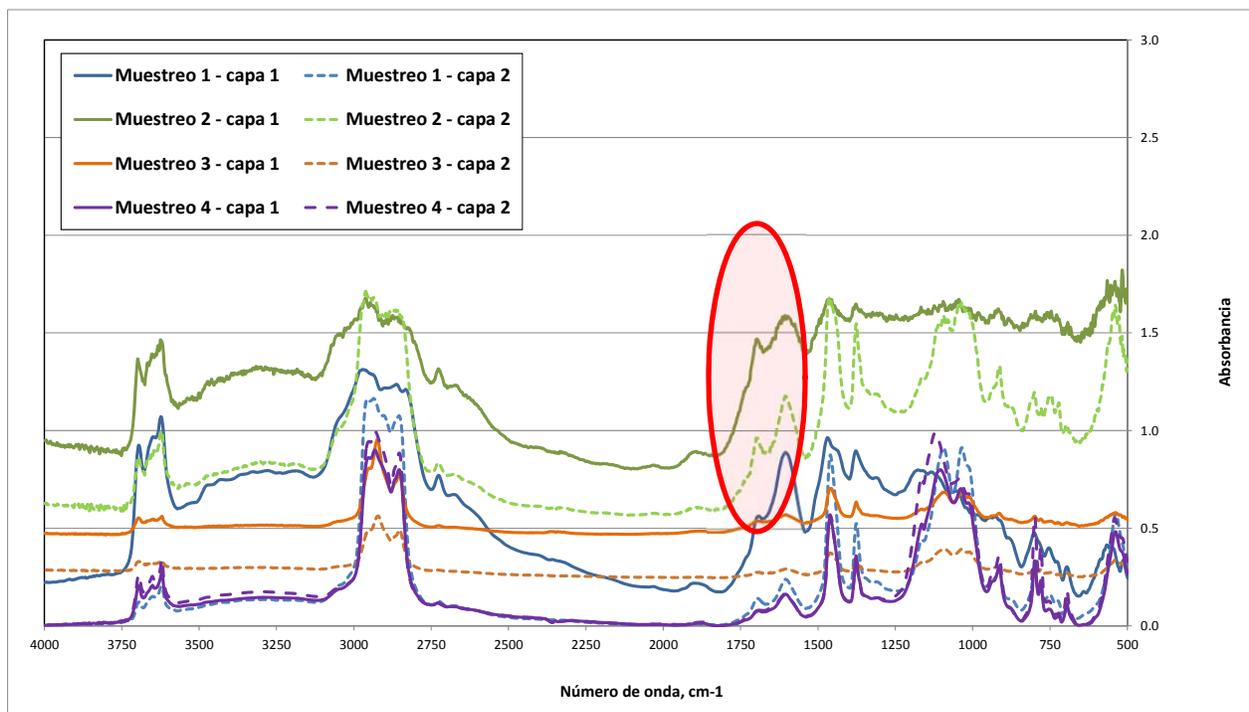


Figura 8.32. Espectro infrarrojo de las muestras de asfalto evaluado.

En la Figura 8.33 se muestra un detalle del rango del espectro correspondiente al número de onda en el cual se identifican los carbonilos y demás compuestos químicos producto de la reacción química que sufren las cadenas de hidrocarburos en interacción con el oxígeno presente en el aire. El rango del número de onda de análisis corresponde a 1650 – 1770 (cm^{-1}).

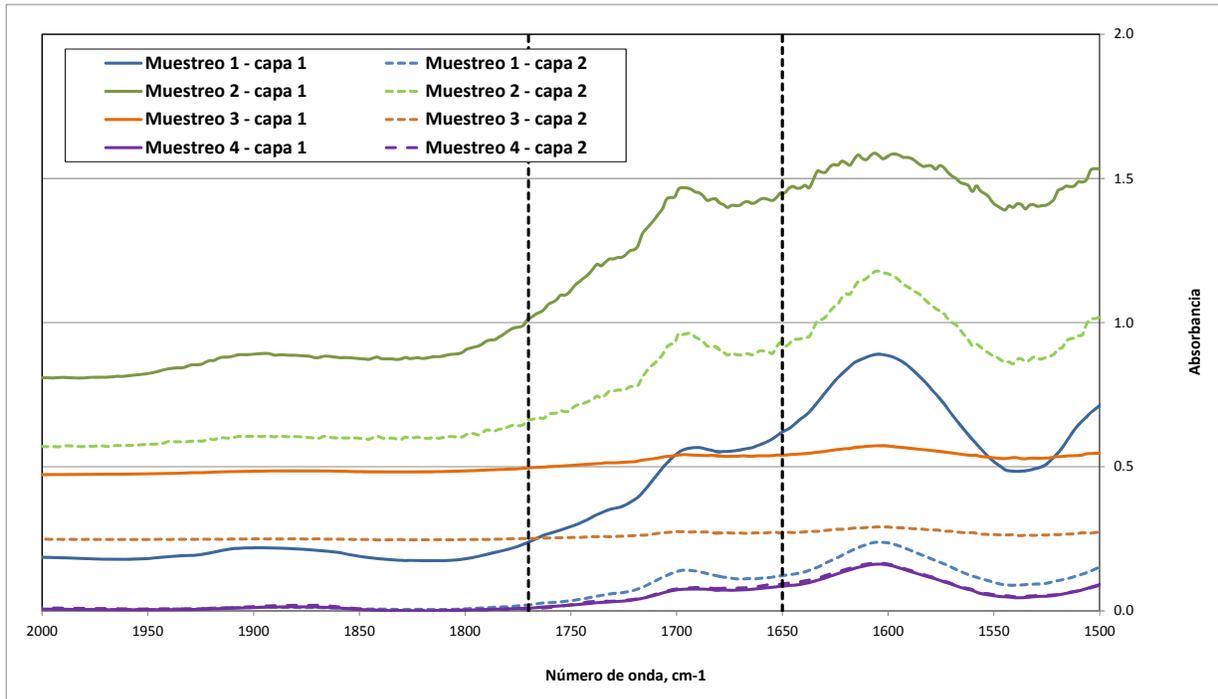


Figura 8.33. Identificación del rango de análisis del grupo de carbonilos.

En la Figura 8.34 se presenta el análisis evolutivo del grupo carbonilo en la capa superficial de la rodadura o capa 1 para los diferentes muestreos.

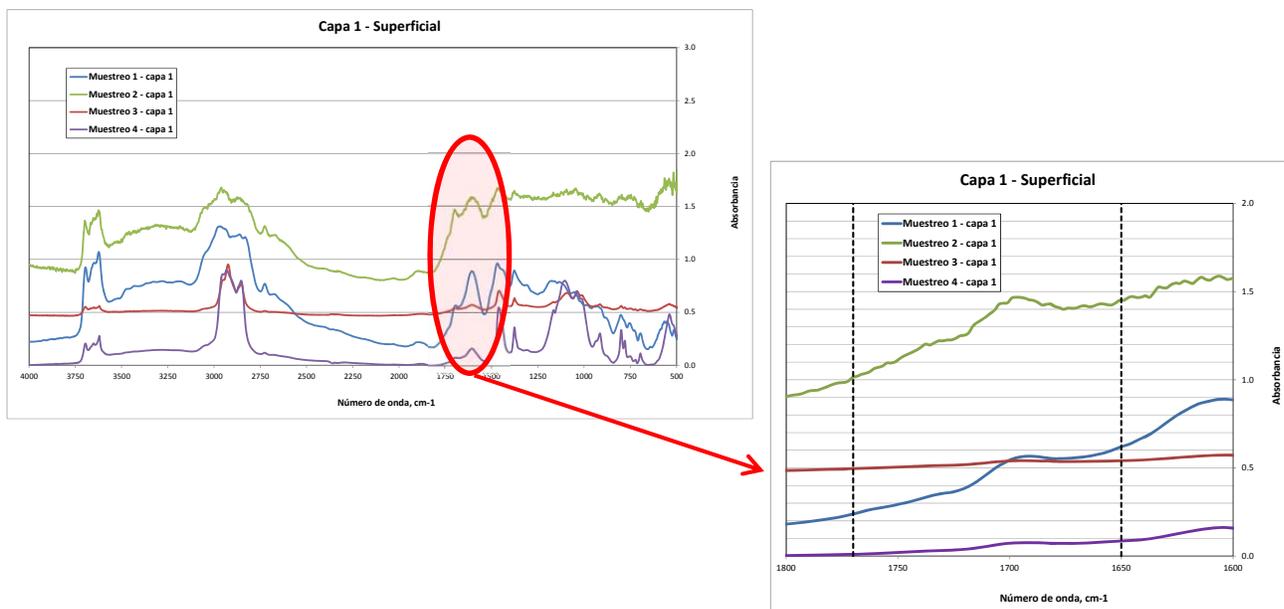


Figura 8.34. Perfil espectroscópico capa 1 (superficial).

De la misma manera, en la Figura 8.35 se presenta el análisis evolutivo del grupo carbonilo en la capa del inferior de la rodadura o capa 2.

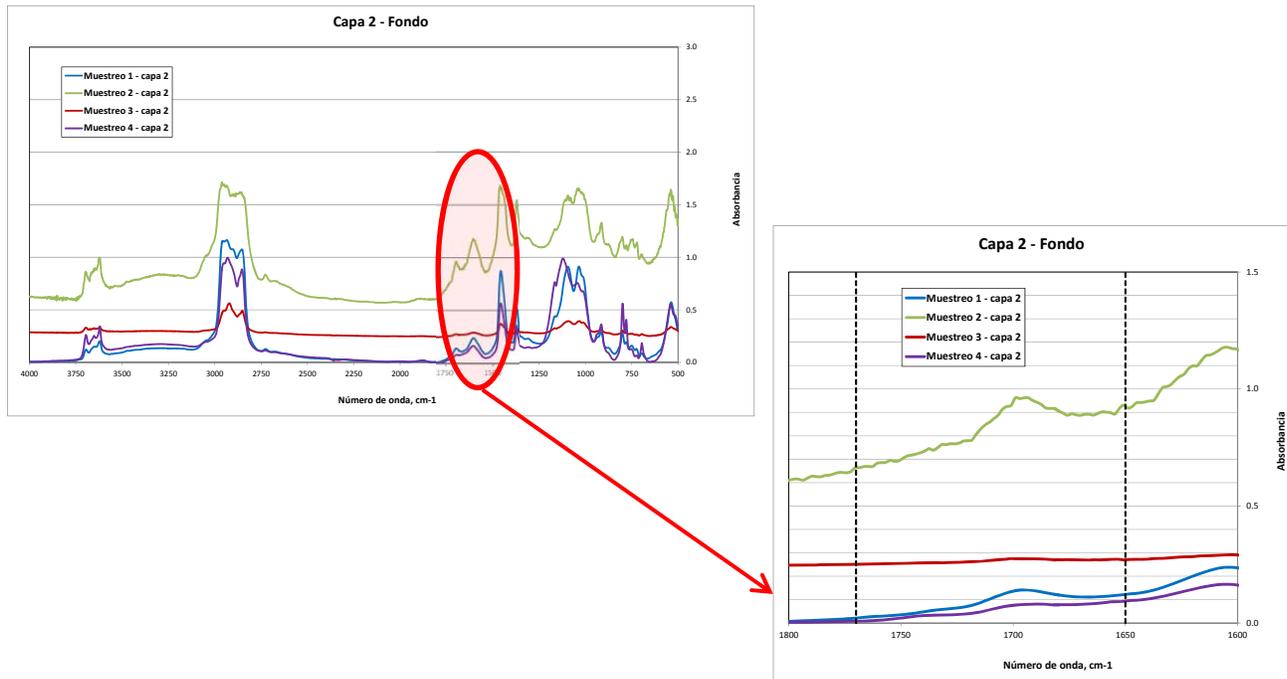


Figura 8.35 Perfil espectroscópico capa 2 (fondo).

Finalmente, la Tabla 8.3 resume los resultados obtenidos para los escenarios evaluados.

Tabla 8.3. Área de carbonilos (unidades de absorbancia) por escenario evaluado.

Capa	Muestreo			
	1 (inicio)	2 (a 3 meses)	3 (a 6 meses)	4 (a 9 meses)
1 (Superficial)	0.54	1.5	0.63	0.51
2 (Fondo)	0.102	0.96	0.312	0.447

Comparativamente hablando, al igual que con el caso de la reología, no se manifiesta una tendencia clara en el aumento del área de carbonilos entre las diferentes muestras. En la Figura 8.36 se ilustra gráficamente esta situación. Las causas de los resultados no concluyentes obtenidos pueden tener causas similares a las descritas en la sección anterior para el caso de caracterización reológica del material. No obstante, en este caso se debe sumar como una potencial causa adicional la ausencia de un procedimiento estandarizado de este ensayo en el

que se especifique con claridad la metodología de preparación de muestras homogéneas y uniformes y de análisis de la información obtenida.

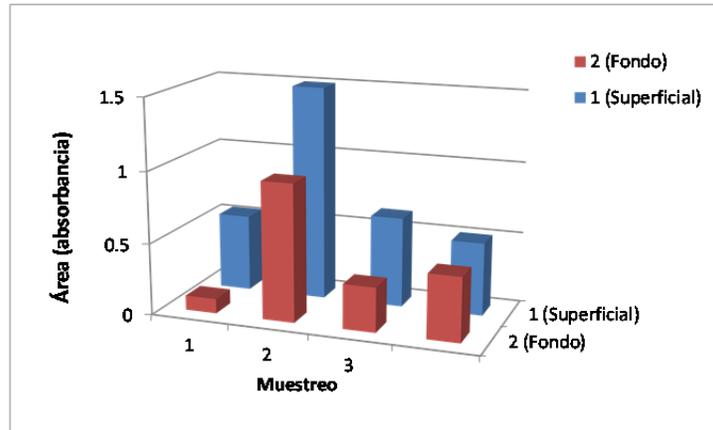


Figura 8.36. Comparación del contenido de carbonilos por escenario evaluado.

Vale la pena mencionar que el presente convenio ha permitido, por primera vez, evaluar el potencial de esta técnica experimentar para realizar el seguimiento y la cuantificación de la oxidación de asfaltos. No obstante, la experiencia obtenida ha mostrado que esta técnica requiere de importantes ajustes—principalmente en cuanto a la preparación del espécimen—antes de poder usarla o de recomendarla como un ensayo confiable para los propósitos de medición de oxidación de ligantes asfálticos.

9. Diseño y Desarrollo de un Modelo Numérico del Comportamiento Dinámico del Pavimento

Como parte de las Etapas 4 y 5 del presente convenio se estableció la formulación e implementación de un modelo numérico que acople las condiciones climáticas con la respuesta mecánica de estructuras de pavimento. En el segundo informe de avance se presentaron las generalidades básicas del modelo. En dicho informe se comunicó que el modelo propuesto es un modelo en tres dimensiones (3-D) cuya formulación numérica se realizó empleando el método de las diferencias finitas. La implementación del modelo se realizó en el lenguaje de programación Fortran. El modelo supone que el pavimento es una estructura multi-capa compuesto por materiales elásticos lineales y consta de dos partes o módulos principales: 1) un módulo para simular el flujo de agua y calor, y 2) un módulo para simular la respuesta del pavimento ante carga mecánica (i.e., mecánica de pavimentos). La Figura 9.1 presenta la esquematización general del modelo.

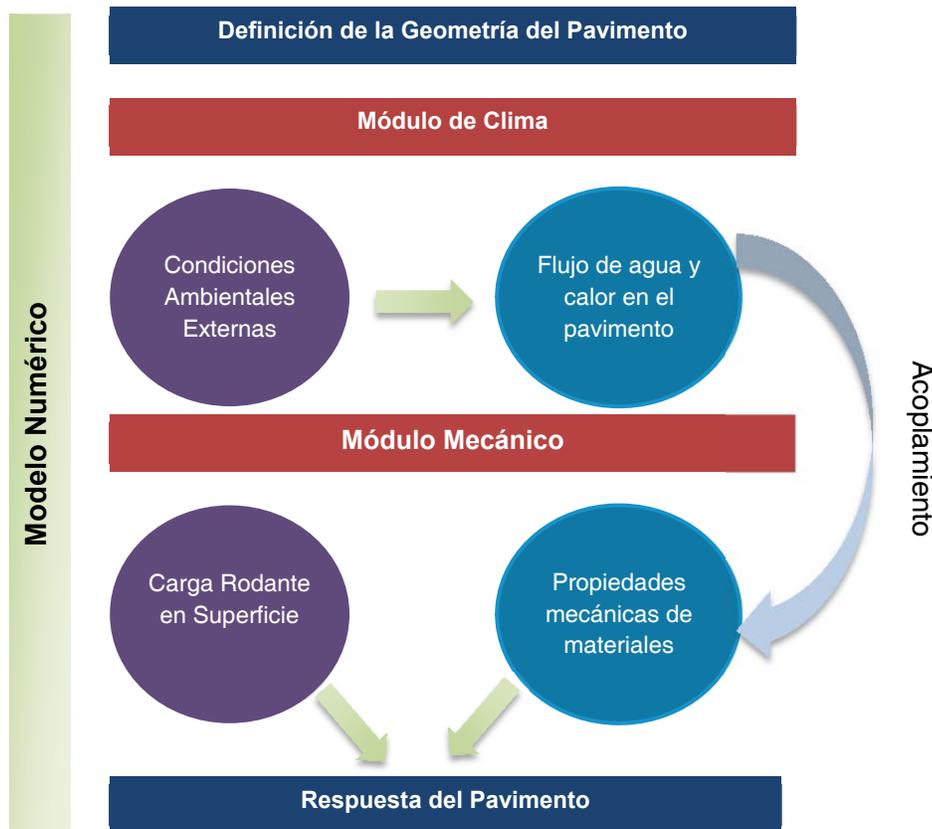


Figura 9.1. Esquema conceptual del modelo numérico.

En esta sección se presenta una descripción detallada de la formulación matemática y numérica del **módulo mecánico** y del **módulo climático** del modelo, así como los resultados realizados sobre una estructura de pavimento flexible similar a la existente en el punto de instrumentación de la Calle 80. Algunos resultados detallados de simulaciones mecánicas fueron presentados con anterioridad en el tercer informe parcial de avance, por lo que en este informe se presentan los resultados consolidados de las simulaciones que se mencionaron estaban en proceso de ejecución en dicho informe.

9.1. Módulo Mecánico

Como se mencionó con anterioridad, el modelo desarrollado se implementó numéricamente empleando la técnica de diferencias finitas. En esta técnica, el sistema—en este caso la estructura del pavimento—es dividido o discretizado en nodos. Estos nodos toman valores representativos de los diferentes fenómenos simulados al interior del pavimento (i.e., mecánicos o de respuesta del pavimento ante la aplicación de carga o físicos o de respuesta del pavimento ante la difusión de temperatura, agua u otro elemento), los cuales se transmiten al interior de la estructura empleando una discretización en espacio y tiempo de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento del sistema.

Naturalmente, las ecuaciones mecánicas que regulan el comportamiento del pavimento varían según las características particulares de cada nodo. Cuando el nodo tiene desplazamientos o esfuerzos impuestos, no hace uso de ninguna ecuación y toma los valores de entrada dados por el usuario (i.e., condiciones de frontera y/o condiciones de sollicitación). En caso contrario, i.e., cuando es un nodo interno, el modelo hace uso de las ecuaciones generales de comportamiento, descritas más adelante en esta sección. En el caso en el que el nodo se encuentra localizado en la frontera del modelo geométrico, el programa usa diferentes ecuaciones denominadas de *frontera rígida* o de *frontera absorbente*, respectivamente. La escogencia del tipo de ecuación en este caso depende de la decisión de considerar las fronteras del modelo como rígidas (permiten la reflexión de ondas) o absorbentes (absorben las ondas que llegan a la frontera). Adicionalmente, el modelo tiene en cuenta que los nodos superficiales no deben tener rigidez en el sentido perpendicular a la superficie, ya que la atmosfera no genera esfuerzos contrarios a su movimiento. Por esta razón, tampoco tienen esfuerzos contantes en la dirección del sentido de la gravedad. Por lo tanto, el modelo impone un valor de cero a los esfuerzos normales en la dirección vertical o “y” para todos aquellos nodos ubicados en la superficie de la estructura.

9.1.1. Ecuaciones básicas de comportamiento

El modelo numérico evalúa la situación mecánica de un modelo empleando ecuaciones elasto-dinámicas de comportamiento. Estas ecuaciones son derivadas de las leyes de conservación de momento durante el tiempo. Por esta razón, cada nodo debe satisfacer la Ecuación 1, donde ρ es la densidad del material, u_i el desplazamiento en una de las direcciones de estudio, t el tiempo, τ_{ij} los esfuerzos tanto axiales como cortantes, x el diferencial de longitud y f_i la cantidad de momento que se pierde.

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (1)$$

Por su parte, la ley generalizada de Hooke establece una relación elástica entre los esfuerzos y deformaciones al interior del material, mostrada en la Ecuación 2:

$$\tau_{i,j} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2)$$

donde τ_{ij} representa la componente i, j del tensor general de esfuerzos, ε_{kl} representa las componentes del tensor de deformaciones unitarias y C_{ijkl} representa las componentes de la matriz de rigidez para un modelo elástico lineal.

Debido a que el modelo trabaja en función de desplazamientos y no de deformaciones, las deformaciones de cada nodo se reemplazan por sus valores de desplazamiento mediante la Ecuación 3, aunque en la evaluación de resultados las deformaciones se vuelven a obtener:

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{(u_{i,j} + u_{j,i})}{2} \quad (3)$$

En su forma más general, la matriz simétrica elástica de rigidez se describe mediante la Ecuación 4:

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ & & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ & & & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ & & & & c_{55} & c_{56} \\ & & & & & c_{66} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Sin embargo, el modelo desarrollado supone que los materiales poseen características *otorrómbicas*. Esto permite realizar una simplificación a la matriz anterior la cual se muestra en la Ecuación 5. Con dicha simplificación, la matriz de rigidez cuenta con nueve parámetros no nulos (Tristancho et al., 2010):

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{44} & 0 & 0 \\ & & & & c_{55} & 0 \\ & & & & & c_{66} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Cada constante de esta matriz depende de los parámetros de elasticidad del material que son el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν). La matriz inversa de C en términos de las constantes de elasticidad se puede expresar como se muestra en la Ecuación 6:

$$C^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_y} & -\frac{\nu_{xz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{zx}} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G_{xy}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{yz}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

en donde los valores de E y G representan los módulos axial y cortante, respectivamente y ν la relación de Poisson.

En resumen, los parámetros de entrada que requiere el modelo son las nueve constantes de la matriz elástica de rigidez mostradas en la Ecuación 5. Estos valores son empleados en las Ecuaciones 1, 2, y 3 para calcular los esfuerzos a los que está sometido el material dada una condición conocida de desplazamientos. Los algoritmos de programación se discutirán posteriormente.

Como se mencionó con anterioridad, las ecuaciones diferenciales del comportamiento fueron implementadas numéricamente empleando la técnica de diferencias finitas. Así, la ecuación básica de comportamiento (Ecuación 1) se transforma en la Ecuación 7 para el caso de análisis con base en desplazamientos en la dirección horizontal o "x" (cuyos desplazamiento asociados se denominan "u").

$$\rho_{l,m,n} \frac{u^{t+1}_{l,m,n} - 2u^t_{l,m,n} + u^{t-1}_{l,m,n}}{\Delta t^2} = \frac{\tau_{xx}^t_{l,m,n} - \tau_{xx}^t_{l-1,m,n}}{\Delta x} + \frac{\tau_{xy}^t_{l,m+1,n} - \tau_{xy}^t_{l,m,n}}{\Delta y} + \frac{\tau_{xz}^t_{l,m,n+1} - \tau_{xz}^t_{l,m,n}}{\Delta z} + f_{x_{l,m,n}} \quad (7)$$

La ecuación equivalente para la dirección “y” (cuyos desplazamientos asociados se denominan “v”) es la Ecuación 8:

$$\rho_{l,m,n} \frac{v^{t+1}_{l,m,n} - 2v^t_{l,m,n} + v^{t-1}_{l,m,n}}{\Delta t^2} = \frac{\tau_{xy}^t_{l+1,m,n} - \tau_{xy}^t_{l,m,n}}{\Delta x} + \frac{\tau_{yy}^t_{l,m,n} - \tau_{yy}^t_{l,m-1,n}}{\Delta y} + \frac{\tau_{yz}^t_{l,m,n+1} - \tau_{yz}^t_{l,m,n}}{\Delta z} + f_{y,l,m,n} \quad (8)$$

Finalmente, la ecuación elasto-dinámica evaluada en la dirección “z” (cuyos desplazamientos asociados se denominan “w”) es la Ecuación 9:

$$\rho_{l,m,n} \frac{w^{t+1}_{l,m,n} - 2w^t_{l,m,n} + w^{t-1}_{l,m,n}}{\Delta t^2} = \frac{\tau_{xz}^t_{l+1,m,n} - \tau_{xz}^t_{l,m,n}}{\Delta x} + \frac{\tau_{yz}^t_{l,m+1,n} - \tau_{yz}^t_{l,m,n}}{\Delta y} + \frac{\tau_{zz}^t_{l,m,n} - \tau_{zz}^t_{l,m,n-1}}{\Delta z} + f_{z,l,m,n} \quad (9)$$

De estas ecuaciones se despeja la componente de desplazamiento en el paso de tiempo siguiente al evaluado ($t+1$) con el fin de dar continuidad al proceso mecánico que se busca simular.

De igual manera se hace una aproximación por diferencias finitas para la ley de Hooke mostrada en la Ecuación 2. Para el caso de un material isotrópico, la matriz de elasticidad mostrada en la Ecuación 6, pero en función de las constantes de Lamé (λ y μ), se muestra en la Ecuación 10.

$$\begin{aligned} \tau_{xx}^t_{l,m,n} &= (\lambda_{l,m,n} + 2\mu_{l,m,n}) \frac{u^t_{l+1,m,n} - u^t_{l,m,n}}{\Delta x} + \lambda_{l,m,n} \left(\frac{v^t_{l,m+1,n} - v^t_{l,m,n}}{\Delta y} + \frac{w^t_{l,m,n+1} - w^t_{l,m,n}}{\Delta z} \right) \\ \tau_{yy}^t_{l,m,n} &= (\lambda_{l,m,n} + 2\mu_{l,m,n}) \frac{v^t_{l,m+1,n} - v^t_{l,m,n}}{\Delta y} + \lambda_{l,m,n} \left(\frac{u^t_{l+1,m,n} - u^t_{l,m,n}}{\Delta x} + \frac{w^t_{l,m,n+1} - w^t_{l,m,n}}{\Delta z} \right) \\ \tau_{zz}^t_{l,m,n} &= (\lambda_{l,m,n} + 2\mu_{l,m,n}) \frac{w^t_{l,m,n+1} - w^t_{l,m,n}}{\Delta z} + \lambda_{l,m,n} \left(\frac{u^t_{l+1,m,n} - u^t_{l,m,n}}{\Delta x} + \frac{v^t_{l,m+1,n} - v^t_{l,m,n}}{\Delta y} \right) \\ \tau_{xy}^t_{l,m,n} &= \tau_{yx}^t_{l,m,n} = \mu_{l,m,n} \left(\frac{u^t_{l,m,n} - u^t_{l,m-1,n}}{\Delta y} + \frac{v^t_{l,m,n} - v^t_{l-1,m,n}}{\Delta x} \right) \\ \tau_{yz}^t_{l,m,n} &= \tau_{zy}^t_{l,m,n} = \mu_{l,m,n} \left(\frac{v^t_{l,m,n} - v^t_{l,m,n-1}}{\Delta z} + \frac{w^t_{l,m,n} - w^t_{l,m-1,n}}{\Delta y} \right) \\ \tau_{xz}^t_{l,m,n} &= \tau_{zx}^t_{l,m,n} = \mu_{l,m,n} \left(\frac{w^t_{l,m,n} - w^t_{l-1,m,n}}{\Delta x} + \frac{u^t_{l,m,n} - u^t_{l,m,n-1}}{\Delta z} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

9.1.2. Ecuaciones de Frontera

El modelo está en capacidad de considerar dos tipos diferentes de frontera: rígida o absorbente. En cualquiera de los dos casos, los nodos superficiales no tienen rigidez en el sentido perpendicular a la superficie, ya que la atmosfera no les genera esfuerzos contrarios a su movimiento. Por esta misma razón, estos nodos tampoco tienen esfuerzos cortantes en la dirección del sentido de la gravedad. Por lo tanto, éstos son simulados imponiendo los esfuerzos en “y”, tanto el axial como los cortantes, en cero para que los nodos superficiales carezcan de rigidez en el sentido de la gravedad.

En el caso de una frontera no superficial de tipo rígida, el programa crea unos nodos que rempazan a los faltantes del nodo frontera. Estos nodos *ficticios*, toman los mismos valores de desplazamiento que su nodo origen cuando el caso es una frontera rígida. Al realizar este supuesto el modelo de forma aproximada refleja la onda que llega a la frontera.

En el caso de una frontera no superficial de tipo absorbente, los nodos ficticios toman valores de desplazamiento que logran absorber la onda que llega a estas regiones. Para garantizar esta condición, el desplazamiento de los nodos ficticios satisfacen determinados sistemas de ecuaciones. Esto garantiza que la frontera sea absorbente en todos los sentidos (Ohminato & Bernard, 1997).

Para el caso de una frontera en la dirección “x” el sistema de ecuaciones a satisfacer es presentado como Ecuación 12.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \\ \frac{1}{\beta} \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial v}{\partial x} &= 0 \\ \frac{1}{\beta} \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\partial w}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

donde “ α ” y “ β ” son variables dependientes de las propiedades elásticas del material. Específicamente, “ α ” y “ β ” están definidas en función de las constantes elásticas de lame μ y λ como se muestra en la Ecuación 13:

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{\frac{\lambda+2\cdot\mu}{\rho}} \\ \beta &= \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \end{aligned} \quad (13)$$

La aproximación por diferencias finitas del sistema de ecuaciones presentado en la Ecuación 14 resulta en el siguiente conjunto de ecuaciones para la dirección horizontal (“x” con desplazamiento “u”):

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha} \frac{u_{0,m,n}^t - u_{0,m,n}^{t-1}}{\Delta t} - \frac{u_{l,m,n}^t - u_{-l,m,n}^t}{2\Delta x} &= 0 \\ \frac{1}{\beta} \frac{v_{0,m,n}^t - v_{0,m,n}^{t-1}}{\Delta t} - \frac{v_{l,m,n}^t - v_{-l,m,n}^t}{\Delta x} &= 0 \\ \frac{1}{\beta} \frac{w_{0,m,n}^t - w_{0,m,n}^{t-1}}{\Delta t} - \frac{w_{l,m,n}^t - w_{-l,m,n}^t}{\Delta x} &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

En estas ecuaciones el subíndice “o” hace referencia al nodo origen (i.e., nodo se encuentra en la frontera). El subíndice “l” se refiere al vecino real del nodo origen que está siempre en la dirección opuesta a la frontera. El sub índice “-l” se refiere a un nodo ficticio que es vecino al de origen y que está presente en la dirección de la frontera. Es importante notar que en este caso que las fórmulas son en la dirección “x”, por lo que solo hay componentes “l” y “-l”.

Usando la misma nomenclatura pero para el caso de dirección en “y”, el correspondiente sistema de ecuaciones es:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\beta} \frac{u_{l,o,n}^t - u_{l,o,n}^{t-1}}{\Delta t} - \frac{u_{l,o,n}^t - u_{l,-m,n}^t}{\Delta y} &= 0 \\ \frac{1}{\alpha} \frac{v_{l,o,n}^t - v_{l,o,n}^{t-1}}{\Delta t} - \frac{v_{l,m,n}^t - v_{l,-m,n}^t}{2\Delta y} &= 0 \\ \frac{1}{\beta} \frac{w_{l,o,n}^t - w_{l,o,n}^{t-1}}{\Delta t} - \frac{w_{l,o,n}^t - w_{l,-m,n}^t}{\Delta y} &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Finalmente, en la dirección “z” el sistema de ecuaciones correspondientes es:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\beta} \frac{u_{l,m,o}^t - u_{l,m,o}^{t-1}}{\Delta t} - \frac{u_{l,m,o}^t - u_{l,m,-n}^t}{\Delta z} &= 0 \\ \frac{1}{\beta} \frac{v_{l,m,o}^t - v_{l,m,o}^{t-1}}{\Delta t} - \frac{v_{l,m,o}^t - v_{l,m,-n}^t}{\Delta z} &= 0 \\ \frac{1}{\alpha} \frac{w_{l,m,o}^t - w_{l,m,o}^{t-1}}{\Delta t} - \frac{w_{l,m,n}^t - w_{l,m,-n}^t}{2\Delta z} &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

9.1.3. Condiciones de anisotropía

El modelo desarrollado emplea los ángulos de anisotropía del material y los coeficientes elásticos para calcular una matriz de elasticidad equivalente que puede ser empleada en la Ecuación 2. El modelo está en capacidad de incorporar anisotropía mediante la asignación de diferentes parámetros de elasticidad para cada una de las direcciones, los cuales son almacenados en una matriz especial. Para fabricar esta matriz se parte de los ángulos de anisotropía “ γ ”, “ β ” y “ α ”. Con estos ángulos se fabrican tres matrices, denominadas T_1 , T_2 y T_3 :

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & 0 & \text{sen}(\gamma) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\gamma) & 0 & \cos(\gamma) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\gamma) & 0 & \text{sen}(\gamma) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen}(\gamma) & 0 & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \text{sen}(\beta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\beta) & \cos(\beta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\beta) & \text{sen}(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen}(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \text{sen}(\alpha) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\alpha) & 0 & \text{sen}(\alpha) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen}(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (19)$$

Con estas matrices se determina la matriz anisotrópica “ C ” (Ecuación 2), la cual se obtiene del producto punto de las matrices mostradas en la siguiente ecuación, siendo “ C_0 ” la matriz original mostrada en la Ecuación 5.

$$C = [T_3]^T \cdot [T_2]^T \cdot [T_1]^T \cdot [Co] \cdot [T_1] \cdot [T_2] \cdot [T_3] \quad (20)$$

La matriz “C” calculada en el modelo y que se emplea para resolver la ecuación de conservación de momentos (Ecuación 2), es una matriz de elasticidad que contempla la anisotropía del material si se desea.

9.1.4. Consideraciones de convergencia del sistema

Para garantizar la convergencia en el modelo se emplea un diferencial de tiempo menor a (Ohminato and Bernard, 1977):

$$\Delta t = \frac{\Delta h}{\sqrt{3} \cdot V_p} \quad (21)$$

donde “ Δh ” es el menor diferencial de longitud de los nodos, y “ V_p ” es la velocidad de propagación más rápida de la señal, que en caso de suelos corresponde a la velocidad de la onda P.

9.1.5. Algoritmos de solución del módulo mecánico

El modelo fue implementado en el lenguaje de programación Fortran. El programa desarrollado divide sus funciones en varios módulos, los cuales a su vez se dividen en varias subrutinas. De manera muy general, el programa contiene siete módulos, los cuales solucionan diversos problemas asociados con los materiales que conforman la estructura del pavimento. Para el alcance de este informe, solo se presenta el módulo mecánico, el módulo térmico, y el módulo atmosférico. Aunque los últimos dos se explicarán en la Sección 9.2. cuando se aborde el modelo térmico. El módulo mecánico se divide en cuatro subrutinas, las cuales son: MECTRANS, NONLINMEC, RESOMECEC, y MEDIAELAST, las cuales se describen en las siguientes subsecciones.

- **Subrutina MECTRANS**

Esta es la subrutina global del programa que realiza internamente llamados a las otras subrutinas. Su función consiste en llamar a la subrutina RESOMECEC y actualizar los datos obtenidos de ésta con el objetivo de resolver las ecuaciones elasto-dinámicas del sistema (**nota:** el algoritmo del modelo almacena los valores de desplazamiento obtenidos en los últimos dos ciclos de cada paso para resolver dichas ecuaciones). La Figura 9.2 presenta el diagrama de flujo de esta subrutina.

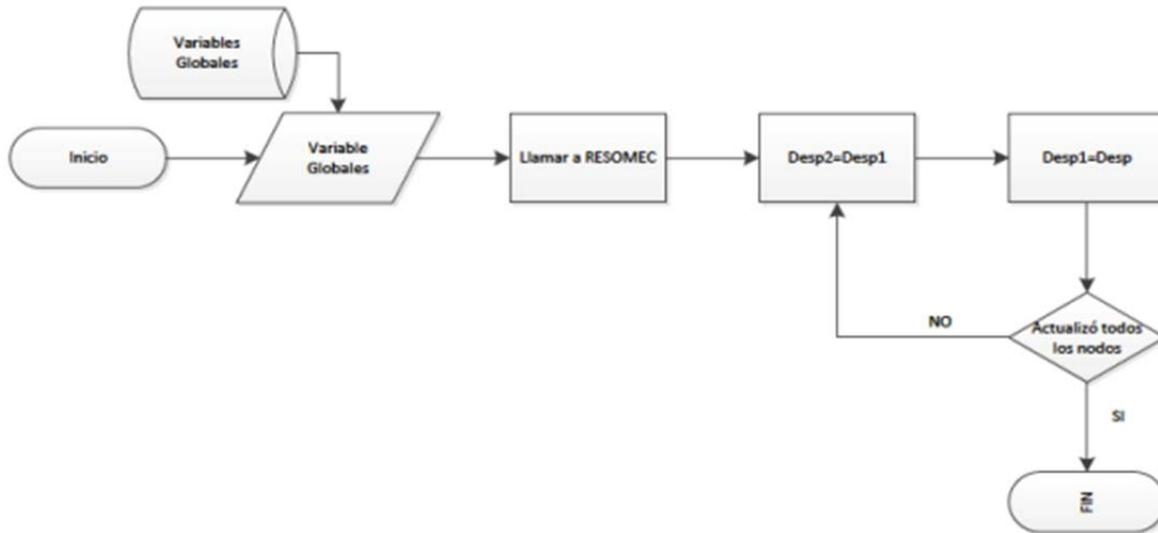


Figura 9.2. Diagrama de flujo de la subrutina MECTRANS.

- **Subrutina NONLINMEC**

El objetivo principal de esta subrutina es calcular la matriz de elasticidad presentada en la Ecuación 20. Para esto, la subrutina crea inicialmente un ciclo que le permita recorrer el modelo geométrico nodo por nodo real. En el proceso, el programa crea las matrices de anisotropía a partir de las Ecuaciones 17, 18 y 19. Posteriormente, determina las matrices traspuestas de las anteriores matrices y finalmente emplea Ecuación 20 para determinar la nueva matriz de elasticidad del nodo. Al finalizar el proceso la subrutina almacena estas matrices para cada uno de los nodos. La Figura 9.3 se muestra un diagrama de los algoritmos usados por esta subrutina.

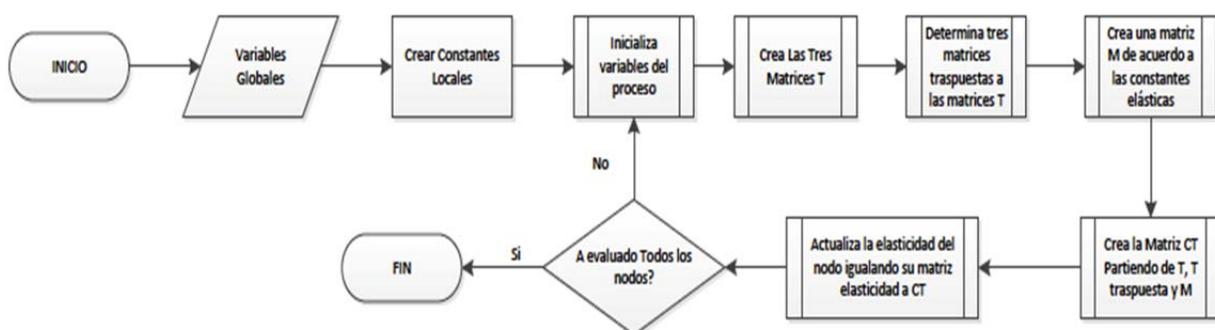


Figura 9.3. Diagrama de flujo de la subrutina NONLIMEC.

- **Subrutina MEDIAELAST**

Esta subrutina es llamada por la subrutina RESOMEK para calcular la matriz de elasticidad usada en la ley de Hooke (Ecuación 2). Una vez se llama, la subrutina recibe la siguiente información: 1) el número de nodos reales, 2) los coeficientes de elasticidad del nodo que se está evaluando, 3) los coeficientes de elasticidad de los vecinos, y 4) los números con que se identifican los nodos vecinos al evaluado y los números que identifican al nodo evaluado. Con esta información, esta subrutina retorna el promedio simple de los valores de elasticidad enviados, excluyendo los nodos ficticios que no cuentan con valores de elasticidad. La Figura 9.4. ilustra de manera general la estructura del algoritmo de esta subrutina.

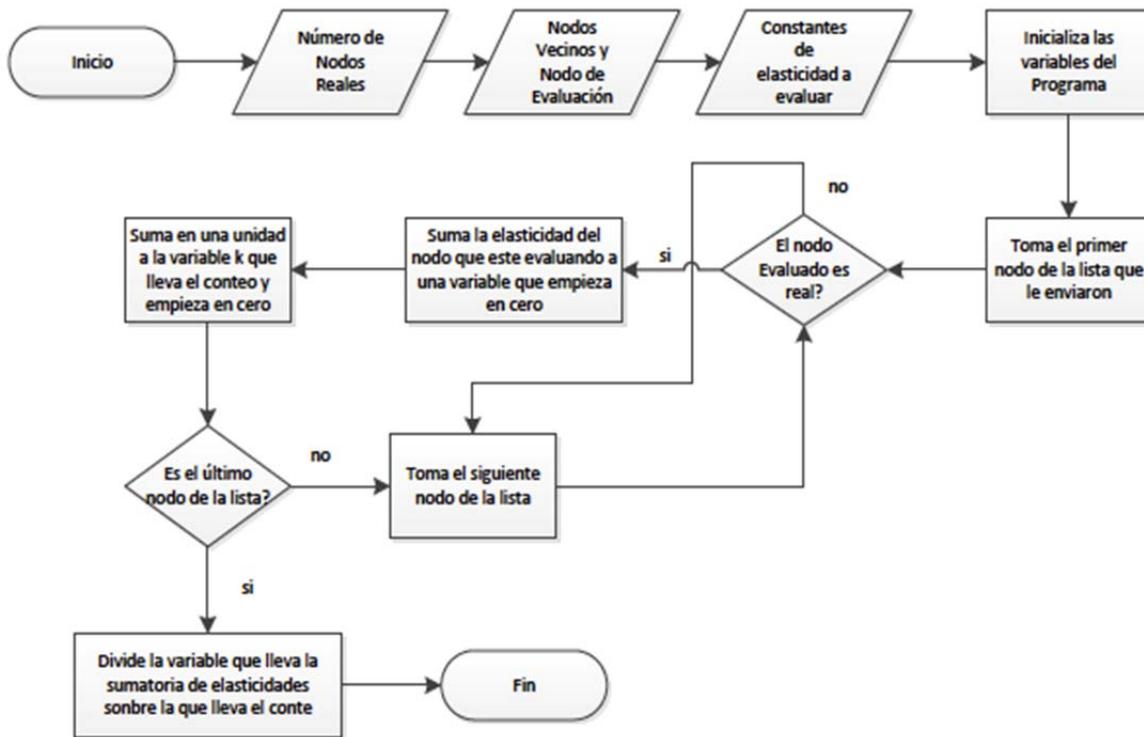


Figura 9.4. Diagrama de flujo de la subrutina MEDIAELAST.

- **Subrutina RESOMEK**

Esta subrutina calcula los nuevos valores de desplazamiento y esfuerzo para cada cambio de tiempo (cada incremento de tiempo). Además esta subrutina garantiza el cumplimiento de las condiciones de frontera establecidas en el modelo, ya sea ésta de tipo absorbente o rígida. Como datos de entrada se encuentran las variables globales del programa, tales como

información de los nodos y el paso de tiempo que está en evaluación, entre otros. Como subrutina complementaria a ésta se encuentra la subrutina MEDIAELAST, la cual se emplea para calcular la matriz de constantes elásticas. La Figura 9.5. presenta un esquema de los algoritmos de esta subrutina.

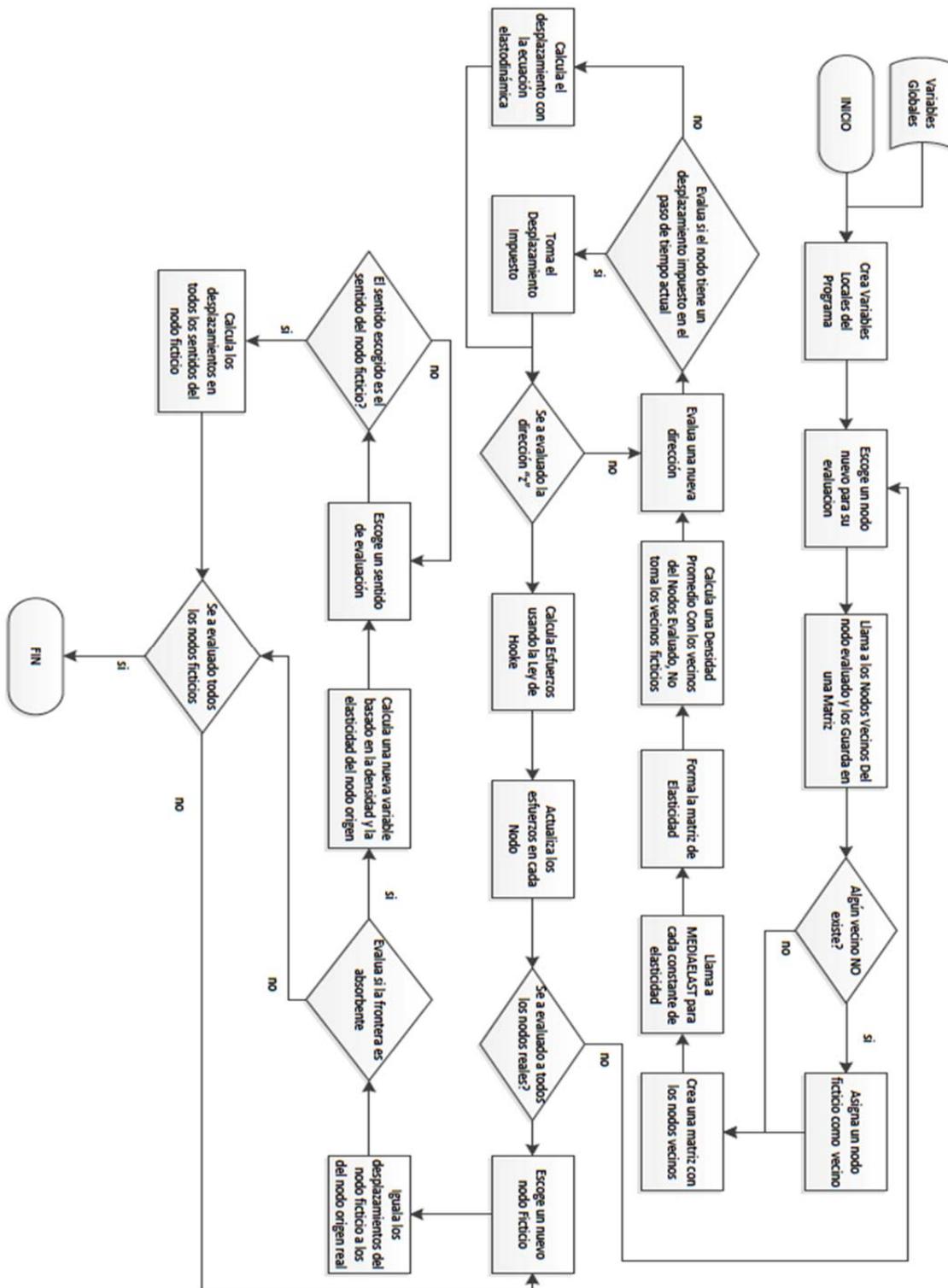


Figura 9.5. Diagrama de flujo de la subrutina RESOMEK.

De acuerdo con el esquema anterior, se puede observar que en la etapa inicial la subrutina calcula los desplazamientos de los nodos. Para esto, emplea los esfuerzos calculados en el ciclo inmediatamente anterior (o los iniciales si es el primer ciclo) y, usando las Ecuaciones 7, 8 o 9, según la dirección evaluada, determina los nuevos desplazamientos. Posteriormente emplea la matriz de constantes elásticas anisotrópicas y la ley de Hooke para calcular los esfuerzos. Por último, la subrutina evalúa si la frontera fue definida como absorbente o rígida. En el caso en que la frontera es rígida, los valores de desplazamiento de los nodos ficticios son iguales que los de su nodo origen. Por el contrario, si es absorbente, según el sentido ajusta las Ecuaciones 17, 18 o 19 y calcula unos nuevos desplazamientos.

9.1.4. Simulaciones con base en el módulo mecánico

Con el objetivo de cumplir las actividades planteadas en este proyecto, el modelo numérico descrito anteriormente fue implementado para ser usado en la modelación del comportamiento de estructuras de pavimento. En las simulaciones se reprodujo la configuración del pavimento flexible ubicado en la Calle 80 con Estación Escuela Militar. A la estructura de pavimento se le aplicó una carga rodante obtenida según los espectros de carga conseguidos en campo y reportados en la Sección 7. Además se modeló independientemente una llanta de cada uno de los tres ejes que tiene un bus de Transmilenio.

Cada modelo numérico se empleó para calcular los desplazamientos y esfuerzos resultantes al interior de la estructura durante el tiempo. En este sentido, se realizaron varios análisis. El primero consistió en obtener los máximos valores de los atributos mencionados durante toda la simulación en 33 puntos diferentes. Estos puntos están ubicados en las interfaces entre las diferentes capas en el pavimento. Debido a la cantidad de información que se genera en cada simulación, en este documento se presentan las tablas que resumen los resultados. El siguiente análisis de datos consistió en graficar dos secciones del pavimento, en donde se muestran los valores de desplazamiento en "y" con una escala de colores, debido a que es el atributo más significativo para mostrar la propagación de las ondas. Por último, para los 33 puntos mencionados, se presentan las tablas de máximos y mínimos esfuerzos y/o deformaciones que se alcanzaron a lo largo de la simulación. Para el análisis se consideraron únicamente los valores de los esfuerzos y desplazamientos axiales (los cuales incluyen los esfuerzos horizontales o de tensión, que generan fatiga en las capas con materiales cementados, y los esfuerzos verticales, asociados con el desarrollo de ahuellamiento en capas con materiales no tratados).

En cuanto a los detalles de la geometría, la estructura de pavimento fueron modeladas como una pista de 11.0 m de largo, 3.5 m de ancho y 2.0 m profundidad. Estas dimensiones coinciden con la pista de pruebas del laboratorio de la Universidad de los Andes. En la Figura 9.6. se muestra la aplicación momentánea de la carga en la superficie el modelo discretizado.

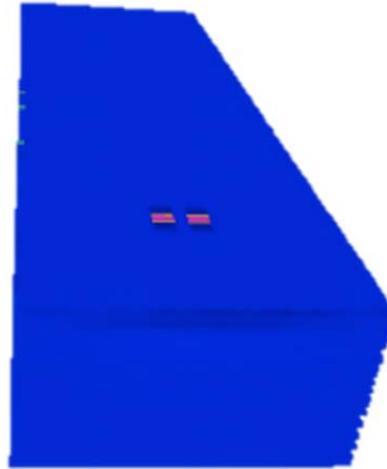


Figura 9.6. Pista con la aplicación de medio eje simple (llantas duales).

La estructura de pavimento cuenta con seis capas, simulando el pavimento del punto de instrumentación de la Calle 80. El orden de estas capas se resume en la Tabla 9.4. La sexta capa corresponde al suelo natural de subrasante y se localiza después de la quinta capa hasta completar los dos metros de profundidad.

Tabla 9.1. Estructura de Pavimento (Calle 80 con Estación Escuela Militar).

Capa No.	Tipo de capa	Material	Espesor (cm)
1	Rodadura	MD-12 Asfalto modificado tipo III	9.0
2	Intermedia	MAM-20 Asfalto modificado tipo V	12.0
3	Intermedia	MD-20 convencional	8.0
4	Base	Material granular estabilizado con asfalto (MGEA)	25.0
5	Material remanente	Granular remanente	55.0

Como una simplificación aceptable para los propósitos de este trabajo, se consideró que los materiales del pavimento y el suelo están en su rango elástico; de este modo las propiedades empleadas para cada capa se listan en la Tabla 9.2.

Tabla 9.2. Constantes de Elasticidad de las capas de Pavimento.

	E (MPa)	v
MD-12 Asfalto modificado tipo III	4000	0.35
MAM-20 Asfalto modificado tipo V	10000	0.35
MD-20 convencional	6000	0.35
Material granular estabilizado con asfalto (MGEA)	2000	0.35
Granular remanente	300	0.35
Suelo Natural de Sub rasante	30	0.35

El mallado para la discretización de la estructura se realizó considerando la geometría general del modelo. Los valores de las diferencias Δx y Δz se definieron de 5.0 cm en los dos casos. En general, se tomaron diferenciales Δy más bajos en la superficie ya que en esta zona se requiere una mayor precisión. Para garantizar la convergencia del programa se definió un diferencial de tiempo (Δt) igual al 2.0 μs . El tiempo total de simulación es de un segundo, en el cual las llantas hacen todo su trayecto sobre la superficie de la pista. Este tiempo incluye además un tiempo posterior que permite la consolidación del suelo después de la aplicación de la carga. Para tener un alto grado de precisión se capturaron e imprimieron datos cada milisegundo. En la Figura 9.7 se muestran visualmente los datos de desplazamiento en “y” en un instante a modo de ejemplo.

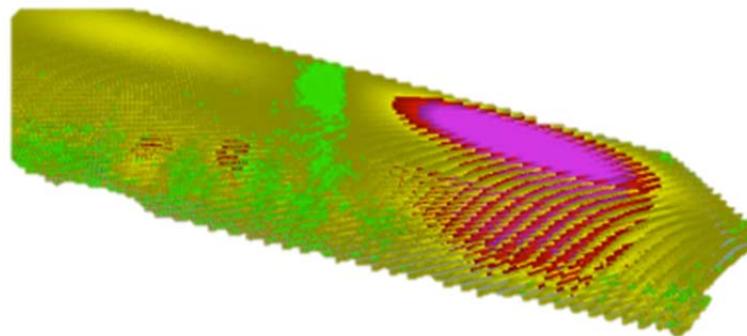


Figura 9.7. Desplazamiento en “y” para los 700 milisegundos.

En las modelaciones se simuló el paso de medio eje. Cada uno de estos medio eje corresponde a los tres ejes de un bus típico uniarticulado de Transmilenio. Por lo tanto, para el caso del eje delantero, se modela el paso de una llanta (ya que ese eje es de tipo simple con llanta simple).

Para los ejes central y trasero se modelan dos llantas, correspondientes a la mitad de un eje simple con llantas duales.

A continuación se describe la metodología de análisis.

- **Metodología de Evaluación**

El modelo arroja un gran número de datos por lo cual es de gran importancia organizar la información de una manera práctica que facilite su interpretación y permita darle utilidad. En general se realizaron dos tipos de análisis. Uno consiste en las secciones del pavimento en el cual se puede ver la distribución de ciertos atributos correspondientes a su respuesta mecánica (esfuerzos y deformaciones) a lo largo de la sección evaluada. El segundo provee un análisis más preciso y en éste se toman varios nodos de importancia y se analiza la magnitud de su respuesta mecánica con el tiempo. Los dos tipos de análisis se explican con mayor detalle posteriormente.

Para cada modelo analizado se tomaron dos secciones de análisis diferentes. Una corresponde al corte longitudinal (en la dirección de la carga) que pasaría por la mitad del ancho de la pista; esta sección es llamada en este trabajo **sección longitudinal o central**. La segunda sección corresponde a la que pasa transversalmente por la mitad de la pista; esta sección es llamada **sección transversal**. Las dos secciones son usadas para mostrar la variación del desplazamiento en la dirección y' con la profundidad en dos sentidos cuando la llanta está justo en la mitad de la pista, lo cual ocurre a los 0.45 segundos de la simulación.

Para una mayor precisión se realizó un análisis gráfico en 33 puntos diferentes. Estos nodos están ubicados en las seis interfaces que existen entre las diferentes capas, por lo que cada división tiene seis nodos de evaluación en profundidad y tres nodos de interés a nivel horizontal o en el plano. Para cada intersección se ubicaron los tres nodos en el último plano de la capa que finaliza, y tres en el primer plano de la capa que empieza. En cada plano los tres nodos están en el centro a lo largo de la pista. El primero se ubica justo debajo de la llanta que corresponde a los *nodos A*, otro está en el borde interno de la llanta que corresponde a los *nodos B*, y el tercero está en el centro del ancho de la pista que corresponden a los *nodos C*. En la Figura 9.8 se muestra un bosquejo de la posición de los tres nodos desde una sección transversal, siendo la posición de los *nodos C* el centro de la vía.

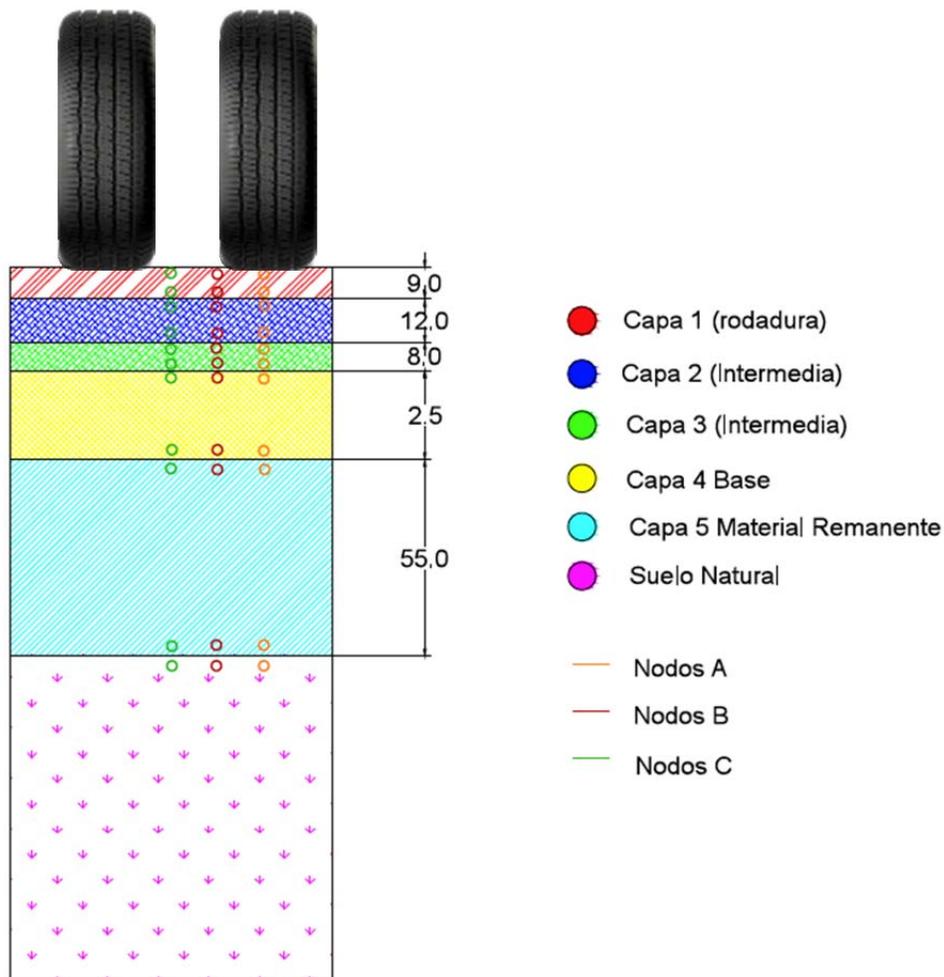
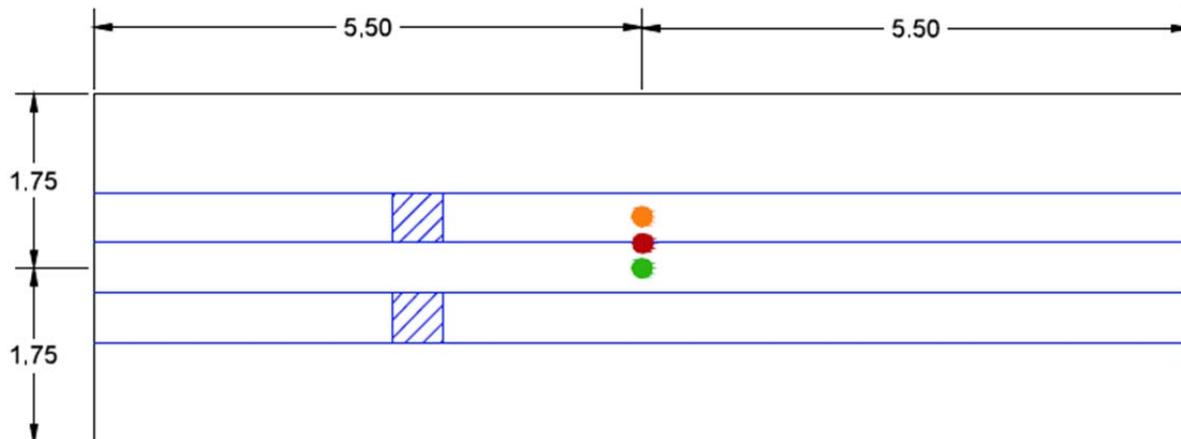


Figura 9.8. Posición de los nodos A, B, y C en la sección transversal del pavimento (centímetros)

En la figura anterior, la primer fila de nodos de arriba hacia abajo corresponde a la interface Superficial, la segunda fila a la interface 1-2 (i.e., entre las capas 1 y 2 pero ubicada en la parte inferior de la capa 1), la tercer fila a la interface 2-1 (entre las capas 1 y 2 pero ubicada en la parte superior de la capa 2), la cuarta fila a la interface 2-3, la quinta fila a la interface 3-2, la sexta fila a la interface 3-4, la séptima fila a la interface 4-3, la octava fila a la interface 4-5, la novena fila a la interface 5-4, la décima fila corresponde a la interface 5-Suelo natural o de subrasante (SN), y por último la décimo primera fila corresponde a la interface Suelo Natural (SN)-5.

La posición de los nodos vistos desde la vista superior del pavimento se muestra en un bosquejo en la Figura 9.9.



- Llantas y trayectoria de las Llantas
- Nodos A
- Nodos B
- Nodos C

Figura 9.9. Vista Perpendicular del pavimento y posición de los nodos (metros)

En el caso de las llantas simples, sólo se toman en consideración los *nodos A*, los cuales en este caso corresponden a la posición del centro de una llanta. Esta decisión se debe a que los máximos esfuerzos y deformaciones estarán ubicados con seguridad en esta ubicación.

- **Determinación de las condiciones de solicitud de carga**

Se realizaron diferentes simulaciones con diferentes señales de entrada con el objetivo de cubrir los valores más comunes del espectro de cargas obtenido por el sistema de instrumentación en campo (reportados en la Sección 7). Para esto se adaptaron ondas de Ricker, cuyas ventajas en el análisis espectral y la convergencia del programa ya han sido comprobadas (Tristancho et al., 2010). La amplitud de la onda fue establecida según la carga a evaluar y su frecuencia. La longitud de la onda, por su parte, se obtuvo con base en el ancho de la llanta. La onda Ricker que el modelo requiere es una onda discretizada que relaciona la presión con el tiempo en cada nodo, a la cual se le asigna la onda. Por lo cual, para obtener la frecuencia, se partió de que la velocidad normal de un Transmilenio en la zona de interés cerca de la estación de la Calle 80 con Escuela Militar es de 40 kilómetros por hora, suponiendo la huella de contacto de la llanta sobre el pavimento como un cuadrado de 20 centímetros de lado. Con estos datos se puede determinar el tiempo en el que existe una presión positiva por parte de la llanta:

$$t = \frac{\text{Largo Llanta}}{\text{Velocidad}} \quad (22)$$

Una vez se ha calculado el tiempo de contacto mediante la ecuación anterior, se ajusta una onda de Ricker con amplitud aleatoria que tenga un rango positivo durante el tiempo establecido, tal como se muestra en la Figura 9.10. Para este caso, se estimó que el tiempo de contacto de la llanta en un mismo nodo es de 0.018 segundos, por lo cual se usa una frecuencia de 35.37 Hz. Con lo que se obtiene la gráfica mostrada.

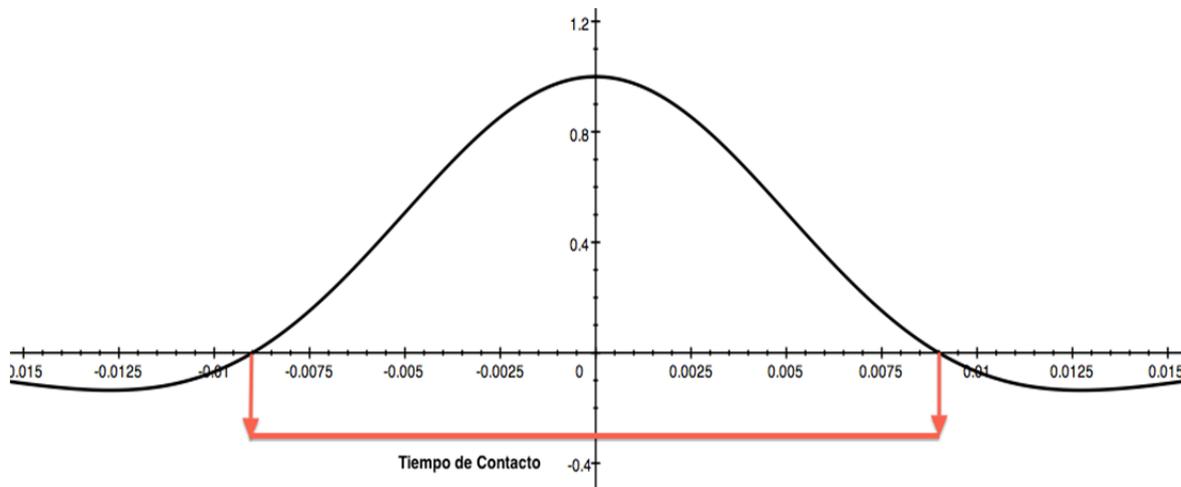


Figura 9.10. Onda de Ricker de presión contra tiempo con longitud de onda ajustada.

La amplitud máxima de la onda se aplica en el momento en el que el centro de la llanta se encuentra localizada encima del nodo y ésta va cambiando de tal forma que el rango positivo corresponda al contacto llanta pavimento. La amplitud de la onda se determina mediante el análisis de la sumatoria de las presiones aplicadas por los diferenciales del área de la carga. Para esto, se requiere transformar la onda de Ricker con el objetivo de relacionar la distancia recorrida contra la presión aplicada. Una vez se establece esta función, se ajusta una onda en la cual se obtenga la carga deseada cuando se realiza la integral de la señal a través del ancho de la llanta. La Figura 9.11 ilustra este procedimiento.

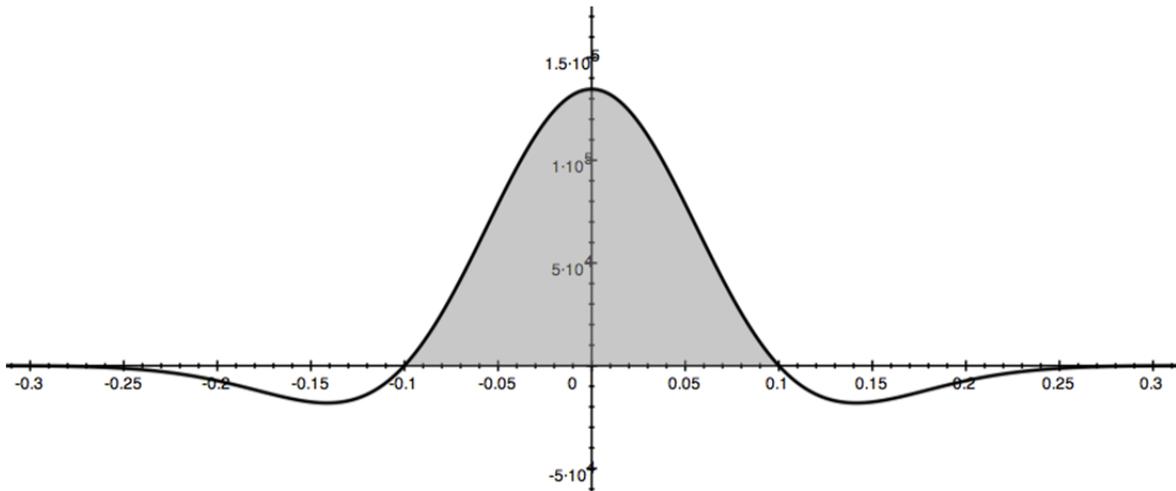


Figura 9.11. Onda de Ricker de presión contra distancia evaluando la carga aplicada.

La onda mostrada en la Figura 9.11 se aplica a cada nodo sobre el cual pasan las llantas pero en diferentes momentos de tiempo, con el objetivo de simular el paso de la llanta sobre la vía. De esta modo la onda se modifica para que la máxima amplitud llegue a cada nodo en un tiempo distinto. En este proceso, se ajusta permanentemente el pico de la onda en el momento en que el centro de la llanta pasa exactamente por encima del nodo. En la Figura 9.12 se muestra un bosquejo de la aplicación de la onda.

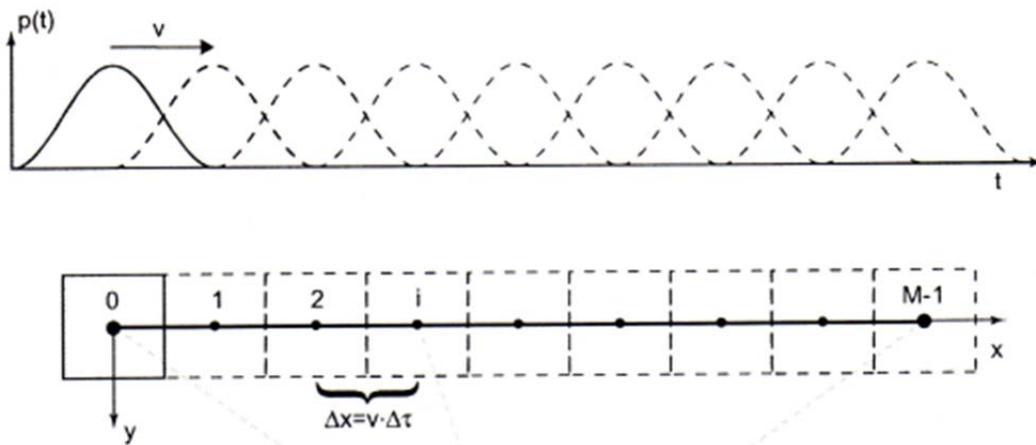


Figura 9.12 Aplicación de la carga a los nodos (Viere and Bode, 2006).

En términos generales, la fórmula que describe la onda de Ricker aplicada en todos los casos de estudio corresponde a la Ecuación 23:

$$P = A \cdot (1 - (Fr \cdot \pi \cdot (t - tc))^2) \cdot e^{-(Fr \cdot \pi \cdot (t - tc))^2} \quad (23)$$

donde “ P ” es la presión que se aplica en un instante de tiempo, “ A ” es la amplitud de la presión, “ F ” es la frecuencia de la onda Ricker, y “ tac ” es el tiempo que se demora el centro de la llanta en llegar justo encima del nodo que se está evaluando.

- **Casos simulados y resultados detallados**

Debido a que la carga es variable según el eje del bus que se esté evaluando, se decidió realizar un total de dos simulaciones diferentes para cada tipo de eje, seleccionando las dos cargas más frecuentes reportadas por las balanzas de carga tipo WIM del punto de instrumentación de la Calle 80. La Tabla 9.3. resume los casos de estudio evaluados.

Tabla 9.3. Total de casos evaluados.

Eje	Carga	
	Carga 1	Carga 2
Eje delantero (direccional) o eje 1	9 ton	10.8 ton
Eje central o eje 2	12.6	14.5
Eje trasero o eje 3	12.0	14.0

En las siguientes subsecciones se presentan las ondas de Ricker introducidas al programa en cada caso según el tipo de eje al que pertenece la carga. Debido a la gran cantidad de información que resulta de cada simulación, se presentan en este documento únicamente los resultados de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones para un caso típico de carga de cada uno de los tres ejes considerados (i.e., un total de tres simulaciones). Estos resultados, como se explicó con anterioridad, consisten en los esfuerzos y deformaciones axiales localizados en las interfaces entre las capas. Los resultados para todos los casos restantes se encuentran consignados en el **Anexo 5** de este documento.

Resultados para el eje delantero o eje 1 con carga de 9 ton

En este caso se parte del espectro de cargas presentado en la Sección 7 de este informe. Con base en este espectro se determinaron como cargas relevantes para hacer los modelos las de 9 y 10.8 Toneladas. Es importante aclarar que los buses de Transmilenio vacíos no se modelan, por lo que no se incluyó la información de la primera barra de los espectros mostrados.

Debido a que este es un eje simple con llanta simple, sólo se toma la mitad de la carga total del eje. Realizando el procedimiento descrito con anterioridad se obtiene la onda mostrada en la Figura 9.13 para el caso de 9 Toneladas. Esta onda tiene una amplitud de 201845 Pa y una frecuencia de 35.37 Hz.

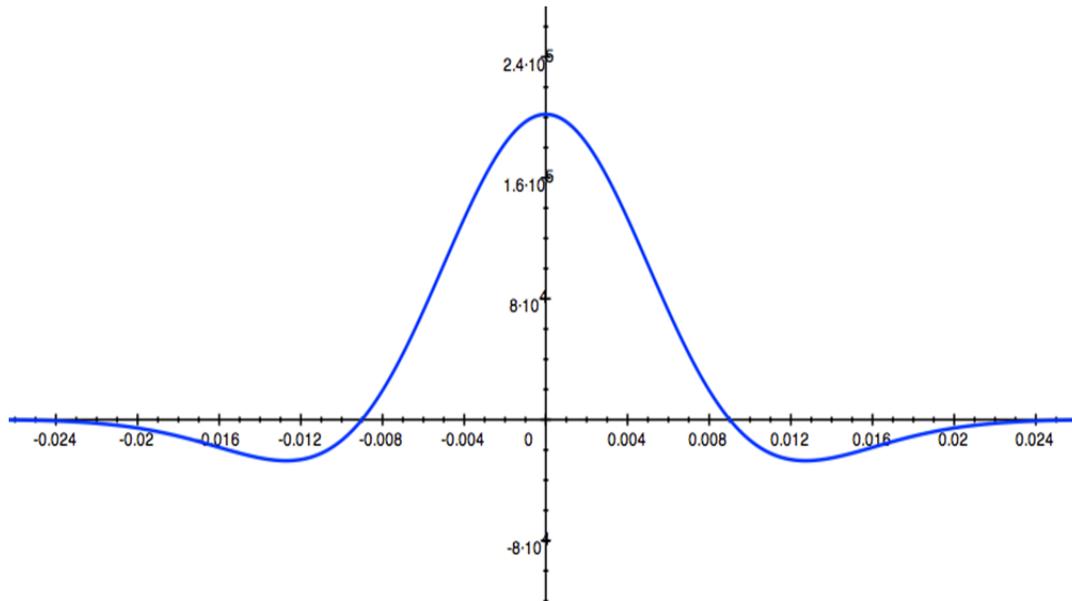


Figura 9.13. Onda Ricker de Presión (Pa) contra Tiempo (s) para 9.0 Ton

Los desplazamientos verticales en "y" obtenidos con la simulación se muestran en la Figura 9.14, en donde se muestra una sección longitudinal que pasa por el centro del ancho total del pavimento. El tiempo de simulación reportado en esta figura corresponde al tiempo en que la llanta pasa por los nodos de evaluación, a los 0.45 segundos.

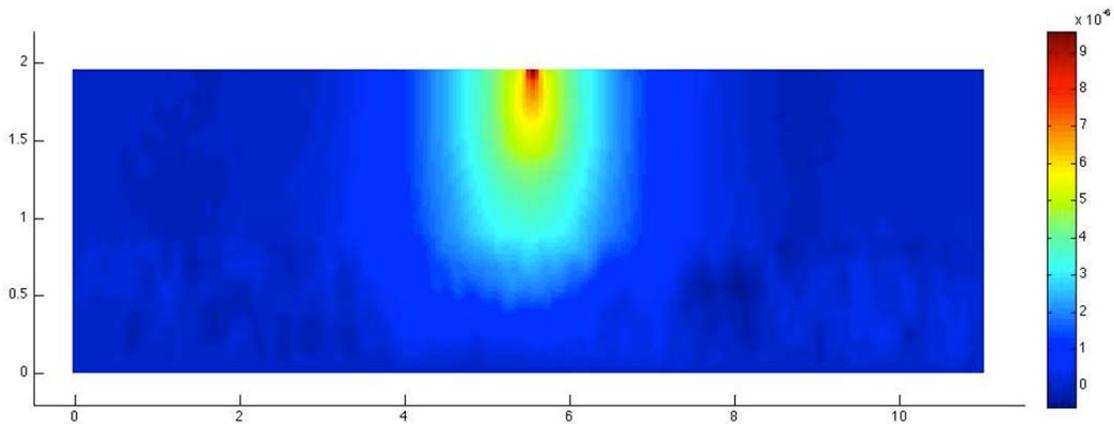


Figura 9.14. Desplazamientos en "y(m)" para el plano central de la pista.

Los resultados equivalentes para la sección transversal se muestran en la Figura 9.15.

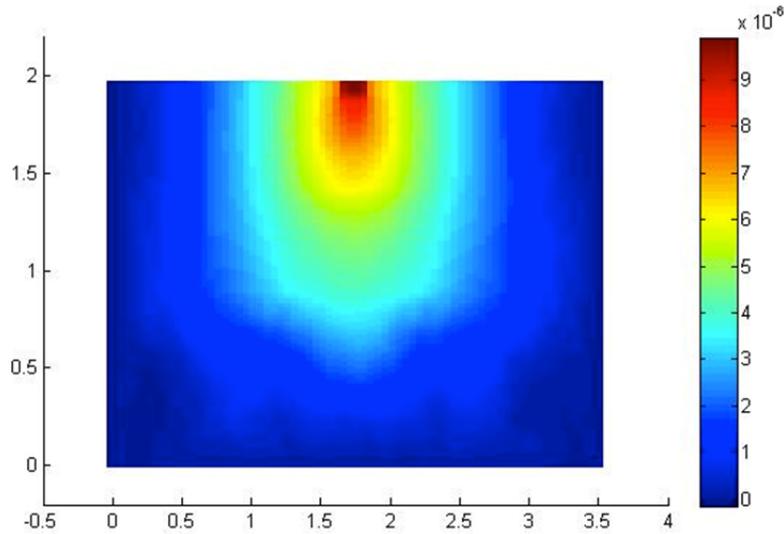


Figura 9.15. Desplazamientos en "y(m)" para la sección transversal de la Pista

Los valores máximos y mínimos de las respuestas mecánicas de los nodos de evaluación en esta simulación se muestran en las Tablas 9.4, 9.5, y 9.6, recordando que en este caso los *Nodos A* corresponden al los ubicados bajo el centro de la llanta simple simulada.

Tabla 9.4. Valores Máximos y Mínimos de deformación durante la simulación.

Nodo	Capa	$\epsilon_x(m/m)$		$\epsilon_y(m/m)$		$\epsilon_z(m/m)$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-4.150.E-06	5.375.E-06	-6.800.E-06	5.025.E-05	-5.725.E-06	6.475.E-06
	Capa 1-2	-4.650.E-07	1.195.E-05	-4.625.E-06	4.100.E-05	-5.825.E-07	1.668.E-05
	Capa 2-1	-3.230.E-07	4.610.E-06	-1.180.E-06	1.310.E-05	-3.090.E-07	5.880.E-06
	Capa 2-3	-1.370.E-06	8.680.E-07	-2.080.E-07	4.950.E-06	-7.670.E-07	2.480.E-07
	Capa 3-2	-2.650.E-06	6.317.E-07	-3.433.E-07	4.833.E-06	-2.033.E-06	2.717.E-07
	Capa 3-4	-3.350.E-06	4.500.E-07	-3.250.E-07	2.833.E-06	-2.967.E-06	2.567.E-07
	Capa 4-3	-3.200.E-06	6.100.E-07	-7.000.E-07	5.850.E-06	-2.690.E-06	4.865.E-07
	Capa 4-5	-3.185.E-06	8.450.E-07	-5.850.E-07	1.265.E-06	-3.465.E-06	6.050.E-07
	Capa 5-4	-3.183.E-06	2.427.E-06	-1.713.E-06	5.233.E-06	-3.633.E-06	1.590.E-06
	Capa 5-SN	-2.980.E-06	1.537.E-06	-1.653.E-06	1.653.E-06	-3.130.E-06	1.257.E-06
Capa SN-5	-4.033.E-06	4.700.E-06	-4.800.E-06	9.167.E-06	-4.033.E-06	4.433.E-06	

Tabla 9.5. Valores Máximos y Mínimos de esfuerzos durante la simulación.

Nodo	Capa	σ_{xx} (Pa)		σ_{yy} (Pa)		σ_{zz} (Pa)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-1.660.E+04	2.150.E+04	-2.720.E+04	2.010.E+05	-2.290.E+04	2.590.E+04
	Capa 1-2	-1.860.E+03	4.780.E+04	-1.850.E+04	1.640.E+05	-2.330.E+03	6.670.E+04
	Capa 2-1	-3.230.E+03	4.610.E+04	-1.180.E+04	1.310.E+05	-3.090.E+03	5.880.E+04
	Capa 2-3	-1.370.E+04	8.680.E+03	-2.080.E+03	4.950.E+04	-7.670.E+03	2.480.E+03
	Capa 3-2	-1.590.E+04	3.790.E+03	-2.060.E+03	2.900.E+04	-1.220.E+04	1.630.E+03
	Capa 3-4	-2.010.E+04	2.700.E+03	-1.950.E+03	1.700.E+04	-1.780.E+04	1.540.E+03
	Capa 4-3	-6.400.E+03	1.220.E+03	-1.400.E+03	1.170.E+04	-5.380.E+03	9.730.E+02
	Capa 4-5	-6.370.E+03	1.690.E+03	-1.170.E+03	2.530.E+03	-6.930.E+03	1.210.E+03
	Capa 5-4	-9.550.E+02	7.280.E+02	-5.140.E+02	1.570.E+03	-1.090.E+03	4.770.E+02
	Capa 5-SN	-8.940.E+02	4.610.E+02	-4.960.E+02	4.960.E+02	-9.390.E+02	3.770.E+02
Capa SN-5	-1.210.E+02	1.410.E+02	-1.440.E+02	2.750.E+02	-1.210.E+02	1.330.E+02	

Tabla 9.6. Valores Máximos y Mínimos de desplazamientos durante la simulación.

Nodo	Capa	desp "x" (m)		desp "y" (m)		desp "z" (m)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-2.330.E-07	2.300.E-07	-3.870.E-07	9.280.E-06	-2.920.E-07	2.990.E-07
	Capa 1-2	-4.520.E-07	4.530.E-07	-3.950.E-07	7.320.E-06	-9.470.E-08	9.300.E-08
	Capa 2-1	-3.540.E-07	3.440.E-07	-3.960.E-07	7.050.E-06	-6.390.E-08	2.180.E-08
	Capa 2-3	-2.280.E-07	2.110.E-07	-3.870.E-07	6.570.E-06	-2.430.E-08	1.070.E-07
	Capa 3-2	-3.240.E-07	3.270.E-07	-3.790.E-07	6.340.E-06	-2.160.E-08	1.490.E-07
	Capa 3-4	-3.690.E-07	3.700.E-07	-3.700.E-07	6.140.E-06	-2.260.E-08	1.540.E-07
	Capa 4-3	-4.890.E-07	4.810.E-07	-3.580.E-07	5.860.E-06	-3.410.E-08	1.940.E-07
	Capa 4-5	-7.140.E-07	7.440.E-07	-3.510.E-07	5.110.E-06	-4.300.E-08	1.530.E-07
	Capa 5-4	-8.780.E-07	8.900.E-07	-3.340.E-07	4.790.E-06	-5.300.E-08	1.940.E-07
	Capa 5-SN	-1.140.E-06	1.180.E-06	-3.680.E-07	3.440.E-06	-8.370.E-08	1.760.E-07
Capa SN-5	-1.350.E-06	1.370.E-06	-5.760.E-07	2.970.E-06	-1.730.E-07	2.540.E-07	

Resultados para el Eje Central o Eje 2 con carga de 12.6 ton

Para este tipo de eje, se seleccionaron los valores de carga de 12.6 y 14.5 toneladas. La onda Ricker para una carga de 12.6 toneladas se presenta en la Figura 9.16. Esta onda tiene una amplitud de 141290 Pa y una frecuencia de 35.37 Hz.

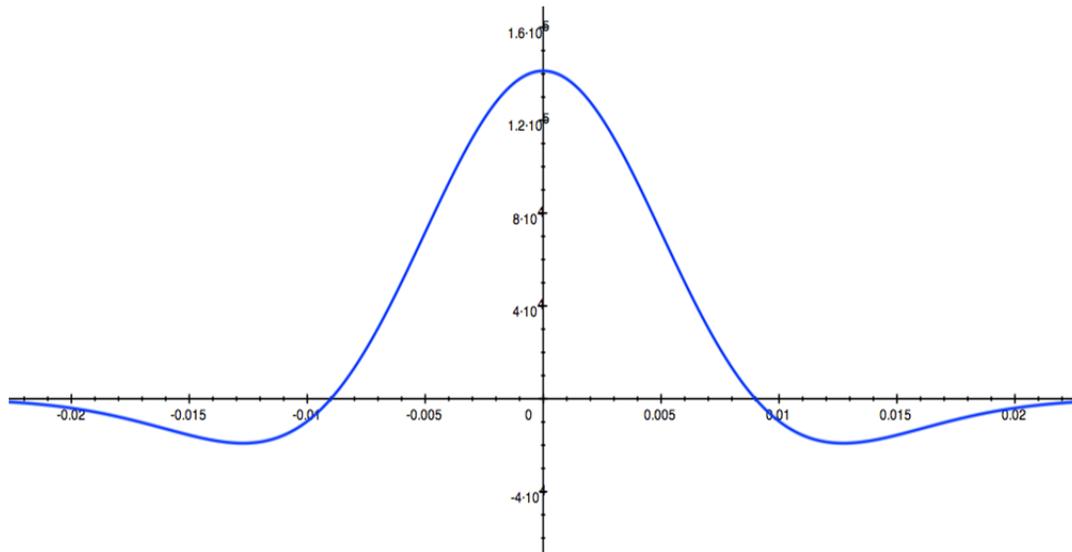


Figura 9.16. Onda Ricker de Presión (Pa) contra Tiempo (s) para 12.6 Toneladas

La Figura 9.17 presenta la sección central o longitudinal del pavimento con los correspondientes valores de desplazamiento verticales en "y" obtenidos de esta simulación, , mientras que la Figura 9.18 presenta estos valores de desplazamiento pero para la sección transversal de la estructura.

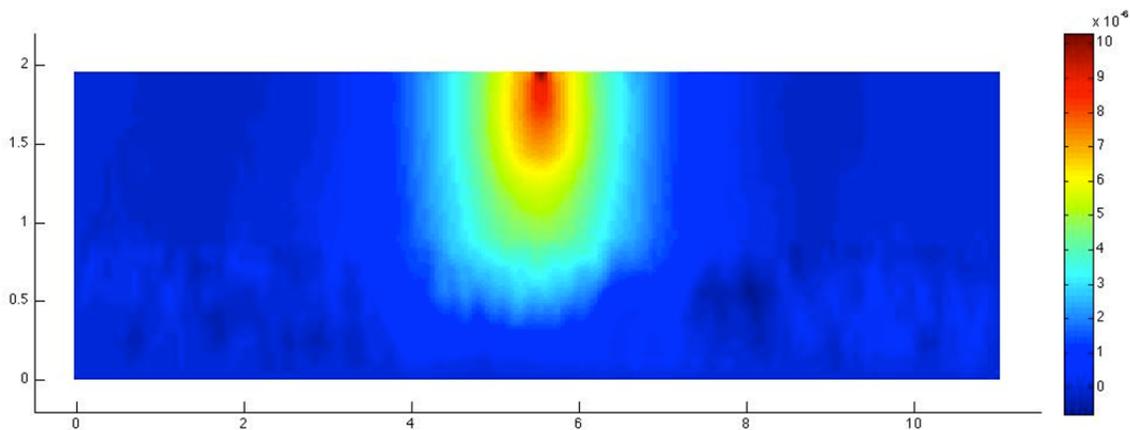


Figura 9.17. Desplazamientos en "y(m)" para el plano central de la pista.

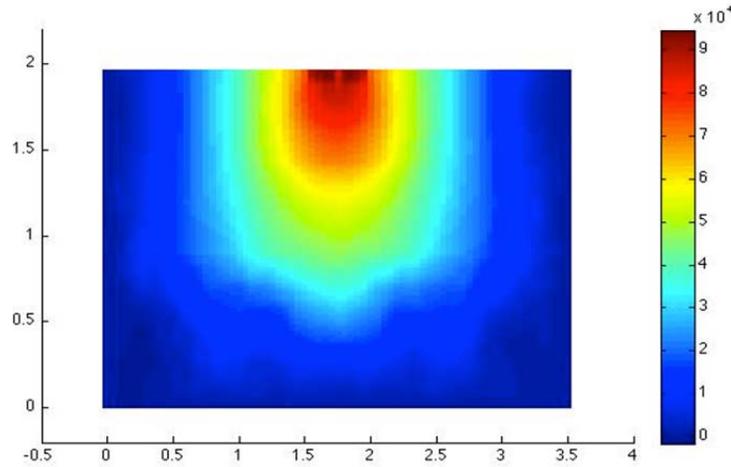


Figura 9.18. Desplazamientos en "y(m)" para la sección transversal de la Pista.

Las Tablas 9.7, 9.8, y 9.9 presentan los valores mínimos y máximos de las respuestas mecánicas evaluadas en el pavimento correspondientes a esta simulación.

Tabla 9.7. Valores Máximos y Mínimos de deformación durante la simulación

Nodo	Capa	$\epsilon_x(m/m)$		$\epsilon_y(m/m)$		$\epsilon_z(m/m)$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-4.825.E-06	5.175.E-06	-4.775.E-06	3.500.E-05	-4.600.E-06	4.625.E-06
	Capa 1-2	-6.250.E-07	9.975.E-06	-3.000.E-06	2.900.E-05	-4.725.E-07	1.360.E-05
	Capa 2-1	-3.530.E-07	4.260.E-06	-8.400.E-07	9.330.E-06	-2.560.E-07	5.410.E-06
	Capa 2-3	-1.190.E-06	8.430.E-07	-2.050.E-07	3.790.E-06	-1.390.E-07	3.020.E-07
	Capa 3-2	-2.583.E-06	5.233.E-07	-4.550.E-07	4.233.E-06	-1.257.E-06	2.417.E-07
	Capa 3-4	-3.533.E-06	4.533.E-07	-3.517.E-07	2.533.E-06	-2.467.E-06	2.333.E-07
	Capa 4-3	-3.450.E-06	7.200.E-07	-7.300.E-07	5.450.E-06	-2.130.E-06	5.250.E-07
	Capa 4-5	-4.080.E-06	8.350.E-07	-5.550.E-07	1.395.E-06	-4.190.E-06	5.750.E-07
	Capa 5-4	-3.600.E-06	3.137.E-06	-2.267.E-06	6.233.E-06	-4.100.E-06	2.010.E-06
	Capa 5-SN	-3.767.E-06	1.840.E-06	-1.403.E-06	2.673.E-06	-4.267.E-06	1.407.E-06
Capa SN-5	-5.600.E-06	6.067.E-06	-6.300.E-06	1.253.E-05	-5.067.E-06	5.767.E-06	
Nodo B	Superficial	-4.625.E-06	5.075.E-06	-4.775.E-06	3.500.E-05	-4.775.E-06	4.550.E-06
	Capa 1-2	-6.500.E-07	9.200.E-06	-2.850.E-06	2.550.E-05	-4.650.E-07	1.215.E-05
	Capa 2-1	-4.090.E-07	4.050.E-06	-7.550.E-07	8.040.E-06	-2.680.E-07	5.280.E-06
	Capa 2-3	-1.240.E-06	8.090.E-07	-1.940.E-07	3.450.E-06	-1.470.E-07	3.080.E-07
	Capa 3-2	-2.617.E-06	5.650.E-07	-4.333.E-07	4.033.E-06	-1.090.E-06	2.600.E-07
	Capa 3-4	-3.667.E-06	4.833.E-07	-4.667.E-07	2.600.E-06	-2.467.E-06	3.033.E-07
Capa 4-3	-3.375.E-06	7.500.E-07	-7.500.E-07	5.800.E-06	-2.135.E-06	5.200.E-07	

Nodo	Capa	$\epsilon_x(m/m)$		$\epsilon_y(m/m)$		$\epsilon_z(m/m)$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
	Capa 4-5	-4.230.E-06	9.300.E-07	-6.200.E-07	1.485.E-06	-4.150.E-06	5.550.E-07
	Capa 5-4	-3.733.E-06	2.577.E-06	-1.980.E-06	7.067.E-06	-3.900.E-06	1.983.E-06
	Capa 5-SN	-3.733.E-06	1.880.E-06	-1.727.E-06	2.003.E-06	-4.233.E-06	1.580.E-06
	Capa SN-5	-5.500.E-06	6.367.E-06	-6.033.E-06	1.253.E-05	-4.633.E-06	5.500.E-06
Nodo C	Superficial	-4.275.E-06	4.375.E-06	0.000.E+00	0.000.E+00	-3.800.E-06	5.075.E-06
	Capa 1-2	-6.750.E-07	6.200.E-06	-1.328.E-06	8.575.E-06	-5.500.E-07	1.430.E-05
	Capa 2-1	-4.570.E-07	3.260.E-06	-4.380.E-07	4.020.E-06	-3.260.E-07	5.530.E-06
	Capa 2-3	-1.260.E-06	8.180.E-07	-2.130.E-07	2.940.E-06	-1.350.E-07	5.880.E-07
	Capa 3-2	-2.650.E-06	5.667.E-07	-4.217.E-07	3.750.E-06	-9.083.E-07	2.617.E-07
	Capa 3-4	-3.667.E-06	4.833.E-07	-4.667.E-07	2.600.E-06	-2.467.E-06	3.033.E-07
	Capa 4-3	-3.395.E-06	7.850.E-07	-8.100.E-07	5.700.E-06	-2.050.E-06	5.400.E-07
	Capa 4-5	-4.340.E-06	7.700.E-07	-7.550.E-07	1.605.E-06	-4.170.E-06	6.000.E-07
	Capa 5-4	-3.900.E-06	2.173.E-06	-1.767.E-06	6.667.E-06	-3.700.E-06	1.683.E-06
	Capa 5-SN	-3.767.E-06	1.900.E-06	-1.707.E-06	2.000.E-06	-4.900.E-06	1.690.E-06
	Capa SN-5	-5.267.E-06	7.433.E-06	-6.133.E-06	1.290.E-05	-5.567.E-06	6.867.E-06

Tabla 9.8. Valores Máximos y Mínimos de esfuerzos durante la simulación

Nodo	Capa	$\sigma_{xx}(Pa)$		$\sigma_{yy}(Pa)$		$\sigma_{zz}(Pa)$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-1.930.E+04	2.070.E+04	-1.910.E+04	1.400.E+05	-1.840.E+04	1.850.E+04
	Capa 1-2	-2.500.E+03	3.990.E+04	-1.200.E+04	1.160.E+05	-1.890.E+03	5.440.E+04
	Capa 2-1	-3.530.E+03	4.260.E+04	-8.400.E+03	9.330.E+04	-2.560.E+03	5.410.E+04
	Capa 2-3	-1.190.E+04	8.430.E+03	-2.050.E+03	3.790.E+04	-1.390.E+03	3.020.E+03
	Capa 3-2	-1.550.E+04	3.140.E+03	-2.730.E+03	2.540.E+04	-7.540.E+03	1.450.E+03
	Capa 3-4	-2.120.E+04	2.720.E+03	-2.110.E+03	1.520.E+04	-1.480.E+04	1.400.E+03
	Capa 4-3	-6.900.E+03	1.440.E+03	-1.460.E+03	1.090.E+04	-4.260.E+03	1.050.E+03
	Capa 4-5	-8.160.E+03	1.670.E+03	-1.110.E+03	2.790.E+03	-8.380.E+03	1.150.E+03
	Capa 5-4	-1.080.E+03	9.410.E+02	-6.800.E+02	1.870.E+03	-1.230.E+03	6.030.E+02
	Capa 5-SN	-1.130.E+03	5.520.E+02	-4.210.E+02	8.020.E+02	-1.280.E+03	4.220.E+02
Nodo B	Capa SN-5	-1.680.E+02	1.820.E+02	-1.890.E+02	3.760.E+02	-1.520.E+02	1.730.E+02
	Superficial	-1.850.E+04	2.030.E+04	-1.910.E+04	1.400.E+05	-1.910.E+04	1.820.E+04
	Capa 1-2	-2.600.E+03	3.680.E+04	-1.140.E+04	1.020.E+05	-1.860.E+03	4.860.E+04
	Capa 2-1	-4.090.E+03	4.050.E+04	-7.550.E+03	8.040.E+04	-2.680.E+03	5.280.E+04
	Capa 2-3	-1.240.E+04	8.090.E+03	-1.940.E+03	3.450.E+04	-1.470.E+03	3.080.E+03
	Capa 3-2	-1.570.E+04	3.390.E+03	-2.600.E+03	2.420.E+04	-6.540.E+03	1.560.E+03
Capa 3-4	-2.200.E+04	2.900.E+03	-2.800.E+03	1.560.E+04	-1.480.E+04	1.820.E+03	

Nodo	Capa	σ_{xx} (Pa)		σ_{yy} (Pa)		σ_{zz} (Pa)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
	Capa 4-3	-6.750.E+03	1.500.E+03	-1.500.E+03	1.160.E+04	-4.270.E+03	1.040.E+03
	Capa 4-5	-8.460.E+03	1.860.E+03	-1.240.E+03	2.970.E+03	-8.300.E+03	1.110.E+03
	Capa 5-4	-1.120.E+03	7.730.E+02	-5.940.E+02	2.120.E+03	-1.170.E+03	5.950.E+02
	Capa 5-SN	-1.120.E+03	5.640.E+02	-5.180.E+02	6.010.E+02	-1.270.E+03	4.740.E+02
	Capa SN-5	-1.650.E+02	1.910.E+02	-1.810.E+02	3.760.E+02	-1.390.E+02	1.650.E+02
Nodo C	Superficial	-1.710.E+04	1.750.E+04	0.000.E+00	0.000.E+00	-1.520.E+04	2.030.E+04
	Capa 1-2	-2.700.E+03	2.480.E+04	-5.310.E+03	3.430.E+04	-2.200.E+03	5.720.E+04
	Capa 2-1	-4.570.E+03	3.260.E+04	-4.380.E+03	4.020.E+04	-3.260.E+03	5.530.E+04
	Capa 2-3	-1.260.E+04	8.180.E+03	-2.130.E+03	2.940.E+04	-1.350.E+03	5.880.E+03
	Capa 3-2	-1.590.E+04	3.400.E+03	-2.530.E+03	2.250.E+04	-5.450.E+03	1.570.E+03
	Capa 3-4	-2.200.E+04	2.900.E+03	-2.800.E+03	1.560.E+04	-1.480.E+04	1.820.E+03
	Capa 4-3	-6.790.E+03	1.570.E+03	-1.620.E+03	1.140.E+04	-4.100.E+03	1.080.E+03
	Capa 4-5	-8.680.E+03	1.540.E+03	-1.510.E+03	3.210.E+03	-8.340.E+03	1.200.E+03
	Capa 5-4	-1.170.E+03	6.520.E+02	-5.300.E+02	2.000.E+03	-1.110.E+03	5.050.E+02
	Capa 5-SN	-1.130.E+03	5.700.E+02	-5.120.E+02	6.000.E+02	-1.470.E+03	5.070.E+02
Capa SN-5	-1.580.E+02	2.230.E+02	-1.840.E+02	3.870.E+02	-1.670.E+02	2.060.E+02	

Tabla 9.9. Valores Máximos y Mínimos de desplazamientos durante la simulación

Nodo	Capa	desp "x" (m)		desp "y" (m)		desp "z" (m)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-2.940.E-07	2.510.E-07	-5.140.E-07	1.010.E-05	-2.570.E-07	2.090.E-07
	Capa 1-2	-6.090.E-07	6.050.E-07	-5.230.E-07	8.850.E-06	-2.420.E-07	3.110.E-08
	Capa 2-1	-4.830.E-07	4.640.E-07	-5.270.E-07	8.720.E-06	-1.710.E-07	2.190.E-08
	Capa 2-3	-2.250.E-07	2.140.E-07	-5.200.E-07	8.380.E-06	-3.580.E-08	9.210.E-08
	Capa 3-2	-3.500.E-07	3.580.E-07	-5.120.E-07	8.200.E-06	-2.410.E-08	1.980.E-07
	Capa 3-4	-4.370.E-07	4.370.E-07	-5.090.E-07	8.030.E-06	-2.630.E-08	2.700.E-07
	Capa 4-3	-6.030.E-07	5.900.E-07	-5.020.E-07	7.770.E-06	-4.560.E-08	3.680.E-07
	Capa 4-5	-9.610.E-07	1.000.E-06	-4.660.E-07	6.910.E-06	-5.820.E-08	3.870.E-07
	Capa 5-4	-1.190.E-06	1.240.E-06	-4.600.E-07	6.500.E-06	-6.750.E-08	4.950.E-07
	Capa 5-SN	-1.580.E-06	1.650.E-06	-4.800.E-07	4.730.E-06	-1.400.E-07	4.040.E-07
Capa SN-5	-1.880.E-06	1.900.E-06	-7.370.E-07	4.110.E-06	-2.420.E-07	5.680.E-07	
Nodo B	Superficial	-3.020.E-07	2.850.E-07	-5.030.E-07	1.000.E-05	-2.460.E-07	2.450.E-07
	Capa 1-2	-6.210.E-07	6.110.E-07	-5.220.E-07	8.880.E-06	-2.300.E-07	2.800.E-08
	Capa 2-1	-4.850.E-07	4.680.E-07	-5.270.E-07	8.780.E-06	-1.330.E-07	2.400.E-08
	Capa 2-3	-2.300.E-07	2.190.E-07	-5.230.E-07	8.490.E-06	-3.170.E-08	4.640.E-08
	Capa 3-2	-3.620.E-07	3.650.E-07	-5.140.E-07	8.310.E-06	-2.420.E-08	1.130.E-07

Nodo	Capa	desp "x" (m)		desp "y" (m)		desp "z" (m)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
	Capa 3-4	-4.500.E-07	4.530.E-07	-5.040.E-07	8.130.E-06	-2.410.E-08	1.650.E-07
	Capa 4-3	-6.150.E-07	6.040.E-07	-4.920.E-07	7.860.E-06	-3.230.E-08	2.230.E-07
	Capa 4-5	-9.770.E-07	1.010.E-06	-4.780.E-07	6.980.E-06	-5.380.E-08	2.480.E-07
	Capa 5-4	-1.190.E-06	1.220.E-06	-4.600.E-07	6.550.E-06	-6.530.E-08	2.980.E-07
	Capa 5-SN	-1.580.E-06	1.630.E-06	-4.990.E-07	4.740.E-06	-1.110.E-07	2.710.E-07
	Capa SN-5	-1.870.E-06	1.880.E-06	-7.900.E-07	4.110.E-06	-2.260.E-07	4.000.E-07
Nodo C	Superficial	-2.420.E-07	3.110.E-07	-4.960.E-07	8.550.E-06	-2.920.E-07	2.430.E-07
	Capa 1-2	-6.100.E-07	6.160.E-07	-5.100.E-07	8.710.E-06	-2.250.E-07	3.110.E-08
	Capa 2-1	-4.810.E-07	4.660.E-07	-5.180.E-07	8.700.E-06	-7.900.E-08	2.700.E-08
	Capa 2-3	-2.320.E-07	2.190.E-07	-5.210.E-07	8.520.E-06	-2.350.E-08	2.850.E-08
	Capa 3-2	-3.670.E-07	3.660.E-07	-5.140.E-07	8.340.E-06	-2.140.E-08	4.250.E-08
	Capa 3-4	-4.500.E-07	4.530.E-07	-5.040.E-07	8.130.E-06	-2.410.E-08	1.650.E-07
	Capa 4-3	-6.180.E-07	6.160.E-07	-4.890.E-07	7.890.E-06	-3.010.E-08	1.030.E-07
	Capa 4-5	-9.780.E-07	1.000.E-06	-4.850.E-07	6.990.E-06	-4.070.E-08	9.590.E-08
	Capa 5-4	-1.200.E-06	1.230.E-06	-4.590.E-07	6.570.E-06	-7.790.E-08	1.230.E-07
	Capa 5-SN	-1.560.E-06	1.620.E-06	-4.770.E-07	4.730.E-06	-9.720.E-08	1.500.E-07
Capa SN-5	-1.860.E-06	1.860.E-06	-7.080.E-07	4.180.E-06	-1.900.E-07	2.140.E-07	

Resultados para el Eje Trasero o Eje 3 con Carga de 14 ton

Para finalizar, en este eje se analizaron las cargas de 12.0 y 14.0 toneladas. Para el caso de 14.0 toneladas se tiene la gráfica que se presenta como Figura 9.19. En este caso la amplitud es de 156990 Pa y una frecuencia de 35.37 Hz.

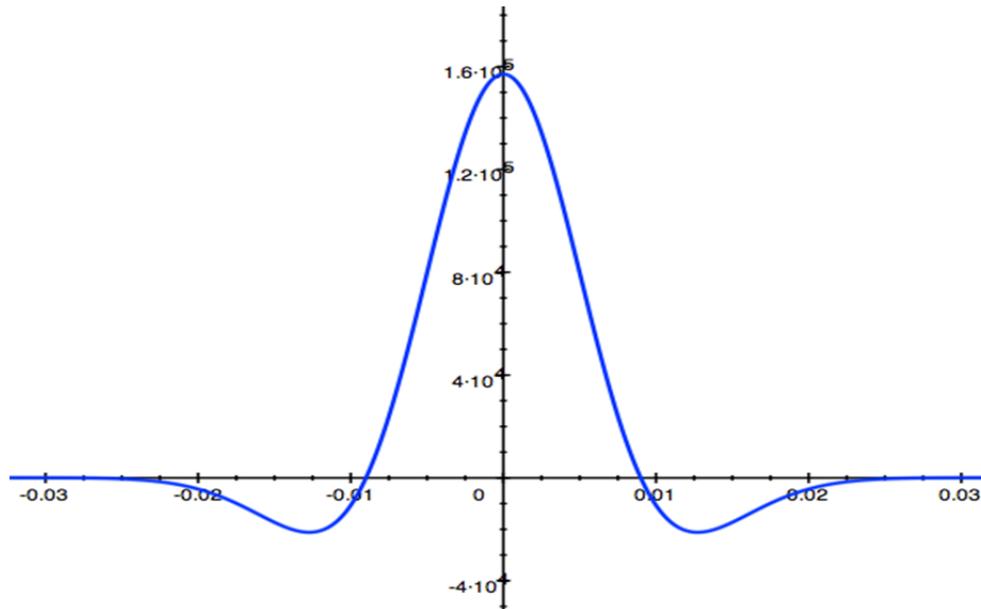


Figura 9.19. Onda Ricker Presión (Pa) contra Tiempo (s) para 14.0 Toneladas

Para este caso, los valores de desplazamiento en “y” de la sección central o longitudinal se muestran en la Figura 9.20. Mientras en la Figura 9.21 se muestran los resultados equivalentes pero para la sección Transversal.

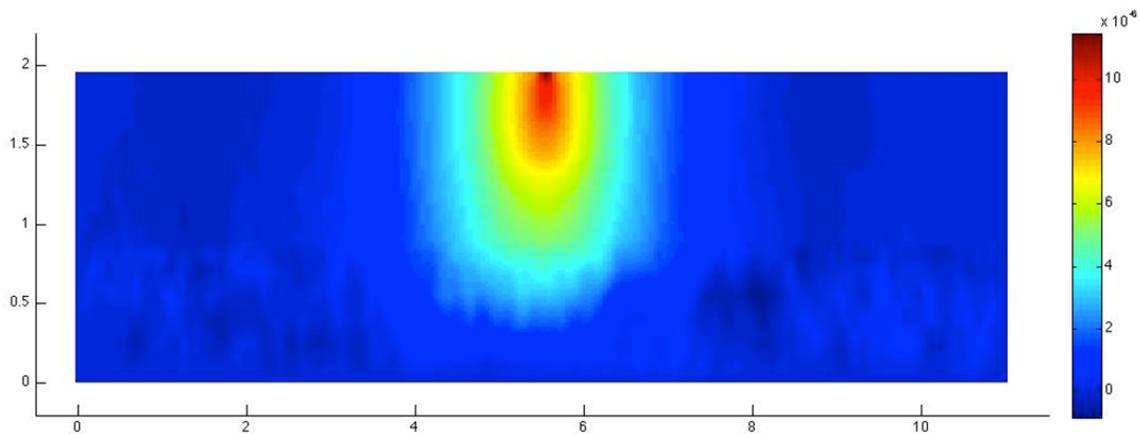


Figura 9.20. Desplazamientos en “y” para el plano central de la pista.

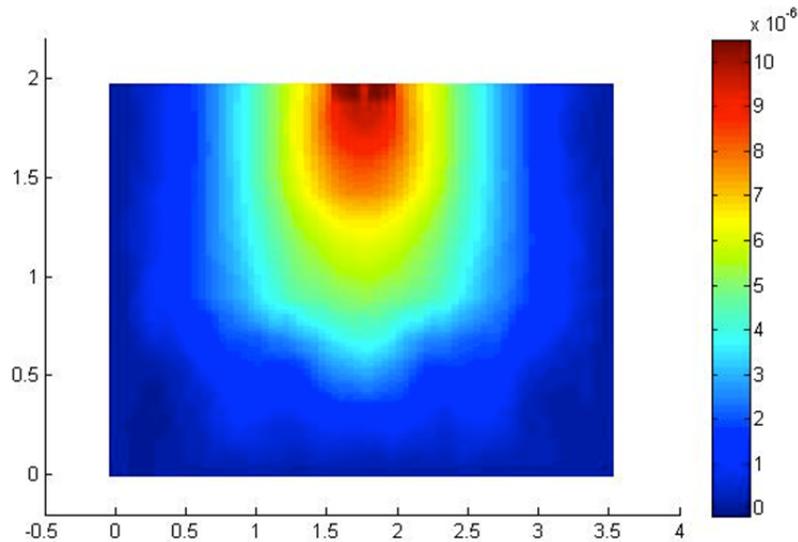


Figura 9.21. Desplazamientos en "y(m)" para la sección transversal de la Pista.

Las Tablas 9.10, 9.11, y 9.12 muestran los valores máximos y mínimos obtenidos para las diferentes respuestas mecánicas evaluadas en el pavimento.

Tabla 9.10. Valores Máximos y Mínimos de deformación durante la simulación.

Nodo	Capa	$\epsilon_x(m/m)$		$\epsilon_y(m/m)$		$\epsilon_z(m/m)$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-4.850.E-06	4.850.E-06	-5.300.E-06	3.900.E-05	-5.075.E-06	4.450.E-06
	Capa 1-2	-6.950.E-07	1.110.E-05	-3.325.E-06	3.225.E-05	-5.250.E-07	1.510.E-05
	Capa 2-1	-3.920.E-07	4.740.E-06	-9.330.E-07	1.040.E-05	-2.840.E-07	6.010.E-06
	Capa 2-3	-1.320.E-06	9.370.E-07	-2.280.E-07	4.220.E-06	-1.380.E-07	3.350.E-07
	Capa 3-2	-2.867.E-06	5.800.E-07	-5.050.E-07	4.700.E-06	-1.397.E-06	2.700.E-07
	Capa 3-4	-3.917.E-06	5.033.E-07	-3.900.E-07	2.817.E-06	-2.733.E-06	2.583.E-07
	Capa 4-3	-3.835.E-06	8.000.E-07	-8.150.E-07	6.100.E-06	-2.370.E-06	5.850.E-07
	Capa 4-5	-4.535.E-06	9.300.E-07	-6.150.E-07	1.550.E-06	-4.655.E-06	6.400.E-07
	Capa 5-4	-4.000.E-06	3.500.E-06	-2.520.E-06	6.933.E-06	-4.533.E-06	2.233.E-06
	Capa 5-SN	-4.200.E-06	2.043.E-06	-2.083.E-06	2.970.E-06	-4.733.E-06	1.493.E-06
Capa SN-5	-6.233.E-06	6.733.E-06	-7.000.E-06	1.390.E-05	-5.633.E-06	6.300.E-06	
Nodo B	Superficial	-5.125.E-06	5.625.E-06	-5.300.E-06	3.900.E-05	-5.300.E-06	5.050.E-06
	Capa 1-2	-7.200.E-07	1.020.E-05	-3.175.E-06	2.825.E-05	-5.150.E-07	1.350.E-05
	Capa 2-1	-4.540.E-07	4.500.E-06	-8.390.E-07	8.940.E-06	-2.980.E-07	5.860.E-06
	Capa 2-3	-1.380.E-06	8.980.E-07	-2.160.E-07	3.830.E-06	-1.640.E-07	3.430.E-07

Nodo	Capa	$\epsilon_x(m/m)$		$\epsilon_y(m/m)$		$\epsilon_z(m/m)$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
	Capa 3-2	-2.917.E-06	6.267.E-07	-4.817.E-07	4.467.E-06	-1.212.E-06	2.883.E-07
	Capa 3-4	-4.067.E-06	5.367.E-07	-5.183.E-07	2.883.E-06	-2.750.E-06	3.383.E-07
	Capa 4-3	-3.750.E-06	8.350.E-07	-8.350.E-07	6.450.E-06	-2.370.E-06	5.750.E-07
	Capa 4-5	-4.700.E-06	1.030.E-06	-6.900.E-07	1.650.E-06	-4.610.E-06	6.150.E-07
	Capa 5-4	-4.133.E-06	2.860.E-06	-2.200.E-06	7.867.E-06	-4.333.E-06	2.207.E-06
	Capa 5-SN	-4.133.E-06	2.090.E-06	-1.920.E-06	2.227.E-06	-4.700.E-06	1.753.E-06
	Capa SN-5	-6.100.E-06	7.067.E-06	-6.700.E-06	1.390.E-05	-5.133.E-06	6.133.E-06
Nodo C	Superficial	-4.750.E-06	4.850.E-06	0.000.E+00	0.000.E+00	-4.200.E-06	5.625.E-06
	Capa 1-2	-7.500.E-07	6.875.E-06	-1.475.E-06	9.550.E-06	-6.100.E-07	1.590.E-05
	Capa 2-1	-5.070.E-07	3.630.E-06	-4.870.E-07	4.470.E-06	-3.620.E-07	6.140.E-06
	Capa 2-3	-1.400.E-06	9.090.E-07	-2.370.E-07	3.270.E-06	-1.510.E-07	6.540.E-07
	Capa 3-2	-2.950.E-06	6.300.E-07	-4.683.E-07	4.167.E-06	-1.008.E-06	2.917.E-07
	Capa 3-4	-4.067.E-06	5.367.E-07	-5.183.E-07	2.883.E-06	-2.750.E-06	3.383.E-07
	Capa 4-3	-3.770.E-06	8.750.E-07	-9.000.E-07	6.350.E-06	-2.280.E-06	6.000.E-07
	Capa 4-5	-4.825.E-06	8.600.E-07	-8.350.E-07	1.785.E-06	-4.630.E-06	6.650.E-07
	Capa 5-4	-4.333.E-06	2.413.E-06	-1.963.E-06	7.400.E-06	-4.133.E-06	1.873.E-06
	Capa 5-SN	-4.200.E-06	2.110.E-06	-1.897.E-06	2.223.E-06	-5.433.E-06	1.877.E-06
	Capa SN-5	-5.867.E-06	8.267.E-06	-6.833.E-06	1.433.E-05	-6.200.E-06	7.633.E-06

Tabla 9.11. Valores Máximos y Mínimos de esfuerzos durante la simulación.

Nodo	Capa	$\sigma_{xx}(Pa)$		$\sigma_{yy}(Pa)$		$\sigma_{zz}(Pa)$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-1.940.E+04	1.940.E+04	-2.120.E+04	1.560.E+05	-2.030.E+04	1.780.E+04
	Capa 1-2	-2.780.E+03	4.440.E+04	-1.330.E+04	1.290.E+05	-2.100.E+03	6.040.E+04
	Capa 2-1	-3.920.E+03	4.740.E+04	-9.330.E+03	1.040.E+05	-2.840.E+03	6.010.E+04
	Capa 2-3	-1.320.E+04	9.370.E+03	-2.280.E+03	4.220.E+04	-1.380.E+03	3.350.E+03
	Capa 3-2	-1.720.E+04	3.480.E+03	-3.030.E+03	2.820.E+04	-8.380.E+03	1.620.E+03
	Capa 3-4	-2.350.E+04	3.020.E+03	-2.340.E+03	1.690.E+04	-1.640.E+04	1.550.E+03
	Capa 4-3	-7.670.E+03	1.600.E+03	-1.630.E+03	1.220.E+04	-4.740.E+03	1.170.E+03
	Capa 4-5	-9.070.E+03	1.860.E+03	-1.230.E+03	3.100.E+03	-9.310.E+03	1.280.E+03
	Capa 5-4	-1.200.E+03	1.050.E+03	-7.560.E+02	2.080.E+03	-1.360.E+03	6.700.E+02
	Capa 5-SN	-1.260.E+03	6.130.E+02	-6.250.E+02	8.910.E+02	-1.420.E+03	4.480.E+02
	Capa SN-5	-1.870.E+02	2.020.E+02	-2.100.E+02	4.170.E+02	-1.690.E+02	1.890.E+02
Nodo B	Superficial	-2.050.E+04	2.250.E+04	-2.120.E+04	1.560.E+05	-2.120.E+04	2.020.E+04
	Capa 1-2	-2.880.E+03	4.080.E+04	-1.270.E+04	1.130.E+05	-2.060.E+03	5.400.E+04
	Capa 2-1	-4.540.E+03	4.500.E+04	-8.390.E+03	8.940.E+04	-2.980.E+03	5.860.E+04

Nodo	Capa	σ_{xx} (Pa)		σ_{yy} (Pa)		σ_{zz} (Pa)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
	Capa 2-3	-1.380.E+04	8.980.E+03	-2.160.E+03	3.830.E+04	-1.640.E+03	3.430.E+03
	Capa 3-2	-1.750.E+04	3.760.E+03	-2.890.E+03	2.680.E+04	-7.270.E+03	1.730.E+03
	Capa 3-4	-2.440.E+04	3.220.E+03	-3.110.E+03	1.730.E+04	-1.650.E+04	2.030.E+03
	Capa 4-3	-7.500.E+03	1.670.E+03	-1.670.E+03	1.290.E+04	-4.740.E+03	1.150.E+03
	Capa 4-5	-9.400.E+03	2.060.E+03	-1.380.E+03	3.300.E+03	-9.220.E+03	1.230.E+03
	Capa 5-4	-1.240.E+03	8.580.E+02	-6.600.E+02	2.360.E+03	-1.300.E+03	6.620.E+02
	Capa 5-SN	-1.240.E+03	6.270.E+02	-5.760.E+02	6.680.E+02	-1.410.E+03	5.260.E+02
	Capa SN-5	-1.830.E+02	2.120.E+02	-2.010.E+02	4.170.E+02	-1.540.E+02	1.840.E+02
Nodo C	Superficial	-1.900.E+04	1.940.E+04	0.000.E+00	0.000.E+00	-1.680.E+04	2.250.E+04
	Capa 1-2	-3.000.E+03	2.750.E+04	-5.900.E+03	3.820.E+04	-2.440.E+03	6.360.E+04
	Capa 2-1	-5.070.E+03	3.630.E+04	-4.870.E+03	4.470.E+04	-3.620.E+03	6.140.E+04
	Capa 2-3	-1.400.E+04	9.090.E+03	-2.370.E+03	3.270.E+04	-1.510.E+03	6.540.E+03
	Capa 3-2	-1.770.E+04	3.780.E+03	-2.810.E+03	2.500.E+04	-6.050.E+03	1.750.E+03
	Capa 3-4	-2.440.E+04	3.220.E+03	-3.110.E+03	1.730.E+04	-1.650.E+04	2.030.E+03
	Capa 4-3	-7.540.E+03	1.750.E+03	-1.800.E+03	1.270.E+04	-4.560.E+03	1.200.E+03
	Capa 4-5	-9.650.E+03	1.720.E+03	-1.670.E+03	3.570.E+03	-9.260.E+03	1.330.E+03
	Capa 5-4	-1.300.E+03	7.240.E+02	-5.890.E+02	2.220.E+03	-1.240.E+03	5.620.E+02
	Capa 5-SN	-1.260.E+03	6.330.E+02	-5.690.E+02	6.670.E+02	-1.630.E+03	5.630.E+02
	Capa SN-5	-1.760.E+02	2.480.E+02	-2.050.E+02	4.300.E+02	-1.860.E+02	2.290.E+02

Tabla 9.12. Valores Máximos y Mínimos de desplazamientos durante la simulación.

Nodo	Capa	desp "x" (m)		desp "y" (m)		desp "z" (m)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-3.260.E-07	2.540.E-07	-5.710.E-07	1.120.E-05	-2.850.E-07	2.080.E-07
	Capa 1-2	-6.770.E-07	6.720.E-07	-5.810.E-07	9.830.E-06	-2.690.E-07	4.060.E-08
	Capa 2-1	-5.370.E-07	5.160.E-07	-5.850.E-07	9.690.E-06	-1.900.E-07	3.250.E-08
	Capa 2-3	-2.500.E-07	2.380.E-07	-5.780.E-07	9.310.E-06	-3.980.E-08	1.020.E-07
	Capa 3-2	-3.890.E-07	3.970.E-07	-5.690.E-07	9.110.E-06	-2.680.E-08	2.200.E-07
	Capa 3-4	-4.850.E-07	4.860.E-07	-5.650.E-07	8.920.E-06	-2.920.E-08	3.000.E-07
	Capa 4-3	-6.700.E-07	6.550.E-07	-5.570.E-07	8.630.E-06	-3.430.E-08	4.090.E-07
	Capa 4-5	-1.070.E-06	1.110.E-06	-5.180.E-07	7.680.E-06	-5.620.E-08	4.300.E-07
	Capa 5-4	-1.320.E-06	1.380.E-06	-5.110.E-07	7.220.E-06	-8.060.E-08	5.500.E-07
	Capa 5-SN	-1.750.E-06	1.830.E-06	-5.120.E-07	5.250.E-06	-1.550.E-07	4.490.E-07
Capa SN-5	-2.090.E-06	2.100.E-06	-7.690.E-07	4.570.E-06	-3.380.E-07	6.310.E-07	
Nodo B	Superficial	-3.350.E-07	3.170.E-07	-5.590.E-07	1.110.E-05	-2.730.E-07	2.720.E-07
	Capa 1-2	-6.900.E-07	6.790.E-07	-5.800.E-07	9.860.E-06	-2.550.E-07	3.120.E-08

Nodo	Capa	desp "x" (m)		desp "y" (m)		desp "z" (m)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Capa 2-1	-5.390.E-07	5.200.E-07	-5.860.E-07	9.750.E-06	-1.470.E-07	2.670.E-08
	Capa 2-3	-2.560.E-07	2.430.E-07	-5.820.E-07	9.440.E-06	-3.520.E-08	5.150.E-08
	Capa 3-2	-4.020.E-07	4.060.E-07	-5.710.E-07	9.230.E-06	-2.690.E-08	1.260.E-07
	Capa 3-4	-4.990.E-07	5.030.E-07	-5.590.E-07	9.040.E-06	-2.680.E-08	1.830.E-07
	Capa 4-3	-6.830.E-07	6.710.E-07	-5.470.E-07	8.730.E-06	-3.580.E-08	2.480.E-07
	Capa 4-5	-1.090.E-06	1.120.E-06	-5.310.E-07	7.750.E-06	-5.970.E-08	2.750.E-07
	Capa 5-4	-1.320.E-06	1.360.E-06	-5.110.E-07	7.280.E-06	-7.260.E-08	3.320.E-07
	Capa 5-SN	-1.760.E-06	1.810.E-06	-5.540.E-07	5.260.E-06	-1.230.E-07	3.010.E-07
	Capa SN-5	-2.070.E-06	2.090.E-06	-8.770.E-07	4.570.E-06	-2.510.E-07	4.440.E-07
Nodo C	Superficial	-2.690.E-07	3.450.E-07	-5.510.E-07	9.500.E-06	-3.240.E-07	2.700.E-07
	Capa 1-2	-6.780.E-07	6.850.E-07	-5.670.E-07	9.680.E-06	-2.500.E-07	3.460.E-08
	Capa 2-1	-5.340.E-07	5.180.E-07	-5.760.E-07	9.670.E-06	-8.780.E-08	3.000.E-08
	Capa 2-3	-2.570.E-07	2.430.E-07	-5.790.E-07	9.460.E-06	-2.610.E-08	3.170.E-08
	Capa 3-2	-4.080.E-07	4.070.E-07	-5.710.E-07	9.270.E-06	-2.380.E-08	4.720.E-08
	Capa 3-4	-4.990.E-07	5.030.E-07	-5.590.E-07	9.040.E-06	-2.680.E-08	1.830.E-07
	Capa 4-3	-6.870.E-07	6.840.E-07	-5.430.E-07	8.760.E-06	-3.340.E-08	1.140.E-07
	Capa 4-5	-1.090.E-06	1.110.E-06	-5.390.E-07	7.770.E-06	-4.520.E-08	1.070.E-07
	Capa 5-4	-1.330.E-06	1.370.E-06	-5.100.E-07	7.300.E-06	-8.660.E-08	1.370.E-07
	Capa 5-SN	-1.740.E-06	1.810.E-06	-5.300.E-07	5.250.E-06	-1.080.E-07	1.670.E-07
	Capa SN-5	-2.060.E-06	2.070.E-06	-7.860.E-07	4.640.E-06	-2.110.E-07	2.380.E-07

Resultados para cada nodo evaluado

Como se mencionó anteriormente, es interesante analizar el comportamiento de cada nodo de interés durante el tiempo total de la simulación. A manera de ejemplo se muestra el Nodo A de la Capa 2-3 en la simulación del segundo eje. Los valores obtenidos para las deformaciones, esfuerzos y desplazamientos respectivamente se muestran en la Figura 9.22.

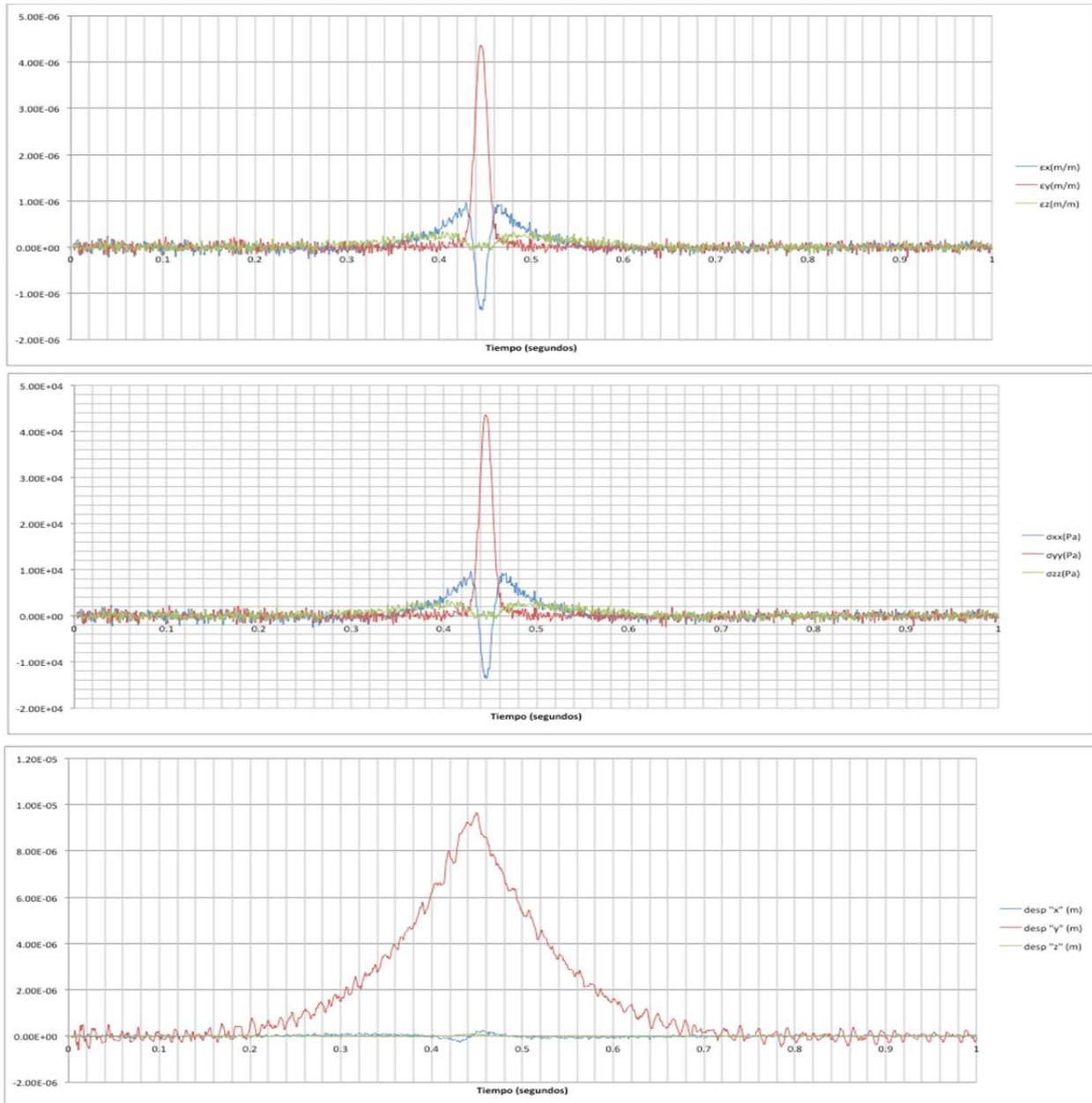


Figura 9.22. Deformaciones, esfuerzos y desplazamientos Nodo A de la Capa 2-3

Por brevedad no se presentan más resultados, pero se cuenta con la información de estas gráficas para los 33 nodos de interés de cada una de las simulaciones. En estas gráficas se hace evidente el paso del vehículo sobre el nodo de interés y el efecto que éste genera en cada uno de los parámetros mecánicos que muestran la respuesta del respectivo nodo.

9.1.5. Resumen de los resultados obtenidos

A manera de resumen, se presentan a continuación de los resultados de las respuestas mecánicas que son de mayor relevancia para el análisis y diseño de estructuras de pavimento. Estos resultados fueron obtenidos durante toda la simulación y son los siguientes:

- La máxima deformación horizontal de tensión (ϵ_t) en la parte inferior de la carpeta de rodadura que tiene material asfáltico tipo MD-12 (capa 1-2).
- La máxima deformación horizontal de tensión (ϵ_t) en la parte inferior de la segunda capa asfáltica que tiene material tipo MAM-20 (capa 2-3).
- La máxima deformación horizontal de tensión (ϵ_t) en la parte inferior de la tercera capa asfáltica que tiene material tipo MD-20 (capa 3-4).
- La máxima deformación horizontal de tensión (ϵ_t) en la parte inferior de la cuarta capa que tiene material tipo MGEA o granular estabilizado con asfalto (capa 4-5).
- La máxima deformación vertical (ϵ_v) en la parte superior de la subrasante (capa SN-5).

En cada caso, se tomó el máximo valor que se encontró al comparar los resultados de los nodos A, B y C de cada capa. Para el caso de las deformación máximas a tensión, estas corresponden al máximo valor entre los tres nodos mencionados y los dos esfuerzo axiales que pueden someter al material a tensión (x y z). Las Tablas 9.13, 9.14 y 9.15 presentan estos resultados para cada uno de los tres tipos de eje evaluados y sus respectivas cargas:

Tabla 9.13. Resumen de resultados relevantes para el eje delantero o eje 1.

	Carga	
	9 ton	10 ton
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la carpeta de rodadura (ϵ_t)	5.825.E-07	7.000.E-07
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 2 (ϵ_t)	1.370.E-06	1.650.E-06
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 3 (ϵ_t)	3.350.E-06	4.017.E-06
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 4 (ϵ_t)	3.465.E-06	4.160.E-06
Deformación máxima vertical en la parte superior de la subrasante (ϵ_z)	9.267.E-06	1.110.E-05

Tabla 9.14. Resumen de resultados relevantes para el eje central o eje 2.

	Carga	
	12.6 ton	14.5 ton
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la carpeta de rodadura (ϵ_t)	6.750.E-07	7.775.E-07
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 2 (ϵ_t)	1.260.E-06	1.450.E-06
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 3 (ϵ_t)	3.667.E-06	4.217.E-06
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 4 (ϵ_t)	4.340.E-06	4.995.E-06
Deformación máxima vertical en la parte superior de la subrasante (ϵ_z)	1.290.E-05	1.483.E-05

Tabla 9.15. Resumen de resultados relevantes para el eje trasero o eje 3.

	Carga	
	12.0 ton	14.0 ton
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la carpeta de rodadura (ϵ_t)	6.425.E-07	7.500.E-07
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 2 (ϵ_t)	1.200.E-06	1.400.E-06
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 3 (ϵ_t)	3.483.E-06	4.067.E-06
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 4 (ϵ_t)	4.135.E-06	4.825.E-06
Deformación máxima vertical en la parte superior de la subrasante (ϵ_z)	1.227.E-05	1.433.E-05

Los resultados consignados en las tablas anteriores son, en general, más bajos de lo esperado y de lo encontrado en campo. Se cree que la razón para esta situación es que el modelo presenta condiciones de frontera (empotramiento en todas las paredes de la pista) que pueden rigidizar la respuesta de las capas del pavimento. En este sentido, los resultados de los modelos y su análisis se deben realizar de forma cualitativa mientras se calibra el modelo con los resultados capturados en el sistema de instrumentación. Vale la pena mencionar que los resultados de campo contemplan el instante en que la llanta está encima de los puntos de evaluación. Por el contrario, en las anteriores tablas se toman los valores máximos obtenidos durante todo el recorrido de la llanta. Sin embargo, para todos los casos presentados los valores máximos corresponden al instante en que la llanta está encima de los puntos de evaluación, exceptuando el caso de los datos para la parte inferior de la capa de rodadura. En este caso no se reporta tensión para ningún caso de carga en el instante en que la llanta está

encima de los puntos de evaluación pero si existe tensión en momentos en que la llanta se acerca y se aleja del nodo en estudio.

Para estas simulaciones se supusieron valores típicos y constantes de módulos de elasticidad. No obstante, los módulos de las diferentes capas varían en función de la condición climática interna del pavimento (en función de la temperatura, para el caso de los materiales asfálticos, y en función de la humedad relativa, para el caso las capas con materiales sin cementar), De allí la importancia de integrar los efectos climáticos al modelo. La siguiente sección describe en detalle la formulación e implementación del modelo climático y presenta algunos resultados de estas simulaciones. Adicionalmente, el siguiente capítulo se concentra en investigar e identificar los rangos típicos de variación de la respuesta mecánica de los pavimentos debido a las variaciones de sus condiciones climáticas internas. Estos rangos de valores son comparados con aquellos obtenidos de modelos más sencillos al presentado en este capítulo (multi-capa elásticos lineales y estáticos) y, naturalmente, pueden ser también comparados con los valores presentados como resultados en la tablas anteriores.

9.1.6. Análisis de los resultados obtenidos de las simulaciones mecánicas y conclusiones

De acuerdo con los resultados, se observa que los máximos valores de todos los parámetros mecánicos que representan la respuesta mecánica del pavimento ocurren cuando la llanta pasa justo por encima de los nodos de evaluación, mientras que los mínimos valores se presentan cuando la llanta está muy próxima a pasar por encima. Esto se puede deber a la forma de la onda Ricker se impone al pavimento, debido a que ésta tiene esfuerzos bajos de tensión. Se puede deber también a que en proceso de propagación de las ondas de carga se pueden generar esfuerzos de tensión en los materiales. Sin embargo, los máximos esfuerzos y deformaciones de tensión son aproximadamente uno o dos ordenes de magnitud más pequeños que los máximos valores a comprensión en la mayoría de los casos.

La segunda capa es la de mayores esfuerzos siempre que la llanta no esté pasando por encima del punto evaluado. Este resultado no es sorprendente y es consistente con el comportamiento esperado de este tipo pavimento ya que esta capa, en unión con la tercera capa de base, es la más resistente de la estructura. Efectivamente, en la mayoría de los casos que la llanta no pasa por encima del nodo en evaluación, los mayores esfuerzos están en esta segunda capa. Incluso se puede observar que en el Nodo C, al cual no le pasan llantas por encima, los valores de esfuerzos al final de la capa de rodadura son menores que los esfuerzos que en la segunda capa. Además, observando los valores que tienen los esfuerzos máximos durante la simulación, se puede ver que la mayor disminución de esfuerzos sucede entre los nodos que limitan la segunda capa. Esto se debe, como se explicó anteriormente, a que la segunda capa es la que mayor demanda y responsabilidad estructural tiene y es, por lo tanto, en la cual se disipan los esfuerzos en mayor grado.

En términos generales, la magnitud de las deformaciones son muy uniformes a lo largo del pavimento, aunque hay una gran diferencia en la capa de rodadura cuando pasa la llanta encima del punto de evaluación. En general las demás capas de pavimento están un orden de magnitud por debajo de las deformaciones de la capa de rodadura.

En las secciones transversales y longitudinales se puede ver que la figura de la sección central tiene un leve acotamiento en el lado derecho de la gráfica. Probablemente este acotamiento se debe a la dirección en que se mueve la carga. Sin embargo su efecto es muy bajo y en algunos casos difícilmente apreciable.

Como se mencionó anteriormente, los resultados de resumen consolidados mostrados en las tablas 9.13, 9.14 y 9.15 se deben emplear para realizar actividades de calibración del modelo, empleando para esto respecto los valores reportados en campo.

9.2. Módulo Térmico

Como se mencionó con anterioridad, el modelo desarrollado incluye también un módulo térmico, que permite simular la difusión de temperatura al interior del pavimento en función de un conjunto de variables climáticas externas al tramo de análisis. Este módulo se implementó empleando de nuevo el método de diferencias finitas que usa ecuaciones basadas en la conservación y trasmisión de calor. El modelo parte de una situación de condiciones ambientales iniciales y calcula el cambio en la temperatura en el pavimento, por lo que tiene en cuenta la variabilidad de los materiales del pavimento y el flujo de calor tanto en el interior como en las condiciones de frontera. Los resultados que el modelo arroja son los datos de temperatura que tiene cada nodo durante los tiempos seleccionados para la impresión.

El conjunto de condiciones ambientales iniciales consiste en una simulación de la atmosfera en la superficie del pavimento. Para realizar esto, el modelo se basa en la radiación solar, la temperatura del ambiente y demás parámetros que se explican a continuación. Esta simulación brinda una mayor confiabilidad y apego a la realidad que otros modelos térmicos existentes en la literatura. En el caso modelado la única fuente de calor es proveniente de la atmósfera partiendo de datos obtenidos en campo, por lo que se espera que el modelo arroje valores muy similares a la realidad.

9.2.1. Ecuaciones térmicas

- **Ecuaciones básicas del módulo térmico**

El módulo térmico del modelo numérico inicia calculando las constantes térmicas en cada paso de tiempo; esto se debe a que los parámetros de los cuales dependen estas constantes pueden

variar a lo largo de la simulación. El primer parámetro que se calcula es el calor específico de los materiales, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$C_e = C_s \cdot (1 - n) + C_w \cdot P_o \cdot S_t \quad (24)$$

donde C_e es el calor específico del material usado en los cálculos, C_s es el calor específico del material, n es la porosidad del material, C_w es el calor específico del agua, y S_t es el grado de saturación del elemento evaluado.

El segundo parámetro que se calcula en cada intervalo de tiempo es la conductividad térmica del material, mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = K_e \cdot (\lambda_{sat} - \lambda_{dry}) + \lambda_{dry} \quad (25)$$

Donde λ es la conductividad térmica, λ_{dry} es la conductividad del material seco (Ecuación 26, con ρ_s representando la densidad del material), λ_{sat} es la conductividad térmica del material cuando hay presencia de agua y K_e es la constante de Kersten.

$$\lambda_{dry} = \frac{0.135\rho_s + 64.7}{2700 - 0.947\rho_s} \quad (26)$$

La conductividad térmica del material cuando hay presencia de agua se calcula mediante:

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n} \cdot \lambda_w^n \quad (27)$$

donde λ_s es la conductividad térmica del material, λ_w es la conductividad térmica del agua, y n es la porosidad.

Por su parte, la constante de Kersten se define mediante la siguiente ecuación:

$$K_e = 0.7 \cdot \log(S_r) + 1 \quad (28)$$

en donde S_r representa el grado de saturación del material.

Como se puede observar de las anteriores ecuaciones, dado que la porosidad y el grado de saturación del material pueden cambiar en el tiempo (e.g., consolidación de un suelo natural), los parámetros de entrada del modelo también pueden cambiar en el tiempo. No obstante, si en el modelo no se soluciona el problema de flujo de agua que daría origen a estos cambios, no se hace necesario re-calcular estas constantes para cada paso de tiempo o Δt .

El cálculo de la temperatura en cada paso de tiempo se realiza empleando las constantes anteriormente calculadas y de la temperatura inicial—si es el primer paso de tiempo—o de la temperatura calculada en el anterior paso, si no se está resolviendo el primer paso de tiempo. Para hacer esto se usa la Ecuación 29, la cual emplea la misma convención de las anteriores ecuaciones.

$$T_o^{t+\Delta t} = \frac{1}{c_s} \nabla(\nabla\lambda \cdot T) \cdot \Delta t + T_o \quad (29)$$

Para resolver esta ecuación se emplea la siguiente fórmula:

$$\nabla(\nabla\lambda \cdot T) = -\frac{2(T_0-T_1)}{(x_0-x_1) \cdot (x_1-x_2)} \cdot \lambda_1 + \frac{2(T_0-T_2)}{(x_0-x_2) \cdot (x_1-x_2)} \cdot \lambda_2 - \frac{2(T_0-T_3)}{(y_0-y_3) \cdot (y_3-y_4)} \cdot \lambda_3 + \frac{2(T_0-T_4)}{(y_0-y_4) \cdot (y_3-y_4)} \cdot \lambda_4 - \frac{2(T_0-T_5)}{(z_0-z_5) \cdot (z_5-z_6)} \cdot \lambda_5 + \frac{2(T_0-T_6)}{(z_0-z_6) \cdot (z_5-z_6)} \cdot \lambda_6 \quad (30)$$

Esta ecuación se reemplaza en la anterior con el fin de obtener la temperatura del paso de tiempo evaluado. La Ecuación 30 emplea la misma nomenclatura de las anteriores ecuaciones, y el subíndice que los acompaña hace referencia al nodo vecino del de evaluación al que se le pide el valor. La nomenclatura que se usa para identificar al vecino del nodo evaluado se muestra en la Figura 9.22.

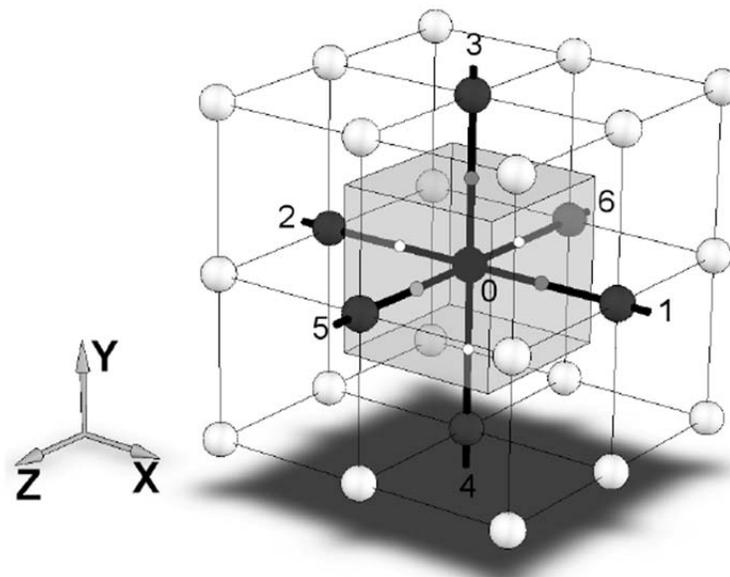


Figura 9.22. Convención de los nodos usados (Tristancho et al. 2010).

En la ecuación de solución el valor de la conductividad térmica “ $\lambda_{\#}$ ” corresponde a un valor interpolado entre la conductividad térmica del nodo de evaluación y la del nodo vecino deseado.

El valor resultante se determina con la ecuación descrita con anterioridad , en donde $\lambda_{\#}$ es la conductividad usada, $\lambda'_{\#}$ es la conductividad del nodo vecino y λ_0 hace referencia a la conductividad del nodo evaluado:

$$\lambda_{\#} = \sqrt{\lambda'_{\#} \cdot \lambda_0} \quad (31)$$

9.2.2. Ecuaciones de Frontera

El módulo térmico fue diseñado para considerar tres casos diferentes de frontera. El primer caso de frontera es cuando se impone una temperatura, en cuyo caso el programa no hace ningún cálculo de los anteriores descritos e iguala la temperatura del elemento al valor impuesto.

En la segunda definición de frontera, se impone arbitrariamente un flujo de calor. En esta ocasión se usan las ecuaciones anteriormente descritas, pero el cálculo de $\nabla(\nabla\lambda \cdot T)$ obtenido con la ecuación no se toma en consideración sino que en su lugar se toma el valor del flujo de calor impuesto. Con este método de frontera, se pueden modelar materiales que tengan flujos de calor muy bajos, tales como la porcelana. Esta aproximación también permite modelar un fenómeno de generación espontánea de calor en el sistema producido por diversos factores, como una reacción biológica o la fricción entre elementos.

El último caso de frontera constituye el caso más complejo y consiste en una *frontera atmosférica*. Para simular la frontera atmosférica se usa la Ecuación 29 con el objetivo de calcular la temperatura de un nodo ficticio que es vecino al nodo definido como frontera atmosférica,

$$T_o^{t+\Delta t} = T_o^t + 2 \cdot \Delta h \cdot \frac{\Delta Q}{\lambda_{\#}} \quad (32)$$

en donde Δh es la distancia entre el nodo ficticio y el nodo real, los otros términos fueron definidos anteriormente y ΔQ o flujo de calor se define mediante:

$$\Delta Q = \Delta Q_{atm} + \Delta Q_{ev} \quad (33)$$

donde " ΔQ_{atm} " es el flujo de calor por interacción del suelo con la atmósfera y " ΔQ_{ev} " el flujo de calor debido a la evaporación del agua. El flujo de calor por la interacción atmosférica se determina mediante:

$$\Delta Q_{atm} = -Q_{Ter} + Q_{sol} + Q_{con} + Q_{llu} \quad (34)$$

donde " Q_{Ter} " es el flujo de calor por la variación de temperatura, " Q_{sol} " es el flujo de calor por la radiación solar, " Q_{con} " el flujo por convección, y " Q_{Llu} " es el flujo por la lluvia. El flujo de calor por lluvia se calcula empleando la siguiente ecuación,

$$Q_{Llu} = -V_{Llu} \cdot C_w \cdot (T_{atm} - T_o) \quad (35)$$

En esta ecuación hay dos nuevas variables: " V_{Llu} " que simboliza la velocidad del flujo de agua que tiene la lluvia que se desee modelar y " T_{atm} " que representa la temperatura atmosférica o del aire.

Por su parte, el flujo de calor por radiación solar se calcula como:

$$Q_{sol} = \alpha \cdot RS \quad (36)$$

En esta ecuación " α " es la absorptividad del pavimento, y " RS " es la radiación solar que le llega a la superficie del pavimento.

Por su parte, el flujo de calor producido por la variación de la temperatura o " Q_{ter} ", se determina empleando la Ecuación 37, en donde las variables " $TSKY$ " y " Q_{HR} " son definidas en las Ecuaciones 38 y 39 respectivamente.

$$Q_{ter} = -Q_{HR} \cdot (TSKY - T_{atm}) \quad (37)$$

$$Q_{HR} = 4 \cdot \varepsilon \cdot k \cdot \left[\frac{T_{atm} + TSKY}{2} \right]^3 \quad (38)$$

$$TSKY = T_{atm} \cdot (0.770 + 0.0038 \cdot T_{Roc})^{0.25} \quad (39)$$

En las anteriores ecuaciones " ε " es la emisividad, " k " es la constante de Boltzman, y " T_{roc} " es la temperatura de rocío del ambiente, la cual calcula automáticamente el programa.

Por último, el cálculo del flujo de calor generado por convección o " Q_{con} ", se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$Q_{con} = Q_{HC} \cdot (T_{atm} - T_o) \quad (40)$$

En esta ecuación, el parámetro " Q_{HC} " corresponde a,

$$Q_{HC} = NU \cdot \frac{\lambda_w}{Lc} \quad (41)$$

donde " λ_w " es la conductividad térmica del agua, " Lc " es la longitud característica del material (dato de entrada al modelo) y " NU " es un parámetro dependiente de la velocidad del viento y la

temperatura, entre otros. Este último parámetro es calculado con distintas fórmulas que se basan en la magnitud de la velocidad del viento. La conductividad térmica del agua también es calculada por el programa partiendo de las condiciones de presión y temperatura, entre otros.

En la Figura 9.23 se muestra como interactúa el suelo o pavimento con la atmósfera. En esta figura se muestra un bosquejo de como fluye el calor por interacción atmosférica.

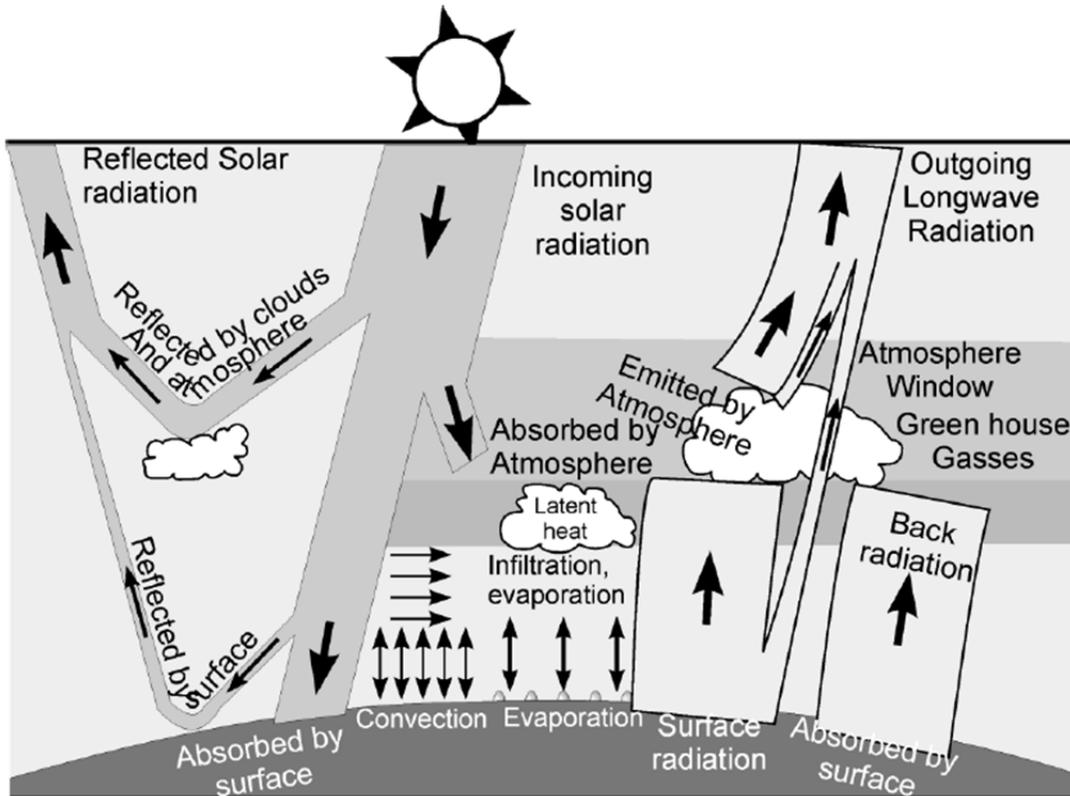


Figura 9.23. Bosquejo de la Interacción suelo atmósfera empleando en la condición de frontera atmosférica (tomado de Tristancho et al. 2010).

9.2.3. Algoritmos del módulo térmico

- **Subrutina TEMTRANS**

La primer subrutina que emplea este módulo es la TERMTRANS, la cual llama a las demás subrutinas que resuelven el problema térmico. Además, esta subrutina actualiza los valores calculados en cada ciclo de tiempo. El diagrama de flujo del procesamiento usado por esta subrutina es ilustrado en la Figura 9.24.

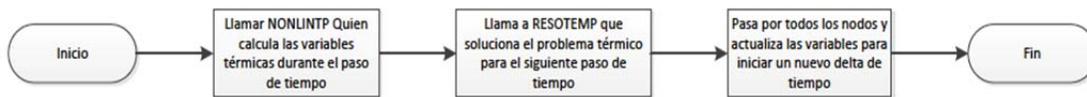


Figura 9.24. Diagrama de flujo de la subrutina TERMTRANS.

- **Subrutina NONLINTP**

La siguiente subrutina se llama NONLINTP y su función es calcular las constantes térmicas reales del material basado en su contenido de agua y aire, junto con el material que compone la capa de material. En esta subrutina se hace uso de las ecuaciones presentadas en la sección anterior. La Figura 9.25 presenta el diagrama de flujo correspondiente a esta rutina.

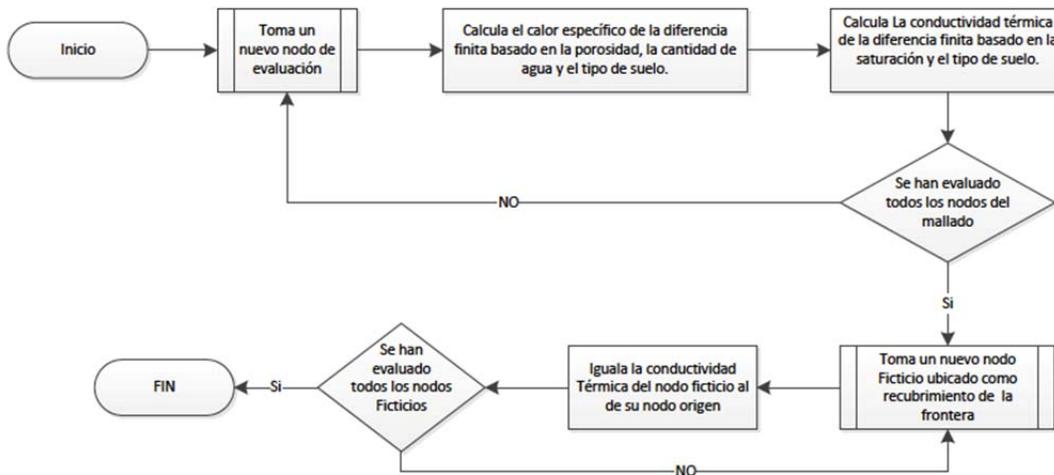


Figura 9.25. Diagrama del Flujo de la Subrutina NONLINTP.

- **Subrutina RESOTERM**

La siguiente subrutina se denomina RESOTERM y su función es resolver las ecuaciones térmicas y obtener la temperatura en cada nuevo ciclo (Figura 9.26). Esto lo logra por medio de las constantes térmicas calculadas anteriormente y las respectivas condiciones de frontera. Para su operación, esta subrutina llama a la subrutina CAPALIMITE cuando hay condiciones atmosféricas.

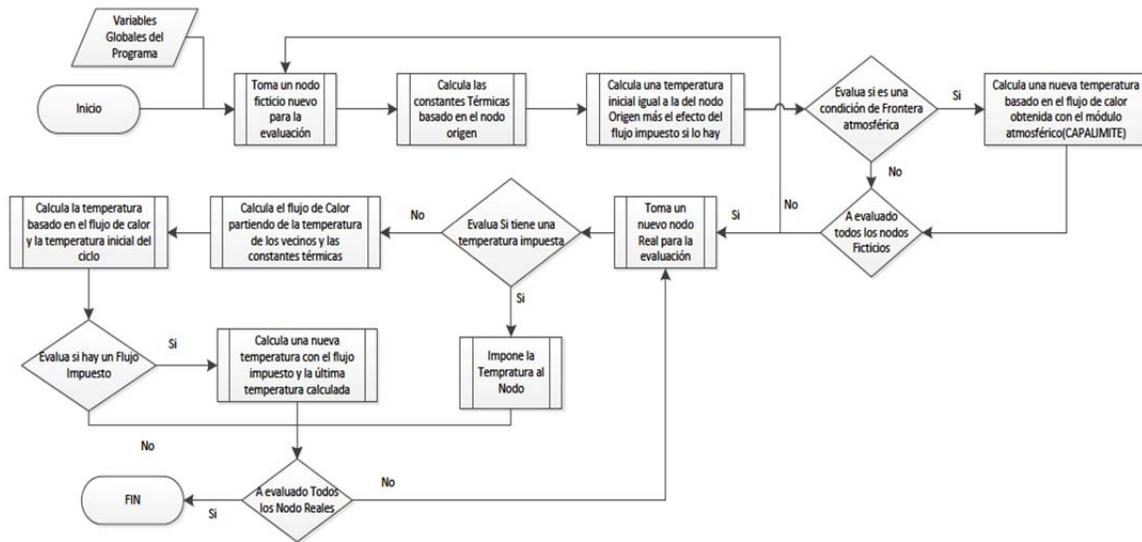


Figura 9.26. Diagrama del Flujo de la Subrutina RESOTERM.

- **Subrutina CAPALIMITE**

Por último, la subrutina CAPALIMITE modela la atmósfera y, partiendo de diferentes datos de entrada de las condiciones atmosféricas, devuelve el flujo de calor que se genera por la interacción entre el medio modelado y la atmósfera. El diagrama de flujo se muestra en la Figura 9.27.

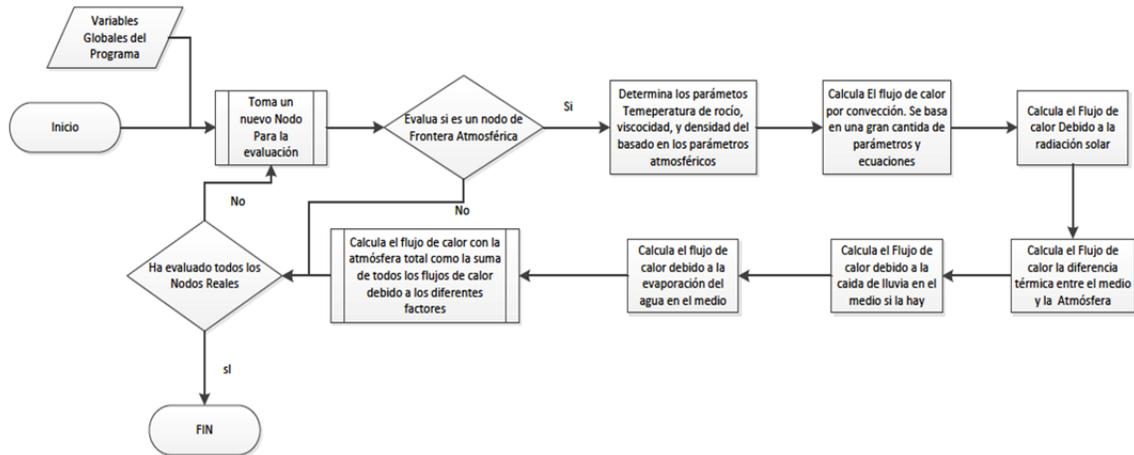


Figura 9.27. Diagrama del Flujo de la Subrutina CAPALIMITE.

9.2.4. Simulaciones basadas en el modelo térmico

La geometría del modelo planteado es el mismo empleado en las simulaciones realizadas con el modelo mecánico (Sección 9.1). Es decir, la estructura de pavimento corresponde a un tramo de 11 metros de largo, 3.5 metros de ancho y una profundidad total de 2 metros. El modelo tiene el mismo sistema multicapas mostrado en el módulo mecánico (sección 9.1.6) con los espesores listados en la Tabla 9.1. Sin embargo, para este modelo se necesitan parámetros diferentes para cada tipo de material con el fin de modelar la propagación de calor en el pavimento. Los parámetros usados para cada capa se muestran en la Tabla 9.16. Estos datos fueron estimados con el conocimiento que se tiene del tipo de material que conforma cada capa.

Tabla 9.16. Constantes Térmicas para cada Capa del Pavimento.

	Conductividad térmica W/(m ³ K)	Calor Específico J/(m ³ K)
MD-12 Asfalto modificado tipo III	1.70	1.30E+06
MAM-20 Asfalto modificado tipo V	1.80	1.30E+06
MD-20 convencional	1.80	1.30E+06
Material granular estabilizado con asfalto (MGEA)	1.60	1.00E+06
Granular remanente	1.50	7.95E+05
Suelo Natural de Sub rasante	0.25	8.37E+05

Para modelar la interacción entre la atmósfera y el pavimento se emplearon valores reales obtenidos de la estación meteorológica instalada en el punto de instrumentación de la calle 80 con Escuela Militar. Los datos que se emplearon en el modelo son: la temperatura del ambiente, la humedad relativa y la radiación solar. Los parámetros de velocidad del viento y presión atmosférica fueron supuestos con base en consideraciones típicas del clima de la ciudad.

Para realizar las simulaciones empleando este módulo, se modeló un día que tuviera valores promedio típicos de radiación solar y temperatura con respecto al resto de datos. Adicionalmente, como parte de las simulaciones se realizó un análisis de sensibilidad de la respuesta del sistema ante cambios en diversos factores climáticos. En total se hicieron cinco simulaciones, como se explica a continuación:

- En la primera simulación se emplearon valores reales obtenidos en la estación meteorológica en campo,
- En la segunda simulación se emplearon valores bajos de humedad,
- En la tercera simulación se emplearon valores bajos de radiación solar,
- En la cuarta simulación se emplearon valores bajos de temperatura ambiente, y
- En la última simulación se emplearon valores altos de velocidad del viento.

Estas simulaciones se realizaron para determinar la sensibilidad en la respuesta del pavimento ante cambios en las variables de entrada que determinan las condiciones atmosféricas de la zona circundante al pavimento.

Para garantizar que los valores iniciales de temperatura no afecten el resultado del modelo, se modelaron cinco días continuos de los cuales los cuatro iniciales sirven exclusivamente para estabilizar el modelo. Así, los resultados mostrados en las siguientes secciones corresponden únicamente a los del quinto día. Para garantizar que el modelo en efecto converja, se graficaron los perfiles de las 0:00 horas del día y el de las 24:00 horas del mismo día. Se supone que los dos perfiles deben ser muy similares ya que los días son cíclicos e iguales en cuanto a los parámetros de entrada. En algunas oportunidades fue necesario la modelación de más de cinco días para garantizar esta convergencia.

9.2.5. Resultados de las simulaciones

Como se mencionó anteriormente se realizaron cinco modelos, para los cuales se presentan los resultados a continuación. Para cada modelo se muestra como resultado varios perfiles de temperatura contra profundidad durante distintas horas de un día.

- **Simulación con parámetros obtenidos en campo (modelo base)**

En esta primera simulación se tomaron valores obtenidos del sistema de instrumentación en cuanto a temperatura ambiente, radiación solar y humedad relativa del ambiente. Estos valores varían con respecto al tiempo, como es natural, y se encuentran resumidos en el **Anexo 6**. La velocidad del viento fue estimada como 2.0 m/s y la presión atmosférica como 1 Atm. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 9.28.

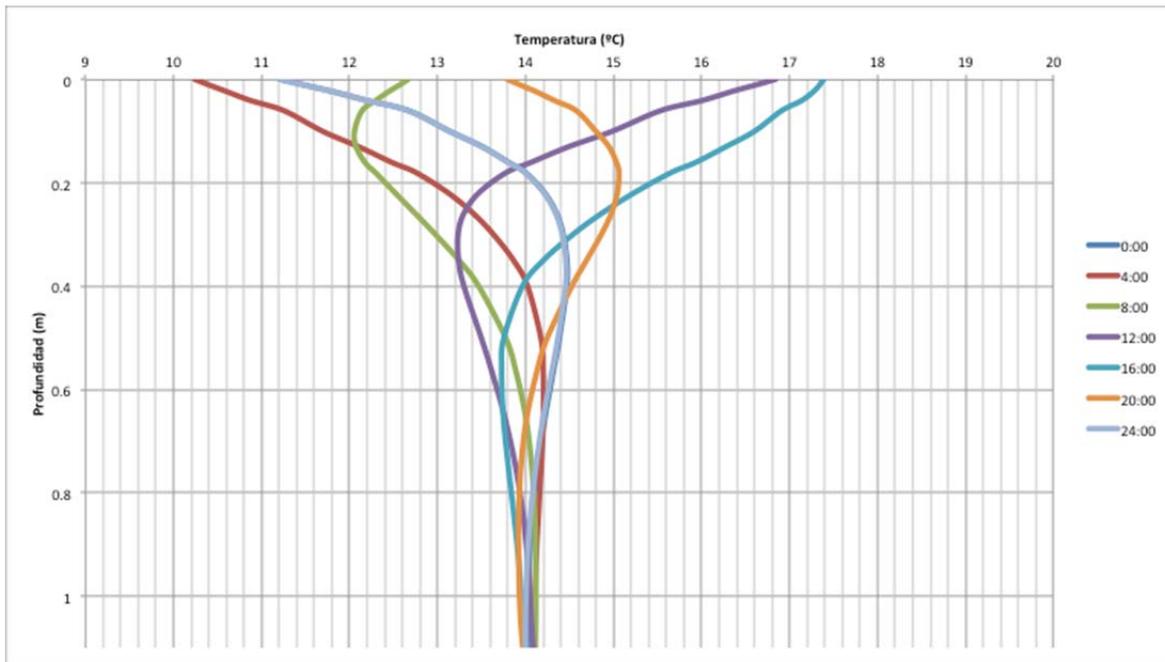


Figura 9.28. Perfil de temperatura para el día modelado.

- **Simulación con variación de la humedad relativa**

Para esta simulación se tomaron valores bajos de humedad. La humedad en todos los puntos temporales fue reducida un 70% del valor obtenido en campo. El resto de parámetros no se modificaron. El perfil de temperatura obtenido se muestra en la Figura 9.29. Para este modelo fue necesario modelar diez días continuos para garantizar la convergencia del mismo.

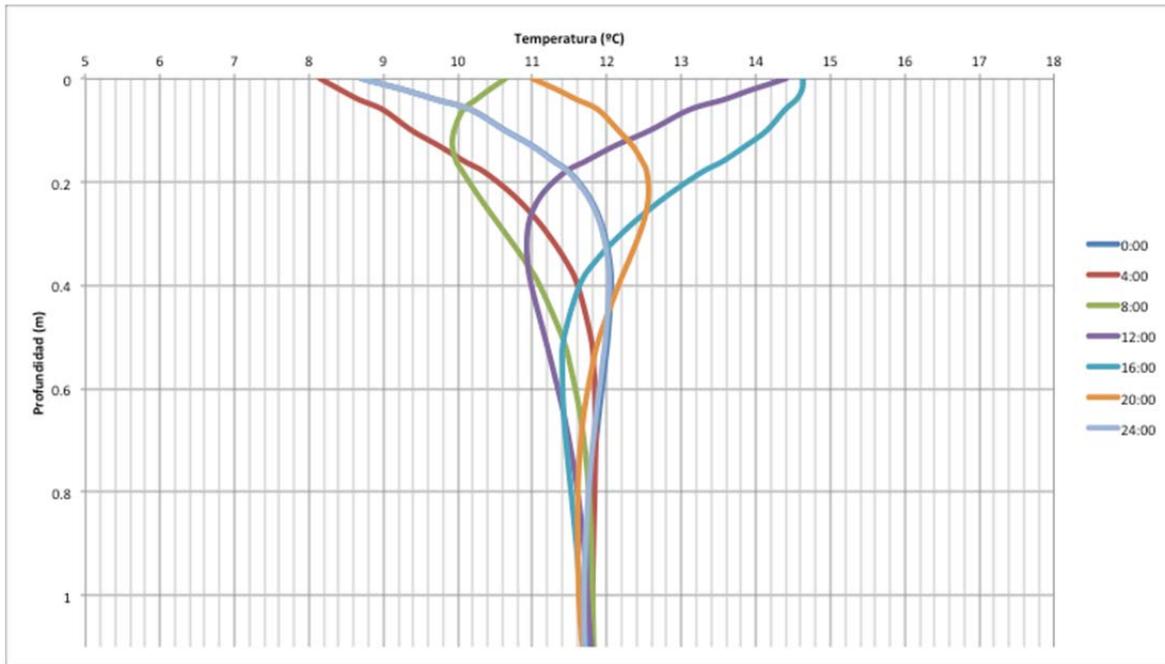


Figura 9.29. Perfil de temperatura para el modelo que reduce la humedad relativa

- **Simulación con variación de la radiación solar**

En este modelo se redujo la radiación en un 60% con respecto al día tomado. El resto de parámetros no se modificaron y fueron iguales a los empleados en el caso base. Los perfiles de temperatura obtenidos de esta simulación se muestran en la Figura 9.30.

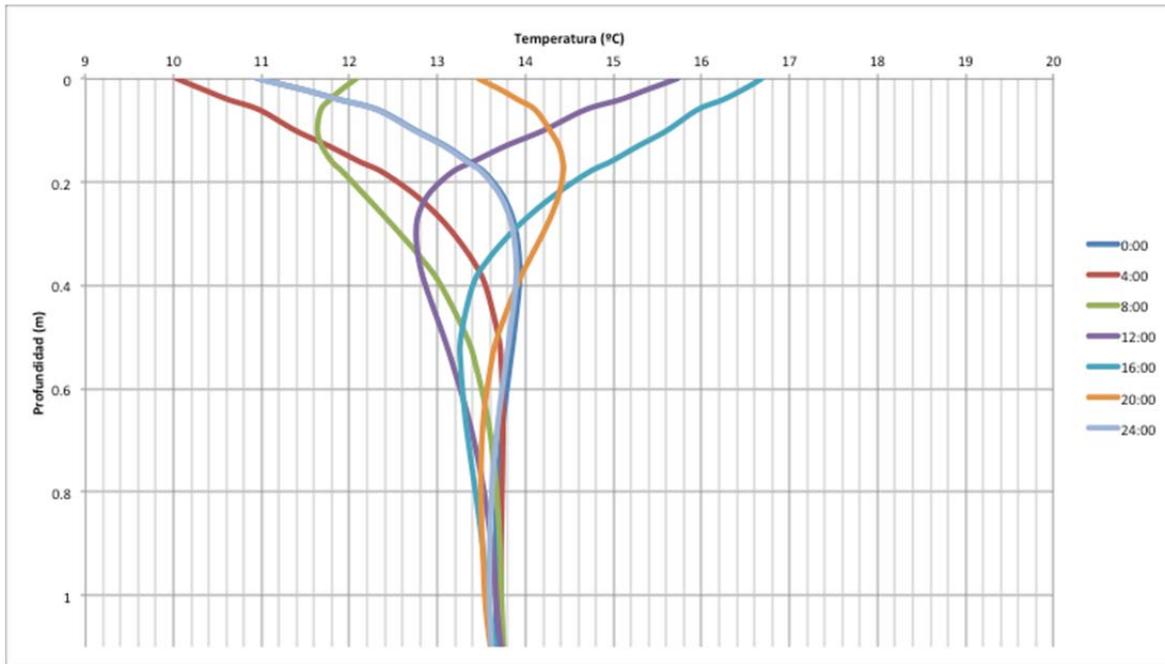


Figura 9.30. Perfil de Temperatura para el modelo que reduce la radiación solar.

- **Simulación con variación de la temperatura ambiente**

Para esta simulación se redujeron en 8°C todos los datos de temperatura del día contemplado. El resto de valores son iguales a los empleados en el caso base. La Figura 9.31 presenta los resultados obtenidos. En esta oportunidad, fue necesario realizar la modelación de 15 días para garantizar la convergencia del sistema.

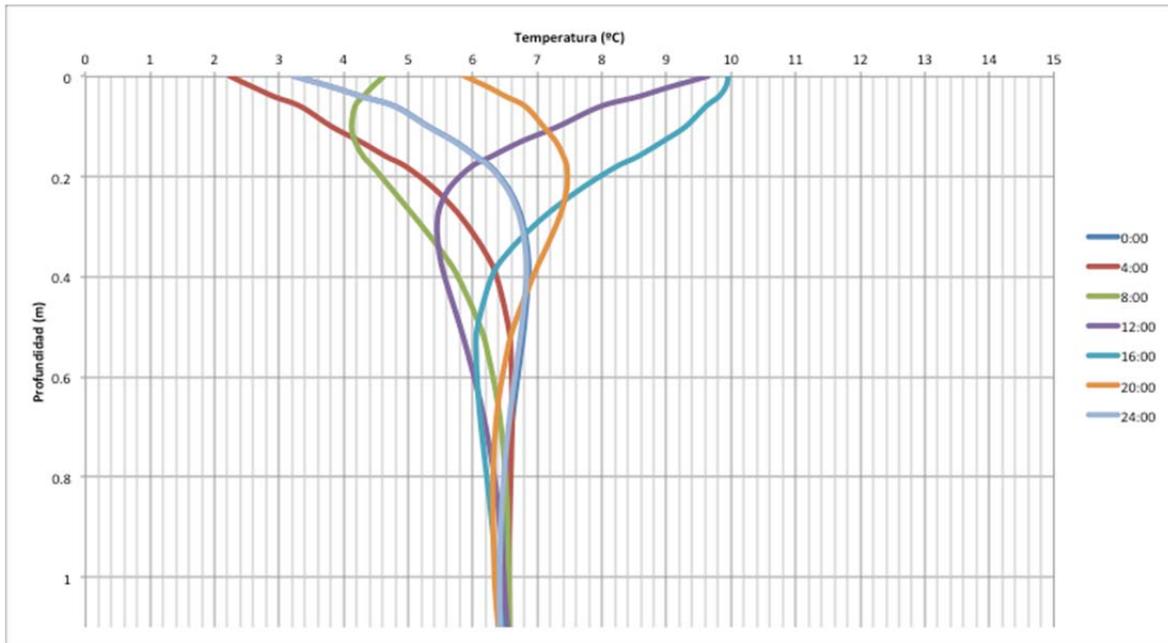


Figura 9.31. Perfil de Temperatura para el modelo que reduce la temperatura ambiente.

- **Simulación con variación de la velocidad del viento**

Para realizar esta simulación se aumentó la velocidad del viento en un orden de magnitud: de 2 m/s, que es el valor en el modelo base, a 20 m/s. La Figura 9.32 presenta los perfiles de temperatura obtenidos.

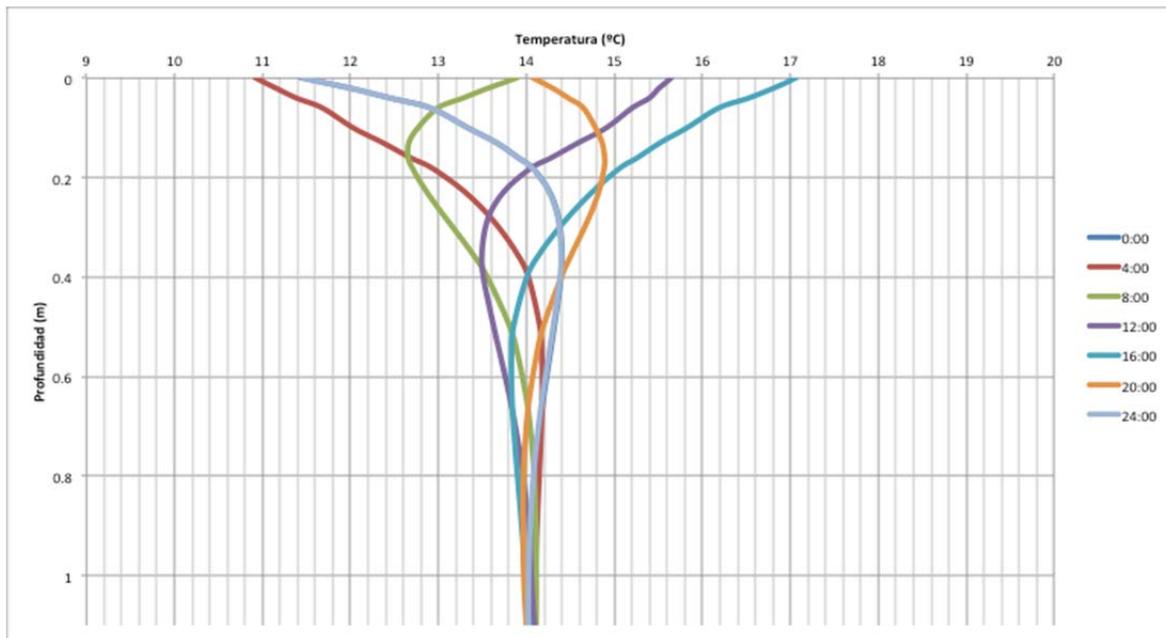


Figura 9.32. Perfil de temperatura para el modelo que aumenta la velocidad del viento.

9.2.6. Análisis de resultados

De manera general, se puede observar que en todas las simulaciones realizadas los valores de temperatura a altas profundidades no se ven afectadas ante cambios en la atmosfera. Este resultado coincide con los perfiles de temperatura que fueron encontrados para la estructura de pavimento mediante mediciones directas realizadas con termocuplas y reportadas en el Capítulo 7 (Figura 7.28). Efectivamente, después de un metro de profundidad es poco lo que cambia la temperatura a lo largo del día. Por esta razón las gráficas presentadas con anterioridad sólo se muestran hasta un metro de profundidad, aun cuando el modelo de pavimento simulado tiene un total de dos metros de profundidad.

No obstante esta observación, es interesante anotar que si los parámetros cambian varios días seguidos sí se alcanza a identificar una variación en el interior del pavimento. Esto se puede observar en la simulación en donde se disminuyó la humedad relativa o la temperatura ambiente. En estos modelos la temperatura en el interior convergió a valores más bajos que en todos los otros modelos. Sin embargo, esto sólo sucedió después de varios días de simulación, por lo que se concluye que en el interior la sensibilidad a los factores externos es muy baja, y solo si los cambios persisten varios días hay una variación apreciable en el interior.

En todos los casos, tal como era de esperarse, la temperatura más alta se encuentra en la superficie y se da a las 16:00 horas o 4:00 pm. Mientras los valores mínimos de temperatura se

obtienen en la superficie a las 4:00 a.m. Así mismo, se puede observar que el modelo es capaz de capturar el hecho de que en la superficie se encuentra la mayor variabilidad de la temperatura, debido a su proximidad con la atmósfera y con los cambios que en ella ocurren, mientras que en el interior los cambios son menos drásticos y toman más tiempo. Es decir, existe un retardo en la acción de estos cambios atmosféricos. Este “retardo”, que también fue analizado y explícitamente mostrado en la Figura 7.30 (Sección 7.3), se puede observar en todos los modelos: cuando el pavimento está en proceso de calentamiento en las horas de la mañana se observa que primero se incrementa la temperatura en la superficie y en menor medida en el interior, hasta que a nivel de subbase y subrasante estos cambios pierden relevancia. Posteriormente, cuando el pavimento comienza a enfriarse en el nivel superficial, el pavimento en su interior todavía conserva los valores de temperatura alcanzados en horas anteriores y, de hecho, alcanza temperaturas más altas que en la superficie. Esto evidencia una “inercia térmica” mayor en el interior del pavimento que en la superficie.

Por la razón anterior, el cambio de temperatura con respecto a la variación de la profundidad es mayor en la superficie, por lo cual los mayores cambios de temperatura se dan en las capas superiores del pavimento. Dado que la diferencia en la temperatura impacta fuertemente las propiedades mecánicas del pavimento y su correspondiente respuesta mecánica, es de esperarse cambios significativos en la respuesta del pavimento a lo largo de un día normal de servicio.

En cuanto al análisis de sensibilidad, se observó que la disminución de un 70% de la humedad relativa del ambiente causa una caída en la temperatura en todas las horas del día evaluadas. Esta disminución de la humedad relativa disminuye también la variabilidad interna de la temperatura, ya que los valores máximos y mínimos observados en la simulación son más cercanos entre sí. Adicionalmente, con este cambio en la humedad relativa se observa que las profundidades en las cuales se encuentran las distintas curvas de temperatura aumentan, por lo que se puede pensar que la disminución de esta propiedad causa también un aumento en la resistencia al cambio de temperatura del pavimento. Después de modelar varios días (10 días), se encontró que en el interior hay una temperatura menor con respecto a la simulación base que se realizó con los parámetros reales del día seleccionado.

Por su parte, la reducción de la radiación solar en un 70% causó una disminución menor en la temperatura en todas las horas del día. En el interior del pavimento se observó que la variación es baja aunque la zona en donde el pavimento se mantiene en valores casi constantes de temperatura ocurre más cerca a la superficie que en el caso del modelo base. Un efecto importante observado en este caso es la disminución de la variabilidad de la temperatura que tiene el pavimento a lo largo de la simulación. No obstante, el orden y, en un alto grado, la forma de los perfiles, son muy similares a los obtenidos en el día base.

En cuanto a la disminución de la temperatura ambiente, se observa que ésta genera una evidente caída en la temperatura del pavimento. En este caso se observó que además de la

disminución de la temperatura a todas las horas con respecto al modelo base, hay una mayor variabilidad en los resultados. En la simulación que contempló 15 días de modelación, se observa que en el interior sigue existiendo una variación de temperatura. Aunque los valores de temperatura son menores en todas las horas con respecto al modelo base, el movimiento de la curva temperatura en función de la profundidad es muy similar. Así mismo, se puede observar que la profundidad a la cual los perfiles de las diferentes horas convergen es aproximadamente la misma que en el modelo base.

Por último, se encontró que el aumento en la velocidad del viento no causa una variación en la temperatura promedio del día, ni tampoco causa un cambio en la profundidad donde se observa la convergencia de las diferentes curvas con respecto al modelo base, aun cuando la variabilidad de la temperatura disminuye de forma significativa. En este sentido, en este caso puede observar que los valores máximos y mínimos de temperatura están mucho más cerca en este modelo que con respecto al modelo base. Se observan también en la velocidad en la que ocurren el enfriamiento y el calentamiento en la superficie del pavimento y en el interior del mismo, en comparación con el caso base. Esto se evidencia en las gráficas de 20:00 horas (8:00 pm) y las 8:00 horas (8:00 am) en donde es claro que los perfiles están mucho más cerca entre sí e incluso se tocan prácticamente en la superficie. Esto muestra que el calentamiento es más lento y el enfriamiento es más rápido, ya que el punto donde se tocan se da a una temperatura más fría que la temperatura en que normalmente se encuentra el promedio de estas dos curvas.

En general, se puede concluir que el modelo térmico desarrollado es capaz de integrar apropiadamente las condiciones atmosféricas para producir fenómenos de difusión de temperatura al interior del pavimento. Los resultados del caso base sirvieron para validar la calidad general del modelo y los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad sirvieron para determinar el impacto que tiene el cambio en las condiciones atmosféricas. Estos resultados son importantes puesto que muestran que el modelo puede ser fácilmente empleado para establecer los cambios térmicos esperados en diferentes zonas de la ciudad y determinar si estos cambios pueden impactar de forma significativa el desempeño y respuesta mecánica del pavimento.

9.3. Acoplamiento de los módulos mecánico y térmico

En las secciones 9.1 y 9.2 de este documento se explicaron en detalle los módulos mecánico y térmico que fueron desarrollados como parte de un modelo numérico integral del comportamiento del pavimento. En las mismas secciones, se mostraron los resultados de algunas simulaciones iniciales y se determinó la validez general de los dos módulos. Por lo tanto, la etapa final consiste en realizar un acoplamiento de la respuesta termo-mecánica del pavimento. El principio básico del acoplamiento es que el modelo mecánico no supone que los valores de módulo al interior de cada una de las capas asfálticas de la estructura son

constantes, sino que éstas cambian acorde con las condiciones ambientales que existan en el momento de aplicación de la carga. En otras palabras, las propiedades mecánicas de las capas asfálticas del pavimento varían en función de los perfiles térmicos mostrados como parte de los resultados de la sección anterior.

9.3.1. Simulaciones acopladas

En esta sección se presentan los resultados de un ejemplo de acoplamiento realizado para el pavimento flexible instrumentado en la Calle 80 que es sujeto a las condiciones ambientales descritas por el *caso base* de la sección anterior.

La estructura de pavimento empleada en las simulaciones es la misma que la empleada en las simulaciones realizadas en la secciones 9.1 y 9.2. En este caso, se realizó la modelación del paso de un eje simple con llantas duales (como el eje central y trasero de un bus uni-articulado de Transmilenio) con dos tipos de carga diferentes, las cuales son aplicadas en dos momentos del día diferentes, tal como se explica en la Tabla 9.17.

Tabla 9.17. Modelaciones acopladas analizadas

Carga	Hora del día	
	8:00 am	4:00 pm
12 ton	X	X
14 ton	X	X

Nótese que en la Sección 9.1 las propiedades de los materiales eran independientes las condiciones ambientales del pavimento (que resultan de las condiciones ambientales externas al pavimento). En este caso, por el contrario, las propiedades de los materiales asfálticos varían en función de la temperatura que existe en el material. Así, es de esperarse que la respuesta mecánica del pavimento ante una carga de 12 ton sea diferente cuando esta es aplicada a las 8:00 am que cuando esta es aplicada a las 4:00 pm.

Para determinar la forma en que la temperatura afecta las propiedades de los diferentes materiales asfálticos presentes en el pavimento, se empleó información de resultados típicos de módulo dinámico realizados sobre estos materiales en los laboratorios de Ingeniería Civil de la Universidad de Los Andes. Esta información también fue empleada en el siguiente capítulo, en donde se explica en mayor detalle la obtención y empleo de esta información. En todos los casos, al igual que en la sección 9.1., se supuso que la velocidad promedio a la que transita el eje (o el bus) sobre el pavimento equivale a una frecuencia de 8 Hz, y por lo tanto se emplearon los valores promedio de módulos a esta frecuencia. La Figura 9.33 presenta el cambio en las propiedades de las primeras cuatro capas del pavimento en función de la temperatura. En esta

figura se señala la frecuencia seleccionada de 8 Hz empleada para obtener los valores de módulo de los materiales.

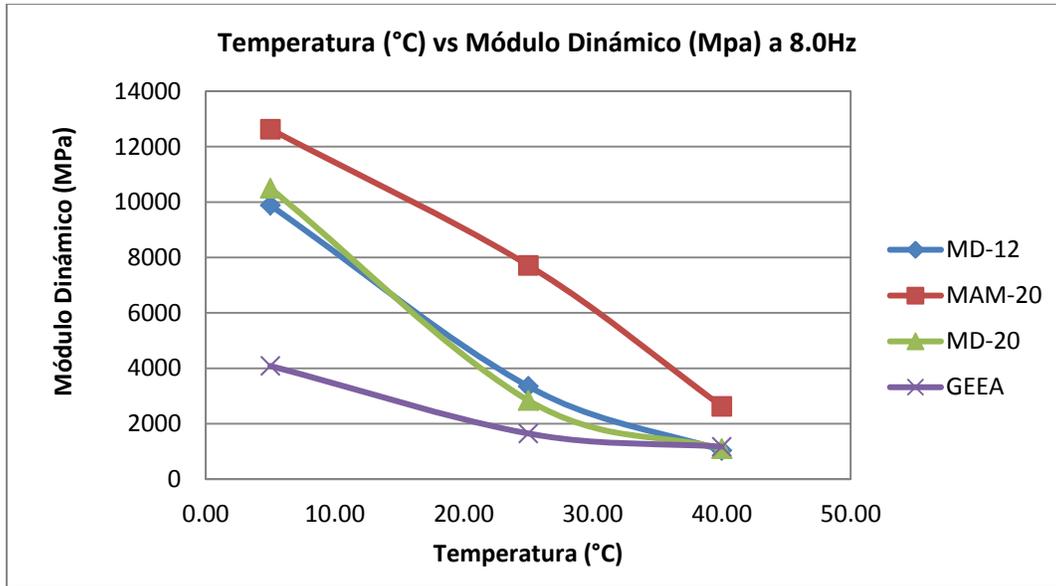


Figura 9.33. Valores de módulo de los diferentes materiales asfálticos en función de la temperatura.

9.3.2. Resultados de las simulaciones

De las simulaciones realizadas se extrajeron los parámetros de principal interés en la ingeniería de pavimentos: deformación máxima a tensión en la parte inferior de las capas asfálticas y la deformación vertical a compresión máxima en la parte superior de la subrasante. Al igual que se explicó en la Sección 9.1., en todos los casos se analizó la respuesta en todas las interfaces y en tres nodos de interés en una misma capa: en el centro de una llanta, en el borde de una llanta y en el centro entre las dos llantas. Por brevedad, sólo se presentan los valores de deformación mencionados con anterioridad, aun cuando el modelo provee la información de la respuesta mecánica en todos los nodos del modelo a través de todo el tiempo de la simulación. La Tabla 9.18 presenta la consolidación de los resultados.

Tabla 9.18. Resumen de resultados relevantes del modelo acoplado para un eje simple con llantas duales.

	Carga			
	12.0 ton		14.0 ton	
	8:00 am	4:00 pm	8:00 am	4:00 pm
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la carpeta de rodadura o MD-12 (ϵ_t)	3.413.E-07	3.723.E-07	3.987.E-07	4.354.E-07
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 2 o MAM-20 (ϵ_t)	7.636.E-07	8.806.E-07	8.907.E-07	1.029.E-06
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 3 o MD-20 (ϵ_t)	2.431.E-06	2.563.E-06	2.847.E-06	3.000.E-06
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 4 o granular estabilizada con asfalto (ϵ_t)	3.679.E-06	3.750.E-06	4.286.E-06	4.393.E-06
Deformación máxima vertical en la parte superior de la subrasante (ϵ_z)	1.048.E-05	1.195.E-05	1.220.E-05	1.398.E-05

Adicionalmente, la Figura 9.34 muestra los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos verticales (dirección “y”) para el nodos ubicado en el centro de unas de las llantas para la simulaciones realizadas empleando una carga de 12 Ton a las dos diferentes horas del día. Se escoge la parte inferior de la segunda Capa (MAM-20) debido a su importancia y porque en este punto hay una alta diferencia de temperaturas. En la Tabla 9.19 se muestra información anterior en términos de variación porcentual de como cambian los datos a las 4:00 PM con respecto a los de las 8 AM.

Tabla 9.19. Resumen de la variación porcentual de los resultados relevantes del modelo acoplado para un eje simple con llantas duales.

	$\Delta\%$ para 12 Ton	$\Delta\%$ para 14 Ton
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la carpeta de rodadura o MD-12 (ϵ_t)	8.32%	8.42%
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 2 o MAM-20 (ϵ_t)	13.28%	13.44%
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 3 o MD-20 (ϵ_t)	5.15%	5.10%
Deformación máxima a tensión en la parte inferior de la capa asfáltica 4 o granular estabilizada con asfalto (ϵ_t)	1.89%	2.43%
Deformación máxima vertical en la parte superior de la subrasante (ϵ_z)	12.30%	12.73%

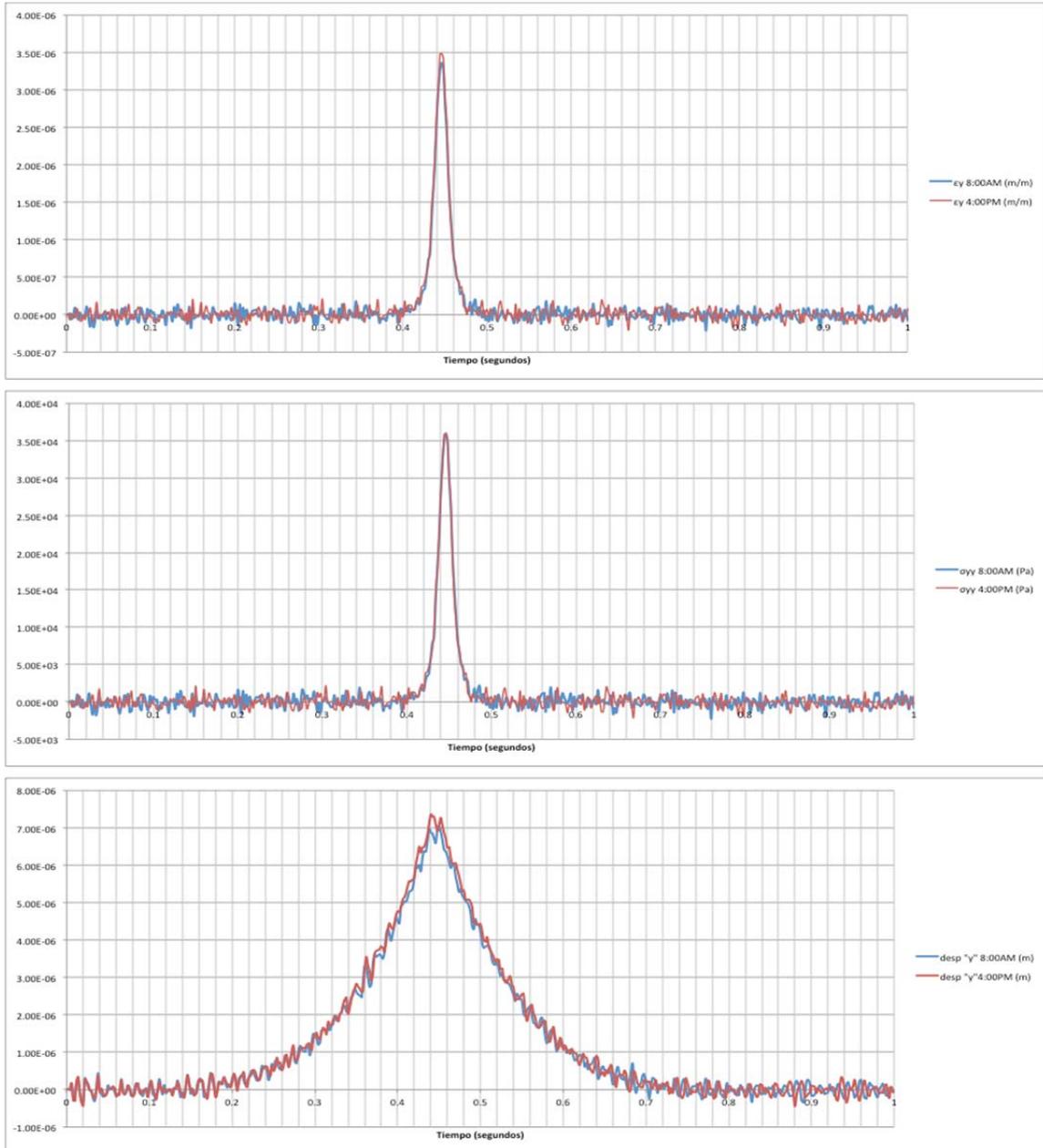


Figura 9.34. Deformaciones, esfuerzos y desplazamientos verticales para el nodos ubicado bajo el centro de una de las llantas de la interface de las capas 2 y 3

9.3.3. Análisis de resultados

Los resultados presentados en la sección anterior permiten observar el impacto que tienen las condiciones térmicas al interior del pavimento en la respuesta mecánica de la estructura. Debido a que las condiciones térmicas al interior del pavimento resultan de los cambios ambientales en la zona circundante al pavimento, lo que se observa en estos resultados de forma indirecta es cómo el clima de una zona impacta la respuesta del pavimento.

De la Tabla 9.19 se puede concluir que los cambios en los esfuerzos de tensión en la base de las capas asfálticas se encuentran en un rango entre un 1.89% y un 13.28% cuando la carga se aplica a las 8:00 am a cuando la carga de 12 ton se aplica a las 4:00 pm. Estos porcentajes de cambio son similares cuando la carga que se aplica es de 14 ton. Así mismo, se observa una variación de la deformación vertical en la parte superior de la subrasante, parámetro que, como se explicó en un capítulo anterior, se relaciona con la susceptibilidad al ahuellamiento del pavimento del 12.3% cuando la carga de 12 ton se aplica a las 8:00 am o a las 4:00 pm. Estos resultados son significativos porque evidencian como los cambios en las propiedades de los materiales que resultan de cambios ambientales afectan significativamente la respuesta y el desempeño de la estructura.

A manera de conclusión general, con las modelaciones realizadas se demostró que es posible acoplar el efecto de las condiciones térmicas del pavimento con la respuesta mecánica del mismo. Es importante mencionar que en todos los modelos considerados en este capítulo se supuso una estructura flexible similar a la existente en el punto de instrumentación de la Calle 80 con Escuela Militar. No obstante, el programa está en capacidad de recibir cualquier tipo de estructura (por ejemplo, de pavimento rígido) para realizar análisis similares a los presentados en esta sección.

10. Comparación de los Resultados de Campo con los Obtenidos de un Programa Elástico Multicapa

Con el objetivo de comparar los datos de deformación capturados en campo con un referente computacional de uso frecuente, se empleó el programa Alizé-LCPC destinado al análisis mecánico de pavimentos. Para esto, se compararon los valores de deformaciones máximas (a tensión y verticales) en las estructuras de pavimento en los puntos de interés de la estructura con aquellos reportados en los tramos de instrumentación.

10.1. Simulaciones en pavimento flexible

El programa elástico multicapa **Alizé** utiliza el método racional o mecanicista de análisis elaborado por el LCPC y el SETRA. Para este trabajo se consideró la estructura de pavimento flexible del tramo instrumentado en la Calle 80, el cual se empleó también en las modelaciones realizadas en el Capítulo 9. Como se mencionó con anterioridad, en este análisis se busca comparar los datos de deformación a tensión horizontal (en dirección XX y YY) de las capas asfálticas en la parte inferior de las mismas, y las deformaciones verticales (en dirección ZZ) para la capa de subbase y subrasante en la parte superior de cada una, tal como se muestra en la siguiente figura.

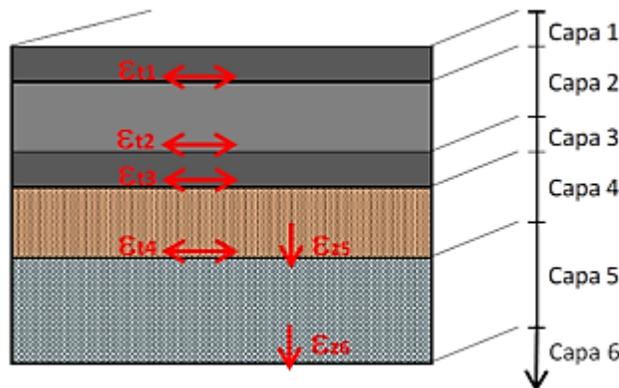


Figura 10.1. Deformaciones de interés estructura de pavimento flexible

Los valores de deformación obtenidos con ayuda del programa Alizé LCPC se obtuvieron en los siguientes puntos específicos (Tabla 10.1). Cabe resaltar que debido a la posición de los sensores en campo, la comparación de las deformaciones registradas por los instrumentos de captura con los resultados obtenidos con Alizé sólo se puede realizar para las Capas 1 y 2.

Tabla 10.1. Puntos de medición de deformación estructura pavimento flexible

No. Capa	Capa	Material	Espesor (m)	Puntos de medida de deformaciones (m)
1	Rodadura	MD-12 (asfalto modificado)	0.09	0,09
2	Intermedia	MAM-20	0.12	0.21
3	Intermedia	MD-20 convencional	0.08	0.29
4	Base	Material granular estabilizado con asfalto	0.25	0.54
5	Material remanente	Granular remanente	0.55	0.55
6	Subrasante	Suelo Natural	infinito	0.11

10.1.1. Metodología de análisis

A partir de información relacionada a las diferentes sollicitaciones de carga inducida por el paso de los vehículos de Trasmilenio a lo largo del día y de la posible variación del módulo de los materiales (debido a la velocidad de los vehículos y de los cambios en la temperatura en los diferentes puntos que comprenden la estructura del pavimento, entre otros), se evaluaron diferentes escenarios. El objetivo de estas simulaciones es obtener rangos de deformación máxima en las diferentes capas de material. Estos valores de base se emplearán para comparar los datos obtenidos con ayuda de los instrumentos de medición.

Para realizar las simulaciones, se requieren los valores de módulo de todos los materiales de la estructura. La información original de los módulos empleados por el diseñador del pavimento se desconocen. Sin embargo, aun conociendo estos datos, es necesario considerar que los módulos de los materiales cambian sustancialmente en función de las condiciones de temperatura y humedad de los materiales que comprenden la estructura del pavimento. Por este motivo, se empleó la información reportada por Acelas (2012) de valores típicos de módulo dinámico para diferentes mezclas asfálticas de uso común en el país. De esta forma, se determinaron los valores de los módulos de los materiales que componen las 3 primeras capas de la estructura. Para la capa 4 se realizó el mismo procedimiento pero con base en la información encontrada en el Informe Final del “Estudio de la Resistencia a la Erosión de Materiales Empleados como Base en Pavimentos de Concreto Hidráulico” presentado por la Universidad de los Andes al IDU en el año 2009.

10.1.2. Determinación de la frecuencia de aplicación de carga

Es necesario señalar que con el ánimo de establecer una velocidad promedio del paso de los vehículos de Trasmilenio más realista, para las simulaciones a realizar mediante Alizé, y

algunas otras comparaciones entre la información capturada en campo y los valores obtenidos por el método tradicional de diseño mecanicista, se identificaron lecturas “limpias” de paso de vehículos” en diversos periodos del día (4 horas representativas de 4 estados generales de condiciones ambientales distintas), para las cuales se procedió a deducir la velocidad de paso por los sensores de carga (WIM). La Figura 10.2 presenta un resultado típico de dichas lecturas, en donde se puede identificar con precisión la carga aplicada por cada uno de los tres ejes de un bus articulado.

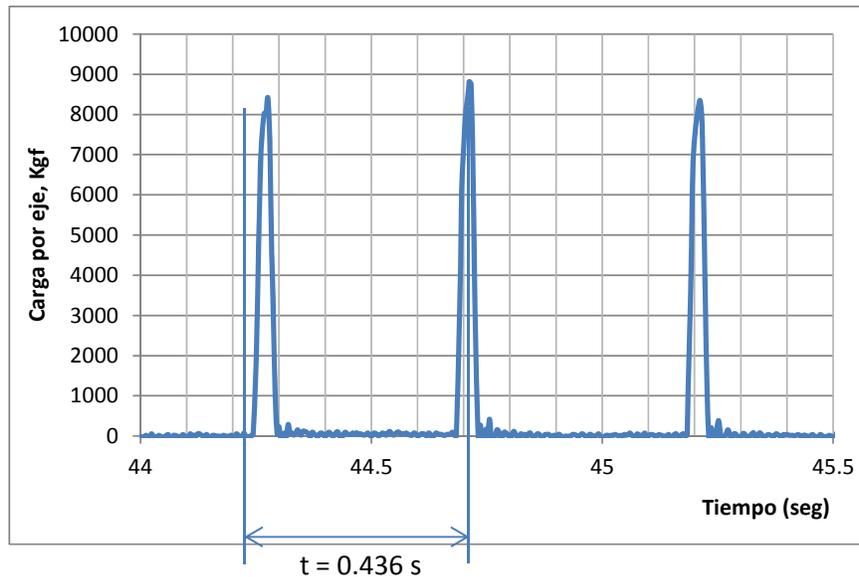


Figura 10.2. Lecturas de carga por eje y tiempo para obtención frecuencia

Como parte de la metodología de estudio es necesario determinar la frecuencia a la que pasan los vehículos. Esto con el objetivo de identificar los valores de módulo dinámico correspondientes a esa frecuencia de aplicación de carga. Para esto, se estimó la velocidad promedio de un bus, de la siguiente manera,

$$V = \frac{d}{t} \text{ en } \left[\frac{m}{s} \right] \quad \text{ó} \quad V = \frac{3.6 d}{t} \text{ en } \left[\frac{Km}{h} \right] \quad (1)$$

en donde:

- V*: Velocidad de paso promedio de los buses de Transmilenio, Km/h.
- d*: Distancia entre ejes de referencia (entre el eje simple direccional y el eje central), 5.85 m (Figura 10.3).
- t*: Tiempo leído en el perfil de carga, requerido para capturar los ejes de referencia, s (Figura 10.2).

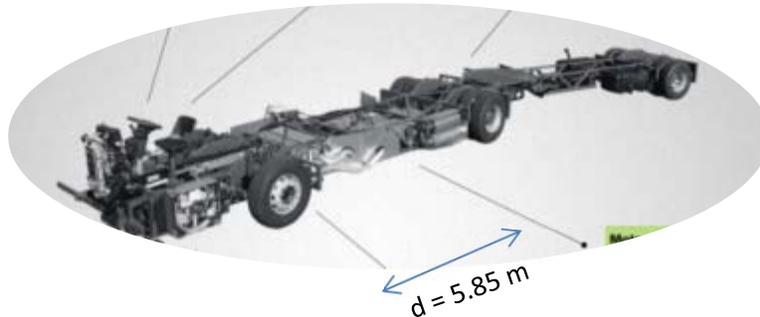


Figura 10.3. Tren de carga articulados Transmilenio

Con esta información se pudo estimar la velocidad promedio de paso de vehículos, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 10.2.

Tabla 10.2. Datos utilizados para obtención velocidad promedio.

Promedio del día	Velocidad promedio (Km/h)
Mañana	49.3
Medio día	43.6
Tarde	50.1
Noche	48.3
Promedio	48 Km/h

Por lo tanto, la velocidad promedio de los vehículos obtenida a partir de lecturas de carga válidas seleccionadas aleatoriamente, es de 47.83 Km/h, la cual equivale aproximadamente a una frecuencia de 8 Hz.

10.1.3. Determinación módulos a partir de perfiles de temperatura típicos

Como se mencionó con anterioridad, los valores de los módulos dinámicos de las capas asfálticas en función de la temperatura se realizó con base en información recopilada de módulos dinámicos promedio para diversos materiales equivalentes a los existentes en la estructura de pavimento. Dado que el módulo dinámico se determina para frecuencias de aplicación de carga de 4.0 Hz, 10.0 Hz y 16.0 Hz, se realizaron regresiones que permitieran obtener los valores de módulo para la frecuencia de 8.0 Hz. Los resultados de esta información e muestran a continuación.

- **MD-12.**

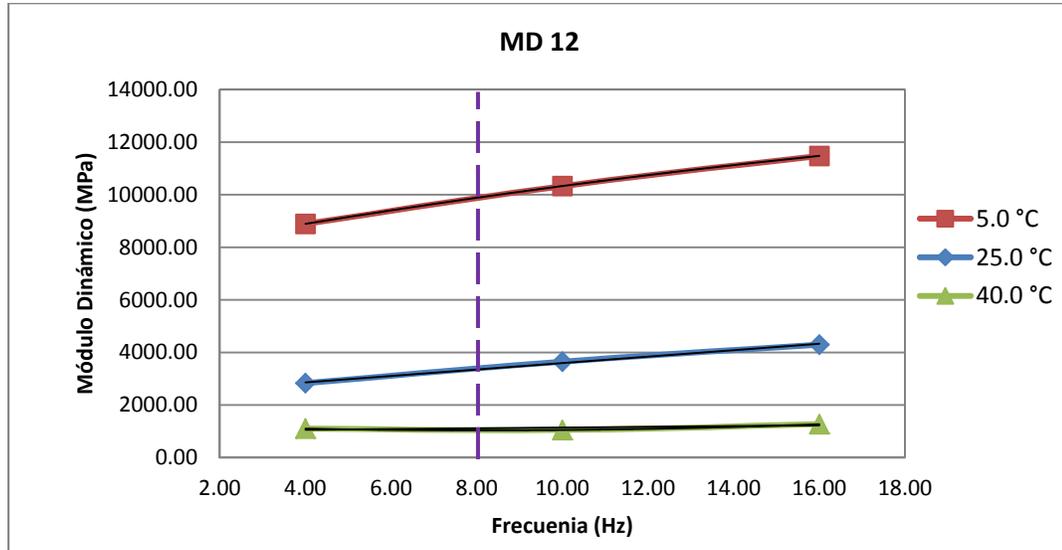


Figura 10.4. Módulo en MPa vs. frecuencia promedio para una mezcla MD-12⁵.

- **MAM-20**

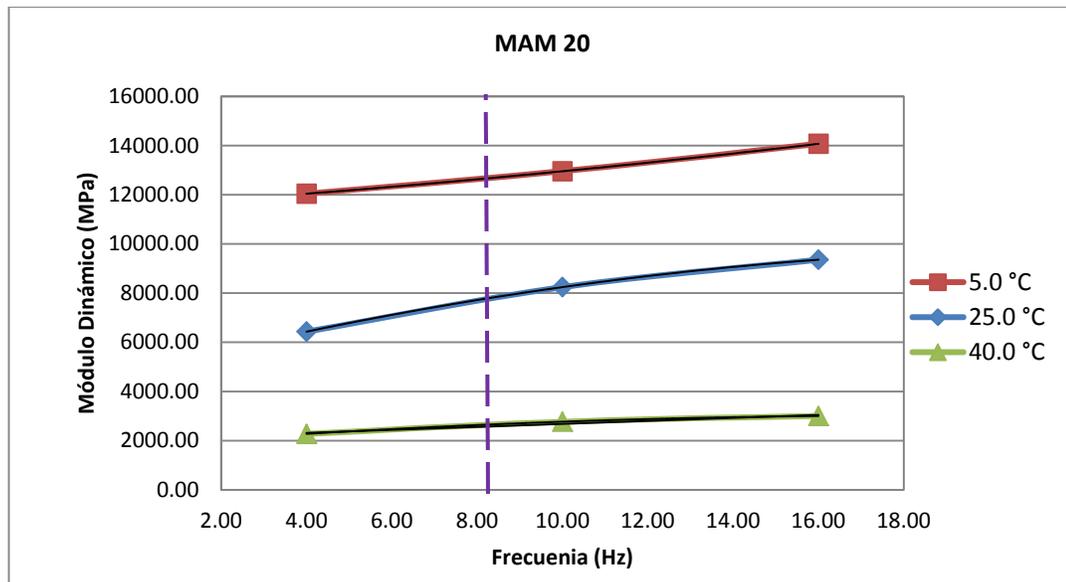


Figura 10.5. Módulo en MPa vs. Frecuencia para MAM-20.

⁵ nota: se empleó el información del material sin modificar debido a la ausencia de información de mezclas modificadas, esto supuesto genera una situación más conservadora en el análisis puesto que es un escenario más desfavorable al real

- **MD-20**

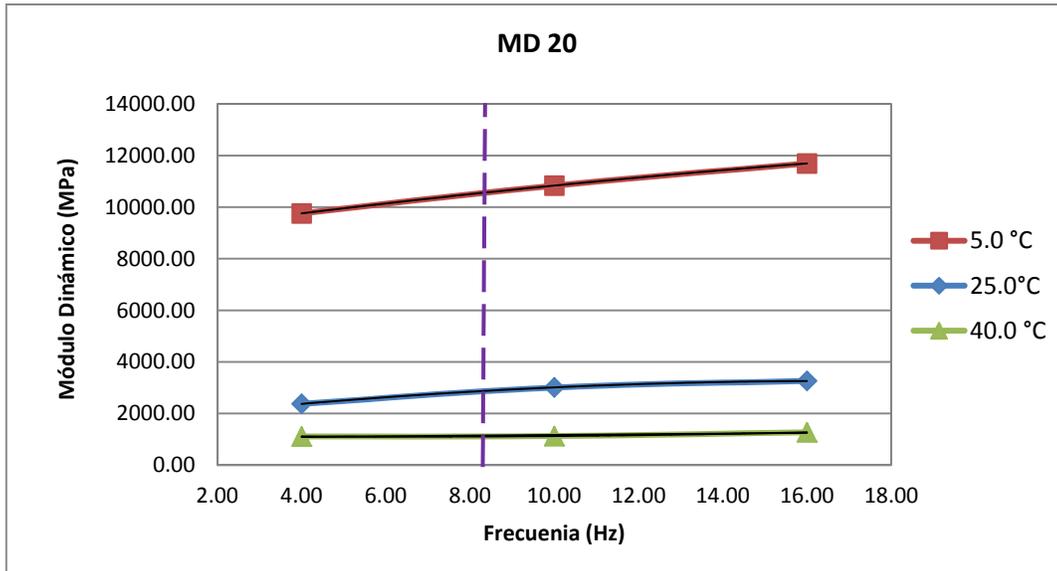


Figura 10.6. Módulo en MPa vs. Frecuencia para MD-20.

- **Material Granular estabilizado con asfalto GEEA**

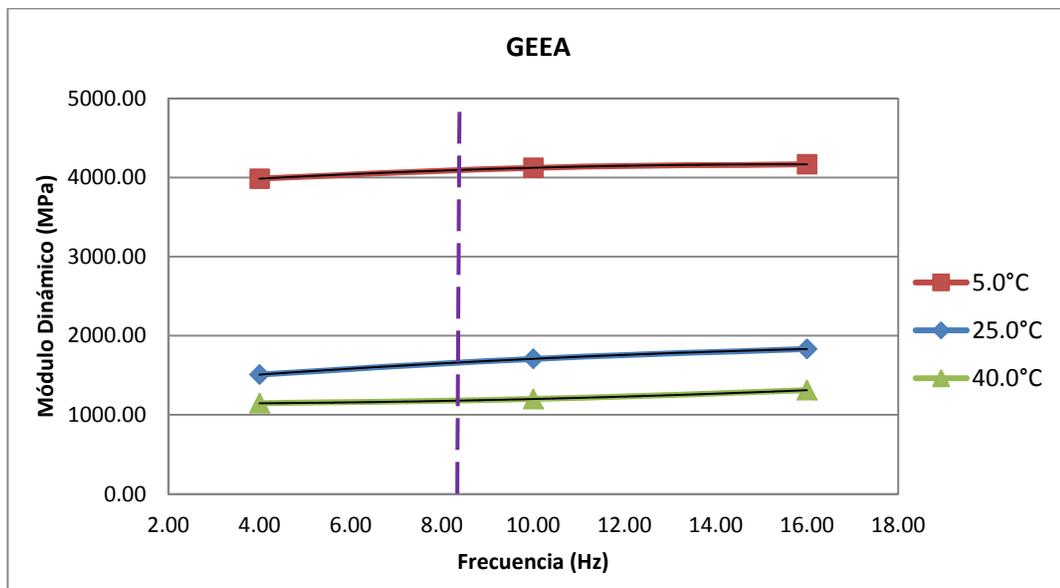


Figura 10.7. Módulo en MPa vs. Frecuencia para GEEA.

Con los valores de módulo para cada uno de los materiales se obtuvo el valor del mismo para tres perfiles de temperatura registrados por el sistema de instrumentación para una semana típica (perfil frío, perfil medio y perfil caliente, semana del 16 al 22 de abril de 2012). Las temperaturas usadas para cada capa corresponden a la temperatura en el centro de la misma. En otras palabras, para cada uno de los perfiles mencionados (Figura 10.8) se determinó la temperatura en la mitad de cada capa. Este valor, que se supuso representativo de toda la capa, con lo cual se emplearon las gráficas anteriores para determinar el valor del módulo del material a 8Hz.

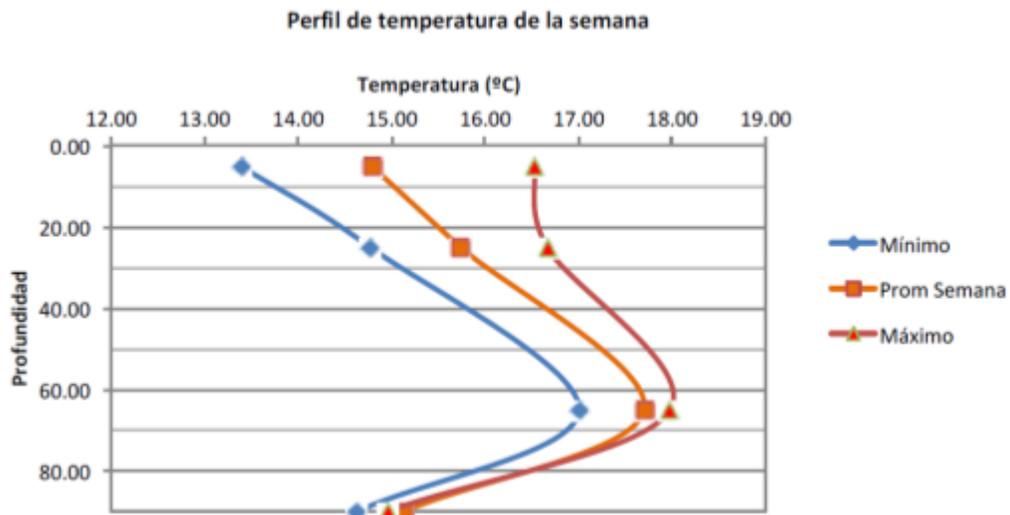


Figura 10.8. Perfiles frío, medio y caliente en la estructura de pavimento flexible de la Calle 80 de una semana típica.

La Figura 10.9 presenta los valores de módulo dinámico promedio típicos de los materiales de interés en función de la temperatura, para una frecuencia de 8 Hz. Con base en esta información y en los perfiles mostrados en la Figura 10.8, se determinaron los valores de módulo de los materiales que corresponden a los diferentes perfiles. Las Tablas 10.3 y 10.4 muestran estos resultados.

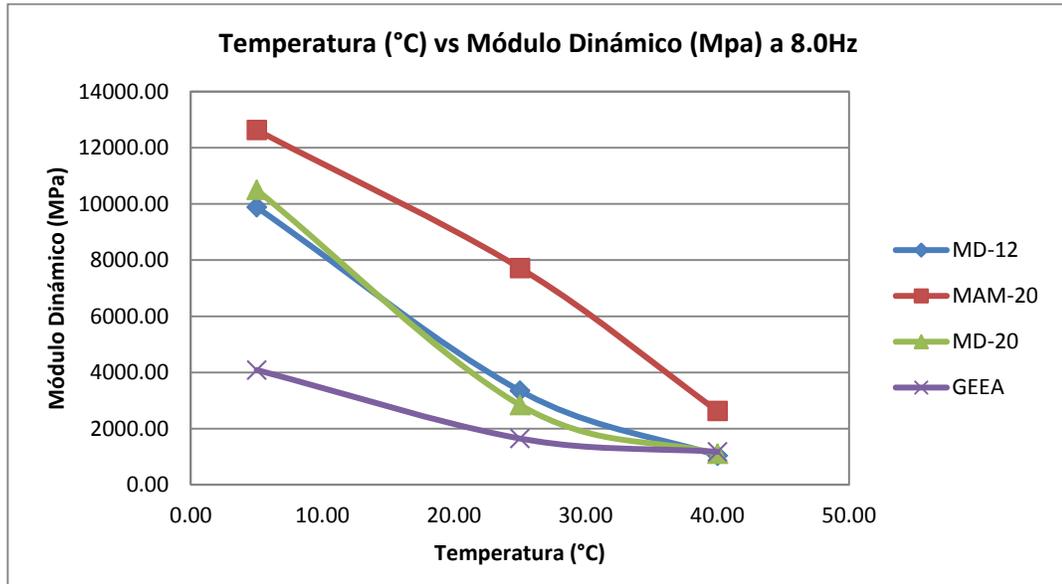


Figura 10.9. Comportamiento materiales asfálticos a diferentes temperaturas a 8.0Hz.

Tabla 10.3. Valores de Temperatura (°C) y Módulo (MPa) para perfiles de temperatura para MD-20 y GEEA.

Perfil	MD-12		MAM-20	
	Temperatura (°C)	Módulo (MPa)	Temperatura (°C)	Módulo (MPa)
Frío	13.4	6659.66	14.20	10634.44
Medio	14.8	6190.0	15.4	10341.02
Caliente	16.5	5645.67	16.5	10065.31

Tabla 10.4. Valores de Temperatura (°C) y Módulo (MPa) para perfiles de temperatura para MD-20 y GEEA.

Perfil	MD-20		GEEA	
	Temperatura (°C)	Módulo (MPa)	Temperatura (°C)	Módulo (MPa)
Frío	14.0	5946.4	16.1	2480.1
Medio	15.9	5569.6	17.0	2377.6
Caliente	16.7	5279.2	17.5	2332.5

10.1.4. Cargas empleadas en las simulaciones

En cuanto a la carga a aplicar a la estructura, de forma semejante a lo realizado en las modelaciones ejecutadas en el Capítulo 9, se tuvieron en cuenta los diferentes tipos de ejes de

un bus articulado, así como los valores de carga registrados por las balanzas de medición de carga tipo WIM. De esta forma, para el eje delantero (eje simple, llanta simple) se tomaron cuatro casos de carga, mientras que para los ejes central y trasero (eje simple, llanta dual) se tomaron cinco casos diferentes de carga. Las cargas seleccionadas se muestran a continuación y se establecieron a partir de los espectros de carga presentados en el capítulo 7 (cargas desde 5.0 ton hasta 13.0 ton para los ejes direccionales y de 9.0 ton hasta 18.0 ton para los ejes duales). Los casos de estudio se muestran en las Tablas 10.5 y 10.6.

Tabla 10.5. Casos de carga para eje direccional.

No. Caso	Referencia	Tipo de Eje	Carga (Ton)
1	EDir1	Simple direccional	6.0
2	EDir2	Simple direccional	8.0
3	EDir3	Simple direccional	10.0
4	EDir4	Simple direccional	12.0

Tabla 10.6. Casos de carga para eje simple con llantas duales (central o trasero).

No. Caso	Referencia	Tipo de Eje	Carga (Ton)
1	EDu1	Simple dual	10.0
2	EDu2	Simple dual	13.0
3	EDu3	Simple dual	14.0
4	EDu4	Simple dual	16.0
5	EDu4	Simple dual	18.0

Teniendo como base los anteriores caso de carga, es necesario también establecer otros parámetros tales como la presión de inflado y el radio de influencia de la carga. Para esto, se supuso un valor constante de presión de inflado igual 662.1 KPa. Con este valor y el valor de la carga, se calculó el radio de contacto en cada caso. Cabe recalcar que para la obtención del radio se consideraba el tipo de eje que presentaba la carga ya que en el caso de un eje direccional la carga se supone distribuida equitativamente en las dos llantas que lo componen, mientras que en el caso de un eje dual esta distribución ocurre entre cuatro llantas.

De forma similar a las modelaciones realizadas en el capítulo anterior, se tomaron 3 puntos de análisis en cada capa: uno en el centro del área aferente (0,0); otro en el extremo de la misma (R,0) y el último en la mitad entre las dos huellas de las llantas en el caso de un eje dual o a 1.5R en el caso de un eje direccional (1.5R,0).

Tabla 10.7. Valores de radio de contacto para los casos del eje direccional.

No. Caso	Referencia	Tipo de Eje	Carga (Ton)	Radio contacto (m)
1	EDir1	Simple direccional	6.0	0.120
2	EDir2	Simple direccional	8.0	0.139
3	EDir3	Simple direccional	10.0	0.155
4	EDir4	Simple direccional	12.0	0.170

Tabla 10.8. Valores de radio de contacto para los casos del eje simple con llantas duales.

No. Caso	Referencia	Tipo de Eje	Carga (Ton)	Radio contacto (m)
1	EDu1	Simple dual	10.0	0.164
2	EDu2	Simple dual	13.0	0.180
3	EDu3	Simple dual	14.0	0.195
4	EDu4	Simple dual	16.0	0.208
5	EDu4	Simple dual	18.0	0.221

10.1.5. Caso base de diseño

Considerando que típicamente el diseño pavimento mediante métodos mecanicistas considera parámetros de carga y temperaturas fijos para las capas asfálticas que componen la estructura del pavimento, se realizó un escenario **base** en donde se trabajó con una carga de 13.0 ton (eje estándar del método de diseño francés tipo simple con llantas duales) y en donde los materiales asfálticos (capas 1, 2, 3 y 4) presentan valores de módulo bajo condiciones de 10.0 Hz y una temperatura de 20.0°C.

Para las capas 5 (subbase) y 6 (subrasante) se supusieron módulos de 200 Mpa y 400 Mpa para la capa 5 y de 30 MPa y 50 MPa para la capas 6, debido a la incertidumbre asociada al valor real de éstas. Los valores de módulo seleccionados para las capas 5 y 6 se escogieron debido a las condiciones del suelo típico que se presenta en Bogotá (para el caso de la subrasante) y a valores estimados típicos de lo se puede estimar para un suelo remanente como el existente en la estructura.

En la siguiente Tabla se muestran los 4 casos evaluados para el caso de diseño base que se tendrán en cuenta posteriormente para la comparación de resultados.

Tabla 10.8. Valores de módulos para el **caso base** de diseño o CB1.

Valor módulo en MPa casos base (13.0 Ton, 20.0°C y 10.0 Hz)							
No Caso	Referencia	MD-12	MAM-20	MD-20	GEEA	Subbase	Subrasante
1	CB-C5.1-C6.1	4980.16	9698.92	4399.48	2125.70	200.00	30.00
2	CB-C5.1-C6.2	4980.16	9698.92	4399.48	2125.70	200.00	50.00
3	CB-C5.2-C6.1	4980.16	9698.92	4399.48	2125.70	400.00	30.00
4	CB-C5.2-C6.2	4980.16	9698.92	4399.48	2125.70	400.00	50.00

En este caso cada estructura tiene asociada una referencia, relacionada con la temperatura y frecuencia usada para el módulo de los materiales asfálticos CB (20.0 °C y 10.0 Hz) y para las capas se subbase y subrasante una referencia asociada al módulo utilizado en cada caso.

A continuación se muestra el paso a paso realizado para cada una de las simulaciones tomando como ejemplo el caso base de diseño 1 (Referencia: CB-C5.1-C6.1) para el eje estándar francés de 13.0 Ton.

- **Determinación de estructura y la carga**

Teniendo en cuenta la referencia de la estructura, se sabe que las capas de materiales asfálticos tienen asociado un módulo correspondiente a 20.0°C y 10.0 Hz. Por su parte, la capa de subbase (C5.1) tiene un módulo de 200MPa y la subrasante (C6.1) un módulo de 30MPa. Como parámetro adicional se supone que todas las capas se encuentran ligadas. La Figura 10.10 muestra los datos de entrada al programa.

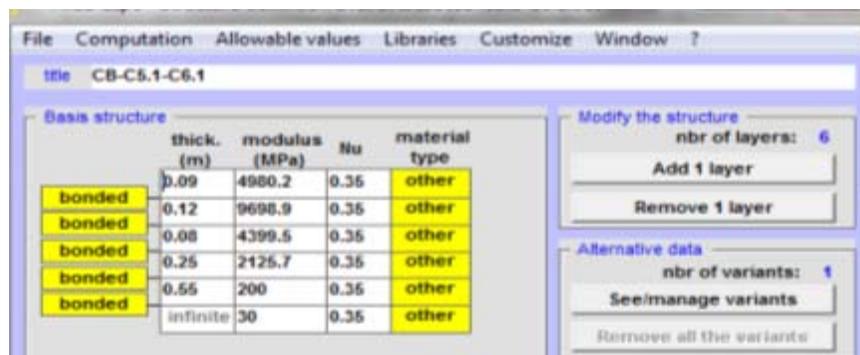


Figura 10.10. Estructura CB-C5.1-C6.1 utilizada en Alizé.

Por su parte, para el caso de carga, donde se utilizará un eje simple de llanta dual de 13.0 ton, con las características del eje y los 3 puntos de aplicación de cargas mostrados en las Figuras 10.11 a 10.13.

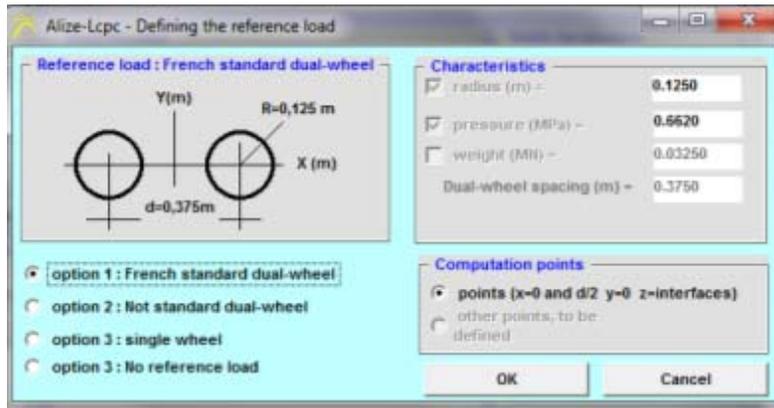


Figura 10.11. Características geométricas caso de carga estándar (eje dual de 13.0 Ton).

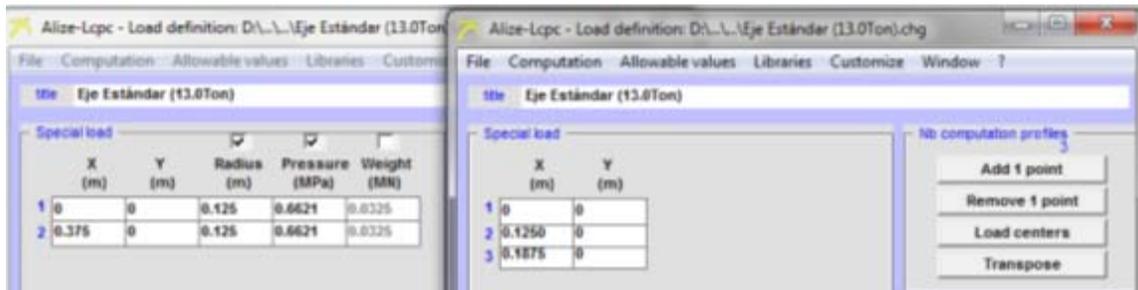


Figura 10.12. Parámetros de radio (m), presión de inflado (MPa) y puntos aplicación carga.

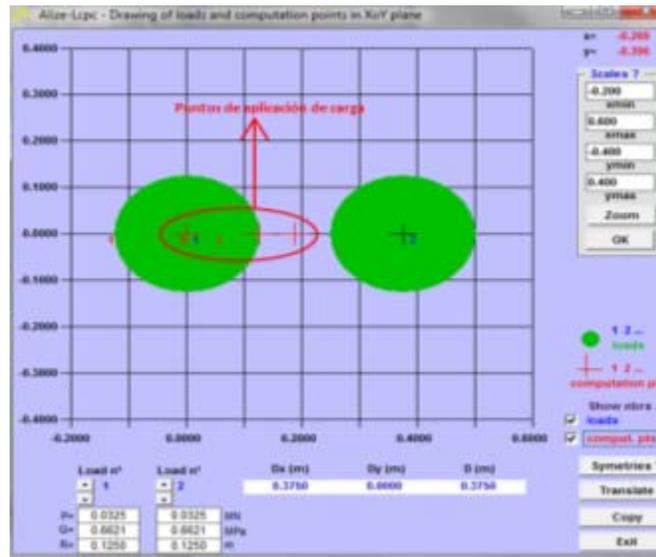


Figura 10.13. Esquema del caso de carga y sus puntos de aplicación de carga.

- **Corrida del modelo**

Una vez establecidos los parámetros solicitados por el programa, se procedió a realizar el análisis mecánico de Alizé, del cual se toman los valores de deformaciones previamente mencionados (deformación en XX, YY y ZZ para los tres puntos evaluados en las capas de interés, además de la deflexión asociada). Los pantallazos con los resultados típicos se muestran en las Figuras 10.14 a 10.16.



Figura 10.14. Datos obtenidos para el punto 1 de aplicación de la carga.

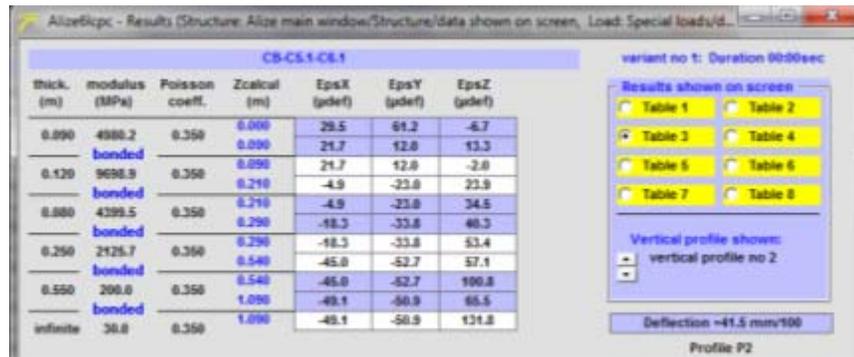


Figura 10.15. Datos obtenidos para el punto 2 de aplicación de la carga.



Figura 10.16. Datos obtenidos para el punto 3 de aplicación de la carga.

Teniendo la información reportada por el programa se procedió a identificar en cada caso el valor de deformación máxima (considerando que los datos arrojados por el programa en este aspecto se presentan como μ deformaciones), en los puntos de interés en las diferentes capas, de manera que, para este caso, se tiene que:

Tabla 10.9. Resultados obtenidos en Alize para caso base o CB1.

Intervalos de μ def para casos base de diseño							
Caso	Referencia	MD-12	MAM-20	MD-20	GEEA	Subbase	Subrasante
		ϵt (μ def)	ϵz (μ def)	ϵz (μ def)			
CB1	CB-C5.1-C6.1	30.5	-23.1	-33.8	-53	101.5	132.1

10.1.6. Casos de simulaciones en Alizé

En lo relacionado a la estructura del pavimento se realizaron diferentes escenarios de manera que se tuvo en cuenta la ubicación de los materiales dentro de la estructura del pavimento, puesto que se debían realizar escenarios lógicos y en donde se plasmara en general lo que ocurre en campo a partir de lo recopilado por los instrumentos de medición. Así, para los materiales que componen las cuatro primeras capas de la estructura de pavimento se consideraron tres perfiles de temperatura, uno frío, otro medio y uno caliente, como se explicó con anterioridad.

Para las capas 5 y 6, que corresponden a las capas de material granular remanente y a la subrasante se tomaron 2 valores de módulo para cada una, de manera que para la capa 5 se tiene valores de módulo de 200 MPa y 400 MPa, mientras que para la subrasante se trabajó con valores de 30 MPa y 50 MPa, al igual que en el caso base presentado en la sección anterior.

Con lo anterior, se procedió a generar las diferentes estructuras de pavimento, de manera que continuación se presentan las combinaciones utilizadas, las cuales se consideraron para cada uno de los casos de carga por eje (Tabla 10.10).

Tabla 10.10. Casos utilizados para simulaciones asociados a estructura del pavimento.

Valor de módulo en Mpa para cada capa											
Caso	Referencia	MD-12		MAM-20		MD-20		GEEA		Subbase Módulo (MPa)	Subrasante Módulo (MPa)
		Temp (°C)	Módulo (MPa)								
1	PF-C5.1-C6.1									200.00	30.00
2	PF-C5.1-C6.2	13.40	6659.66	14.20	10634.44	14.90	5946.42	16.10	2480.12	200.00	50.00
3	PF-C5.2-C6.1									400.00	30.00
4	PF-C5.2-C6.2									400.00	50.00
5	PM-C5.1-C6.1									200.00	30.00
6	PM-C5.1-C6.2	14.80	6190.00	15.40	10341.02	15.90	5569.62	17.00	2377.62	200.00	50.00
7	PM-C5.2-C6.1									400.00	30.00
8	PM-C5.2-C6.2									400.00	50.00
9	PC-C5.1-C6.1									200.00	30.00
10	PC-C5.1-C6.2	16.50	5645.67	16.50	10065.31	16.70	5279.18	17.50	2322.48	200.00	50.00
11	PC-C5.2-C6.1									400.00	30.00
12	PC-C5.2-C6.2									400.00	50.00

En la tabla anterior, se puede ver que cada caso tiene asociado una referencia, la cual se basa en el perfil de temperatura utilizado para los materiales asfálticos PF (Perfil Frío), PM (Perfil Medio) y PC (Perfil Caliente); el módulo utilizado para la subbase C5.1 ($E_5=200$ MPa) y C5.2 ($E_5=400$ MPa) y finalmente el módulo utilizado para la subrasante C6.1 ($E_6=30$ MPa) y C6.2 ($E_6=50$ MPa). Así, por ejemplo, en el caso 1 con referencia PF-C5.1-C6.1 se tiene un caso en el

que las primeras cuatro capas (asfálticas) tienen valores de módulo correspondientes al perfil frío, la capa cinco (subbase) un módulo de 200 MPa y la capa seis (subrasante) un módulo de 30 MPa.

Una vez planteados los diferentes casos de carga y las estructuras asociadas, se procedió a realizar un análisis mecánico con ayuda de Alizé LCPC. Los datos obtenidos en cada caso especifican las deformaciones en los 3 puntos de aplicación de la carga en las direcciones XX, YY y ZZ en la fibra superior e inferior de cada una de las capas que componen la estructura. De esta forma, para las capas con componentes asfálticos (1, 2, 3, 4) se consideraron las deformaciones en la fibra inferior en XX y YY y para las granulares (5 y 6) se consideraron las deformaciones en la fibra superior en ZZ, tal como se esquematizó en la Figura 10.1. Con los valores registrados para los tres puntos mencionados, se tomó la máxima deformación obtenida y con este valor se trabajó en cada uno de los casos evaluados, para así poder generar intervalos o rangos de deformación entre casos.

10.1.7. Resultados de las simulaciones en Alizé

Con ayuda del programa Alizé se pudieron generar gráficas en 2D y 3D de las diferentes variables de interés en determinados puntos de la estructura. De esta forma, para las capas de materiales asfálticos, considerando el punto y la dirección en la que se presenta la máxima deformación, se puede obtener una gráfica y una superficie que ilustren de manera más clara el comportamiento del material frente a la aplicación de carga.

A continuación se presentan las gráficas de máxima deformación para el perfil de temperatura caliente, en la dirección de máxima deformación para las capas de rodadura (MD-12, Figura 10.17) y una de las capas intermedias (MAM-20, Figura 10.18), para cada tipo de eje con la carga más frecuente registrada en campo, además de presentar la deformación del caso base, todos en la dirección del tráfico.

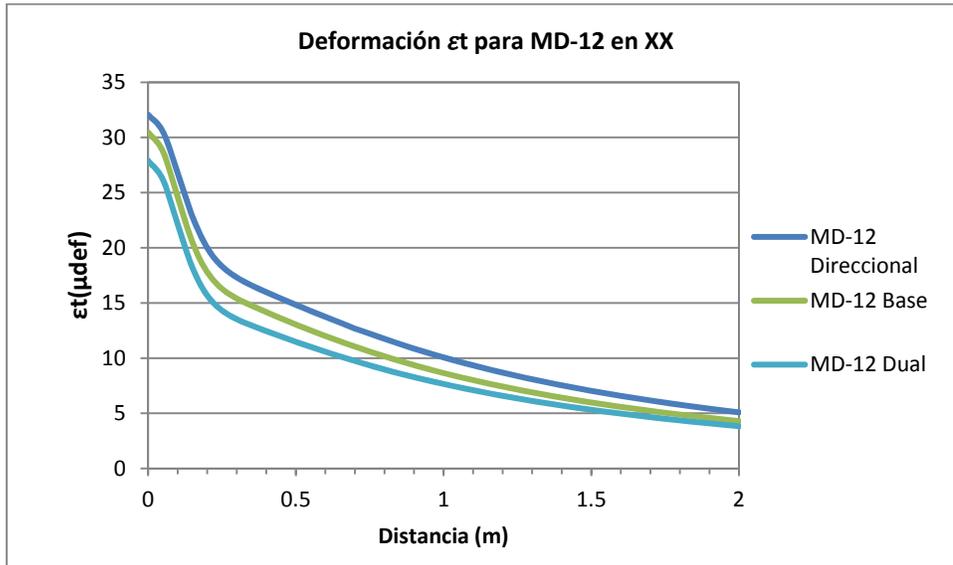


Figura 10.17. Deformaciones en la dirección XX para MD-12.

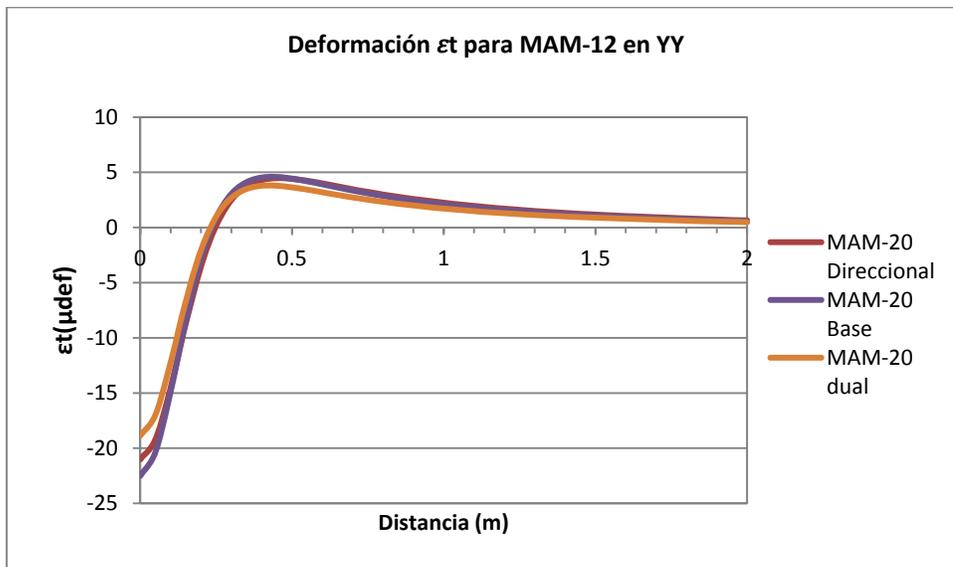


Figura 10.18. Deformaciones en la dirección YY para MAM-20.

En estas figuras se puede ver que, en general, todas las curvas presentan la misma tendencia para los diferentes tipos de ejes aplicados, pero que en el primer caso la deformación a lo largo de la curva para el eje direccional (8.0Ton) es superior al obtenido para el caso base (eje estándar de 13.0 Ton), el cual a su vez tiene deformaciones superiores a las del caso de un eje

dual (12.0 ton). Para la capa 2, con material MAM-20, se tiene que las tres curvas se encuentran muy cerca y que en ninguna de las configuraciones de eje se presentan deformaciones superiores a la del material bajo las condiciones de diseño. Adicionalmente, se puede ver que a partir de cierto punto este material alcanza a sufrir unas pequeñas deformaciones a compresión (i.e., representados con valores positivos de deformación).

De igual manera, se obtuvieron gráficas en 3D del comportamiento de las dos capas en cuestión. Las Figura 10.19 y 10.20 presentan estos resultados para el caso base de diseño el cual se desarrolló en la sección anterior, respectivamente.

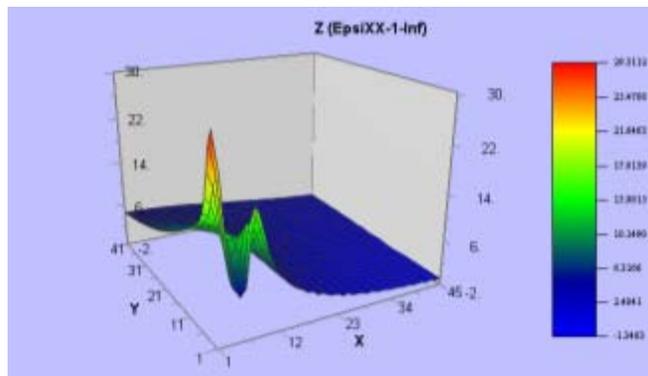


Figura 10.19. Comportamiento del MD-12 caso de diseño.

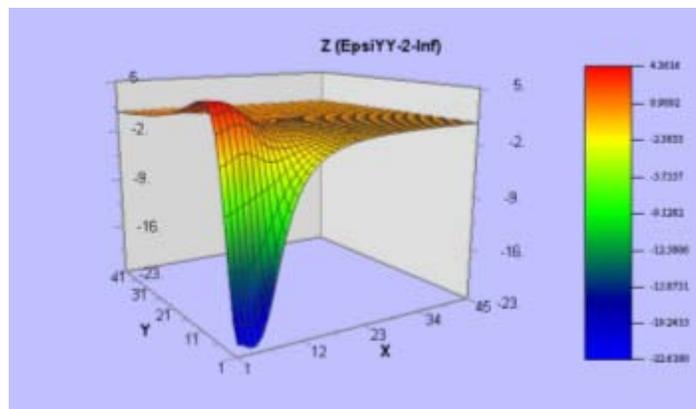


Figura 10.20. Comportamiento MAM-20 para caso de diseño.

A continuación se presentan los datos obtenidos con Alizé LCPC para los casos evaluados. Inicialmente se evaluaron los casos de diseño base (4) en donde se manejó una frecuencia de 10.0 Hz, una temperatura de 20.0°C y una carga aplicada de 13.0 Ton en un eje simple de llanta dual. Para estos casos se obtuvo los intervalos de deformación mostrados en la Tabla 10.11.

Tabla 10.11. Intervalos de μ_{def} casos base de diseño.

Intervalos de μ_{def} para casos base de diseño							
Referencia	Carga (Ton)	MD-12	MAM-20	MD-20	GEEA	Subbase	Subrasante
		st (μ_{def})					
CB	13.0	[27.5,30.5]	[-22.1,-23.2]	[-30.6,-33.8]	[-53,-40.1]	[76.7,102.1]	[95.4,132.1]

A continuación se muestran estos intervalos de deformación para cada perfil de temperatura (perfil frío, perfil medio y perfil caliente) de manera independiente, para pueda tener una idea de la variación de los mismos con la temperatura en la estructura. Esta información se presenta tanto para los ejes direccionales como para los ejes simples con llantas duales.

- **Eje direccional**

Tabla 10.12. Intervalos de μ_{def} para perfil frío en eje direccional.

Intervalos de μ_{def} para perfil frío eje direccional							
Referencia	Carga (Ton)	MD-12	MAM-20	MD-20	GEEA	Subbase	Subrasante
		st (μ_{def})					
EDir1	6.0	[23.5, 25.8]	[-16.6, -17.5]	[-25.3, -27.9]	[-33.7, -43.5]	[64.3, 84.1]	[81.5, 111.5]
EDir2	8.0	[19.9, 29.7]	[-19.2, -20.3]	[-30.4, -33.8]	[-43.4, -56.4]	[81.1, 106.2]	[107.5, 147.4]
EDir3	10.0	[29.2, 32.8]	[-21.1, -22.4]	[-34.7, -38.9]	[-52.6, -68.5]	[96.1, 127.6]	[132.8, 182.4]
EDir4	12.0	[31.1, 35.3]	[-22.5, -24.2]	[-38.5, -43.5]	[-61.2, -80.1]	[110, 147]	[157.7, 217]

Tabla 10.13. Intervalos de μ_{def} para perfil medio en eje direccional.

Intervalos de μ_{def} para perfil medio eje direccional							
Referencia	Carga (Ton)	MD-12	MAM-20	MD-20	GEEA	Subbase	Subrasante
		st (μ_{def})					
EDir1	6.0	[24.3, 26.7]	[-17.6, -18.5]	[-26.3, -28.9]	[-34.6, -45]	[66.1, 86.9]	[83.2, 114.2]
EDir2	8.0	[27.6, 30.7]	[-20.3, -21.5]	[-31.6, -35.1]	[-44.6, -58.2]	[83.4, 110.4]	[109.7, 150.9]
EDir3	10.0	[30, 33.8]	[-22.3, -23.7]	[-36, -40.4]	[-54, -70.7]	[98.8, 131.8]	[135.6, 186.8]
EDir4	12.0	[31.9, 36.4]	[-23.8, -25.6]	[-39.9, -45.1]	[-62.8, -82.7]	[113, 151.7]	[161, 222.2]

Tabla 10.14. Intervalos de μ_{def} para perfil caliente en eje direccional.

Intervalos de μ_{def} para perfil caliente eje direccional							
Referencia	Carga (Ton)	MD-12	MAM-20	MD-20	GEEA	Subbase	Subrasante
		ϵt (μ_{def})	ϵz (μ_{def})	ϵz (μ_{def})			
EDir1	6.0	[25.3, 27.9]	[-18.4, -19.3]	[-27, -29.7]	[-35.4, -46.2]	[67.9, 89.5]	[84.9, 116.8]
EDir2	8.0	[28.7, 32.1]	[-21.1, -22.3]	[-32.3, -35.9]	[-45.7, -59.9]	[85.6, 113.6]	[112, 154.4]
EDir3	10.0	[31.2, 35.2]	[-23.1, -24.6]	[-36.9, -41.3]	[-55.2, -72.7]	[101.4, 135.6]	[138.3, 191]
EDir4	12.0	[33.1, 37.9]	[-24.6, -26.5]	[-40.8, -46.1]	[-64.3, -84.9]	[115.8, 156]	[164.2, 227.2]

- **Eje simple con llantas duales**

Tabla 10.15. Intervalo de μ_{def} para perfil frío en eje simple con llantas duales.

Intervalos de μ_{def} para perfil frío eje dual							
Referencia	Carga (Ton)	MD-12	MAM-20	MD-20	GEEA	Subbase	Subrasante
		ϵt (μ_{def})	ϵz (μ_{def})	ϵz (μ_{def})			
EDu1	10.0	[21.3, 23.2]	[-15.3, -16]	[-22.4, -24.5]	[-28.5, -36.8]	[55.1, 71.8]	[68.2, 93.3]
EDu2	12.0	[23.5, 25.8]	[-16.6, -17.5]	[-25.3, -27.9]	[-33.7, -43.5]	[64.3, 84.1]	[81.5, 111.5]
EDu3	14.0	[25.3, 27.9]	[-18, -18.9]	[-28, -30.9]	[-38.6, -50]	[72.8, 95.7]	[94.5, 129.4]
EDu4	16.0	[26.8, 29.7]	[-19.2, -20.3]	[-30.4, -33.8]	[-43.4, -56.4]	[81.1, 106.8]	[107.5, 147.4]
EDu5	18.0	[28.1, 32.4]	[-20.2, -21.4]	[-32.7, -36.4]	[-48.1, -62.5]	[88.8, 117.5]	[120.2, 165.0]

Tabla 10.16. Intervalo de μ_{def} para perfil medio en eje simple con llantas duales.

Intervalos de μ_{def} para perfil medio eje dual							
Referencia	Carga (Ton)	MD-12	MAM-20	MD-20	GEEA	Subbase	Subrasante
		ϵt (μ_{def})	ϵz (μ_{def})	ϵz (μ_{def})			
EDu1	10.0	[22.1, 24.1]	[-16.2, -17]	[-23.3, -25.5]	[-29.3, -38]	[56.7, 74.3]	[69.7, 95.6]
EDu2	12.0	[24.3, 26.7]	[-17.6, -18.5]	[-26.3, -28.9]	[-34.6, -45]	[66.1, 86.9]	[83.2, 114.2]
EDu3	14.0	[26, 28.8]	[-19.1, -20.1]	[-29, -32.1]	[-39.6, -51.7]	[74.9, 98.8]	[96.5, 132.6]
EDu4	16.0	[28.8, 32.1]	[-20.3, -22.2]	[-32.1, -35.9]	[-47, -59.9]	[84, 112.9]	[121.2, 154.4]
EDu5	18.0	[28.9, 32.3]	[-21.4, -22.7]	[-33.9, -37.8]	[-49.4, -64.6]	[91.3, 121.3]	[122.8, 169.0]

Tabla 10.17. Intervalo de μ_{def} para perfil caliente en eje simple con llantas duales.

Intervalos de μ_{def} para perfil caliente eje dual							
Referencia	Carga (Ton)	MD-12	MAM-20	MD-20	GEEA	Subbase	Subrasante
		ϵ_t (μ_{def})	ϵ_z (μ_{def})	ϵ_z (μ_{def})			
EDu1	10.0	[23.1, 25.2]	[-16.9, -17.7]	[-23.9, -26.2]	[-30, -39.1]	[58.3, 76.5]	[71.1, 97.8]
EDu2	12.0	[25.3, 27.9]	[-18.4, -19.3]	[-27, -29.7]	[-35.4, -46.2]	[67.9, 89.5]	[84.9, 116.8]
EDu3	14.0	[27.2, 30.1]	[-19.8, -20.9]	[-29.8, -32.9]	[-40.6, -53.1]	[77, 101.8]	[98.4, 135.6]
EDu4	16.0	[27.6, 30.6]	[-20.5, -22.3]	[-31.6, -35.1]	[-44.6, -56.4]	[83.4, 113.6]	[109.7, 134.8]
EDu5	18.0	[28.1, 32.4]	[-20.2, -21.4]	[-32.7, -36.4]	[-48.1, -62.5]	[88.8, 117.5]	[120.2, 165.0]

Considerando que a lo largo del día la temperatura de la estructura sufre cambios, se generaron intervalos totales de deformaciones en donde se incluyen los tres perfiles de temperatura. Es decir, estos rangos contienen los valores esperados de deformación en las capas de interés a lo largo de una semana típica, Con esta información se puede tener un punto de comparación para cualquier momento del día relacionado a las deformaciones en los diferentes puntos de la estructura.

- **Eje direccional**

Tabla 10.18. Intervalos de μ_{def} para eje direccional para los perfiles de temperatura frío, medio y caliente.

Intervalos de μ_{def} para perfil frío eje direccional							
Referencia	Carga (Ton)	MD-12	MAM-20	MD-20	GEEA	Subbase	Subrasante
		ϵ_t (μ_{def})	ϵ_z (μ_{def})	ϵ_z (μ_{def})			
EDir1	6.0	[23.5, 25.8]	[-16.6, -17.5]	[-25.3, -27.9]	[-33.7, -43.5]	[64.3, 84.1]	[81.5, 111.5]
EDir2	8.0	[19.9, 29.7]	[-19.2, -20.3]	[-30.4, -33.8]	[-43.4, -56.4]	[81.1, 106.2]	[107.5, 147.4]
EDir3	10.0	[29.2, 32.8]	[-21.1, -22.4]	[-34.7, -38.9]	[-52.6, -68.5]	[96.1, 127.6]	[132.8, 182.4]
EDir4	12.0	[31.1, 35.3]	[-22.5, -24.2]	[-38.5, -43.5]	[-61.2, -80.1]	[110, 147]	[157.7, 217]

Las Figuras 10.21 y 10.22 presentan los rangos totales de deformaciones a tensión y deformaciones verticales obtenidas para las capas asfálticas y las capas no cementadas, respectivamente. Estos rangos contienen los valores de deformación que podrían ocurrir en el pavimento por efecto de cambios climáticos durante una semana típica.

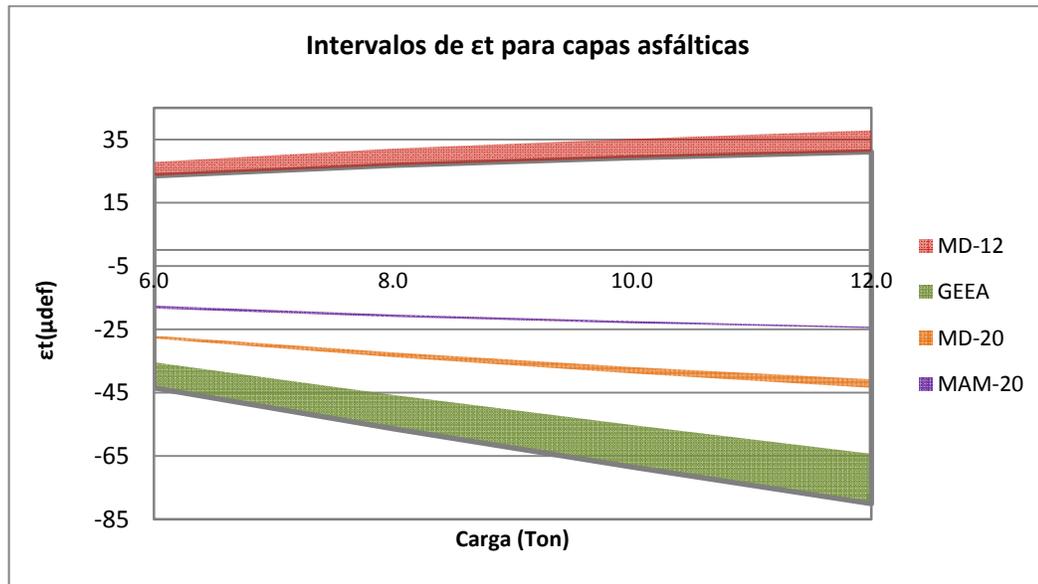


Figura 10.21. Intervalos de μ_{def} para materiales asfálticos con base a la carga eje direccional.

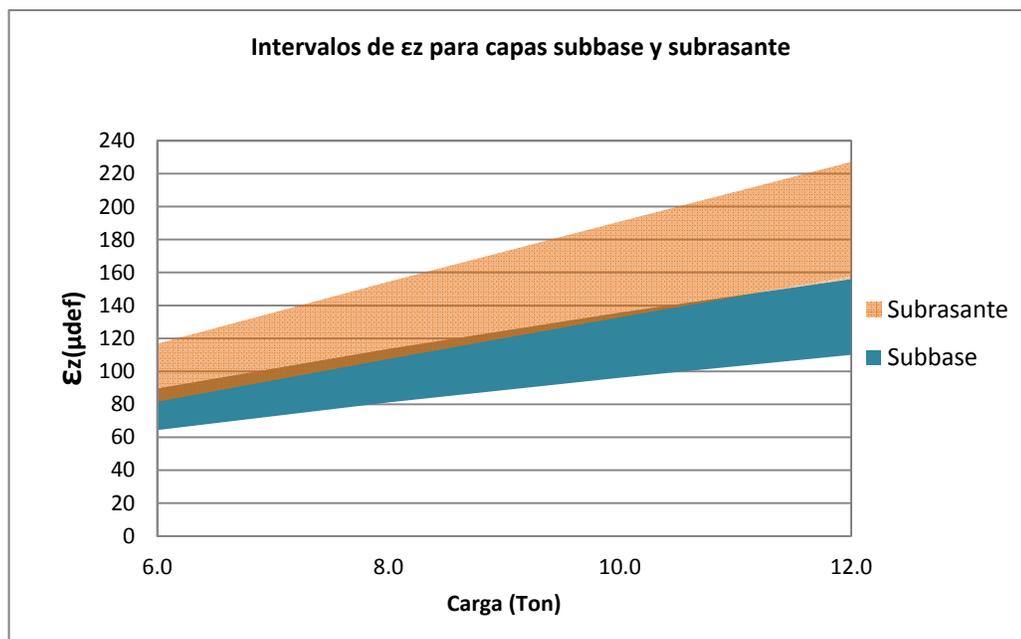


Figura 10.22. Intervalo de μ_{def} para subbase y subrasante con base a la carga eje direccional.

- Eje simple con llantas duales

De forma equivalente, a continuación se presentan los rangos totales consolidados que se pueden esperar que ocurran para diferentes valores de carga aplicados al eje simple con llantas duales (Tabla 1.19, Figuras 10.23 y 10.24):

Tabla 10.19. Intervalos de μ_{def} para eje dual para los perfiles de temperatura frío, medio y caliente.

Intervalos de μ_{def} para eje simple con llantas duales							
Referencia	Carga (Ton)	MD-12 st (μ_{def})	MAM-20 st (μ_{def})	MD-20 st (μ_{def})	GEEA st (μ_{def})	Subbase st (μ_{def})	Subrasante st (μ_{def})
EDu1	10.0	[21.3,25.2]	[-16,-16.9]	[-23.9,-24.5]	[-30,-36.8]	[55.1,76.5]	[68.2,97.8]
EDu2	12.0	[23.5,27.9]	[-17.5,-18.4]	[-27,-27.9]	[-35.4,-43.5]	[64.3,89.5]	[81.5,116.8]
EDu3	14.0	[25.3,30.1]	[-18.9,-19.8]	[-29.8,-30.9]	[-40.6,-50]	[72.8,101.8]	[94.5,135.6]
EDu4	16.0	[26.8,32.1]	[-20.3,-20.5]	[-32.1,-33.8]	[-47,-56.4]	[81.1,113.6]	[107.5,154.4]
EDu5	18.0	[28.1,33.8]	[-21.4,-22.2]	[-34.7,-36.4]	[-50.5,-62.5]	[88.8,124.9]	[120.2,172.8]

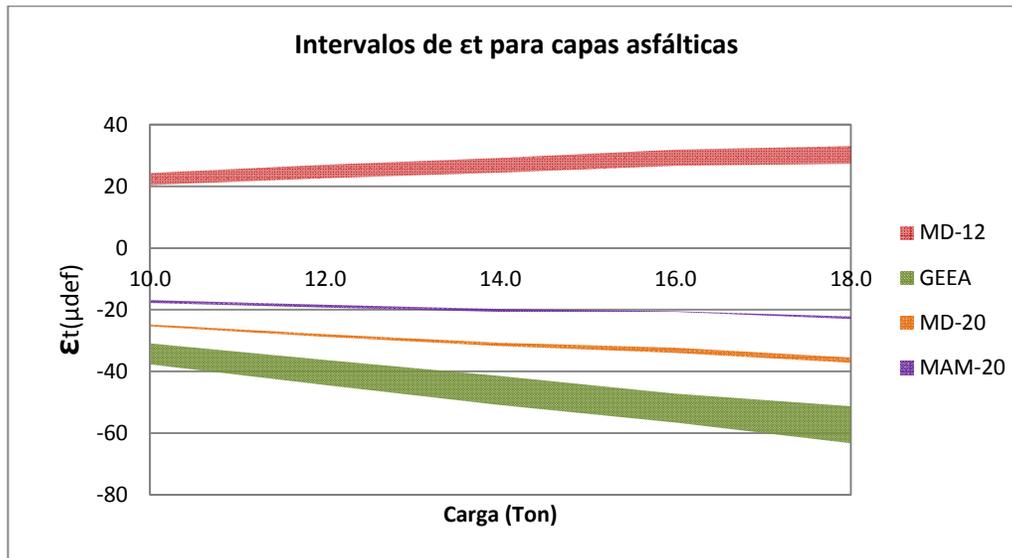


Figura 10.23. Intervalo de μ_{def} para materiales asfálticos con base a la carga eje dual.

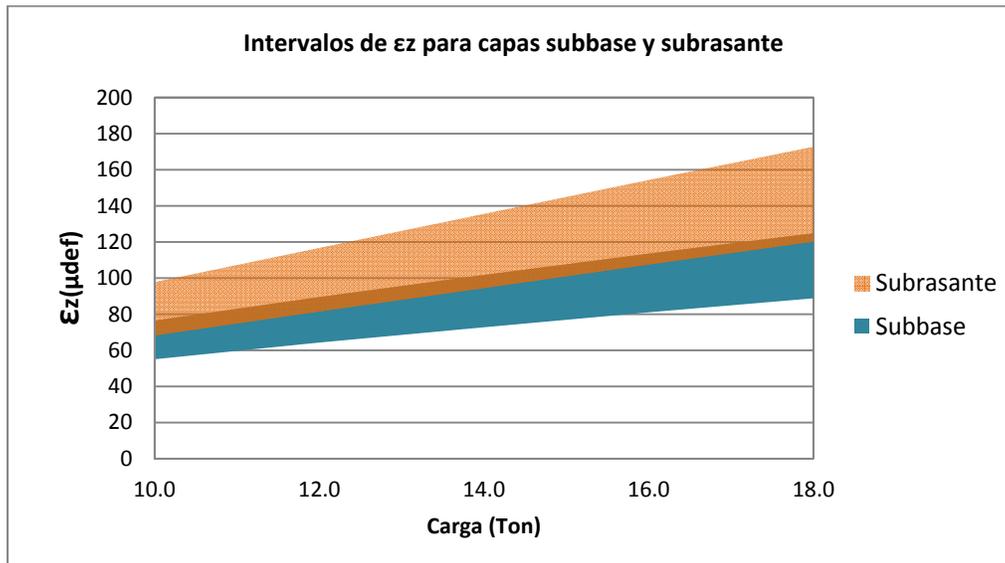


Figura 10.24. Intervalo de μdef para subbase y subrasante con base a la carga eje dual.

Como se puede ver en las gráficas anteriores, en los dos tipos de eje, la capa de rodadura (MD-12) presenta deformaciones a compresión, mientras que para las otras 3 capas asfálticas se presentan deformaciones a tensión. Adicionalmente, se puede ver que el rango de variación de las deformaciones para la capa GEEA es el mayor en ambos casos y, en general, se presenta un comportamiento en donde a medida que la ubicación de la capa se encuentra a una mayor profundidad el rango de deformaciones aumenta.

Por su parte, cuando se evalúan las deformaciones verticales para las capas de subbase y subrasante, se observa la existencia de una zona en la que las deformaciones se traslapan. Para los ejes direccionales esta área disminuye a medida que aumenta la carga hasta aproximadamente las 11.0 ton, mientras que en el caso de los ejes simples con llantas duales esta área disminuye en menor proporción con el aumento de carga, siendo visible a lo largo de todas las cargas.

10.1.8. Comparación entre los diferentes casos simulados y los resultados en campo

Con los intervalos generales (incluyendo los tres perfiles de temperatura) se puede realizar una comparación de las deformaciones registradas en campo con las obtenidas mediante Alizé, de forma tal que se pueda identificar si lo que sucede actualmente en el pavimento es acorde con los valores obtenidos considerando un rango de variación en las temperaturas de las capas. Lo anterior sólo se puede realizar para las dos primeras

capas, ya que es allí es donde existen instrumentos de captura de los que se pudieron obtener datos de deformación.

En la siguiente tabla se muestra la ubicación de dichos sensores para tener claridad respecto a este aspecto:

Tabla 10.20. Ubicación sensores de deformación unitaria en el pavimento flexible.

Núcleo No.	Capa	Alturas iniciales por capa, cm	Profundidad (espesor acumulado) inicial, cm	Altura capa cortada, cm	Profundidad (espesor acumulado) cortada, cm
1	1	8.8	8.8	8.7	8.7
	2	12.6	21.4	12.2	20.9
	3	6.4	27.8	6.8	27.7
2	1	9.0	9.0	8.9	8.9
	2	11.4	20.4	10.9	19.8
	3	8.6	29.0	8.7	28.5
3	1	9.1	9.1	8.9	8.9
	2	12.3	21.4	12.2	21.1
4	1	9.0	9.0	9.0	9.0
	2	13.2	22.2	12.7	21.7
	3	6.8	29.0	6.8	28.5

Cabe señalar que aunque en la tabla anterior se muestra que para los núcleos 1, 2 y 4 existen sensores a 3 diferentes profundidades, en general los sensores que se encuentran en la capa 3 (a mayor profundidad), en ninguno de los casos se pudo obtener información de deformación. Por lo tanto, se puede hacer una comparación de las deformaciones de las dos capas iniciales (MD-12 y MAM-20) en donde existen sensores ubicados tanto de manera paralela como perpendicular al flujo de los vehículos Transmilenio.

Así, los datos obtenidos son los capturados por 14 sensores ubicados en la parte inferior de las capas de rodadura e intermedia (MD-12 y MAM-20), de manera que para la capa de rodadura se contó con la información de 8 sensores (4 paralelos y 4 perpendiculares al flujo vehicular), mientras que para la capa intermedia se utilizó la información reportada en 6 sensores (3 perpendiculares y 3 paralelos al flujo). Con base en esta información se identificaron rangos de valores de deformación máximas y mínimas para las diferentes cargas aplicadas al pavimento por cada uno de los dos tipos de ejes. La existencia de una variación entre los valores de deformación para diferentes tipos de ejes corresponde,

como se mencionó con anterioridad, a los cambios en las propiedades mecánicas de los materiales en el pavimento debido a las condiciones climáticas existentes.

Con toda la información recopilada, se generaron gráficas en donde se puede identificar de manera clara la variación en las deformaciones por cada material según los datos arrojados por el programa Alizé y los datos capturados por los deformímetros en campo para ver cuán cercanos y parecidos son estos valores. Es importante mencionar que la comparación con los valores de campo se realizó considerando los valores de carga estática aplicada al pavimento, y no la carga dinámica reportada por las WIM. Esto, debido a que Alizé considera el efecto de una carga estática y por lo tanto los datos deben ser comparables.

- **Eje direccional**

Las Figuras 10.25 y 10.26 muestran la comparación entre los resultados obtenidos por Alizé y los reportados en campo para las capas 1 y 2, respectivamente.

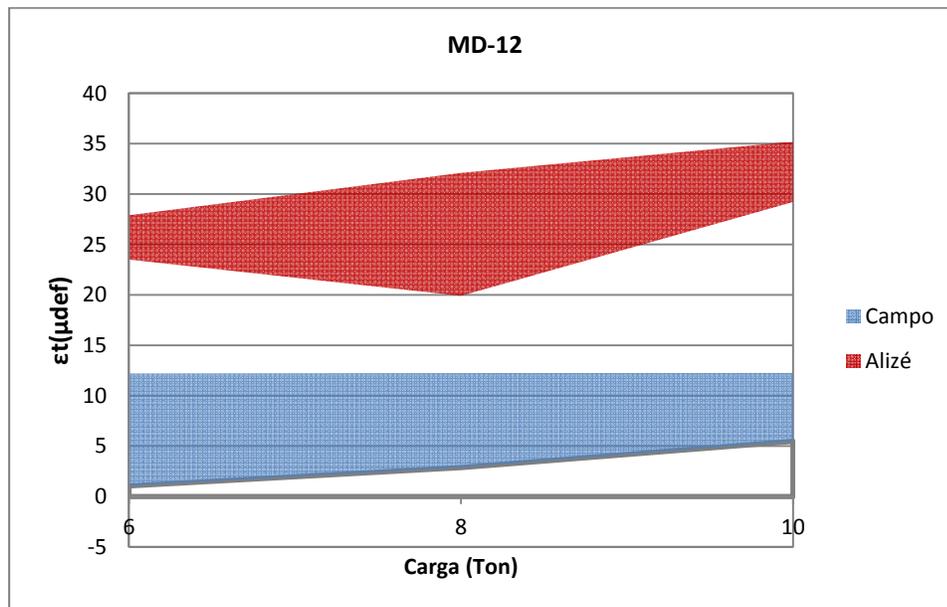


Figura 10.25. Intervalos de μ_{def} para rodadura eje direccional.

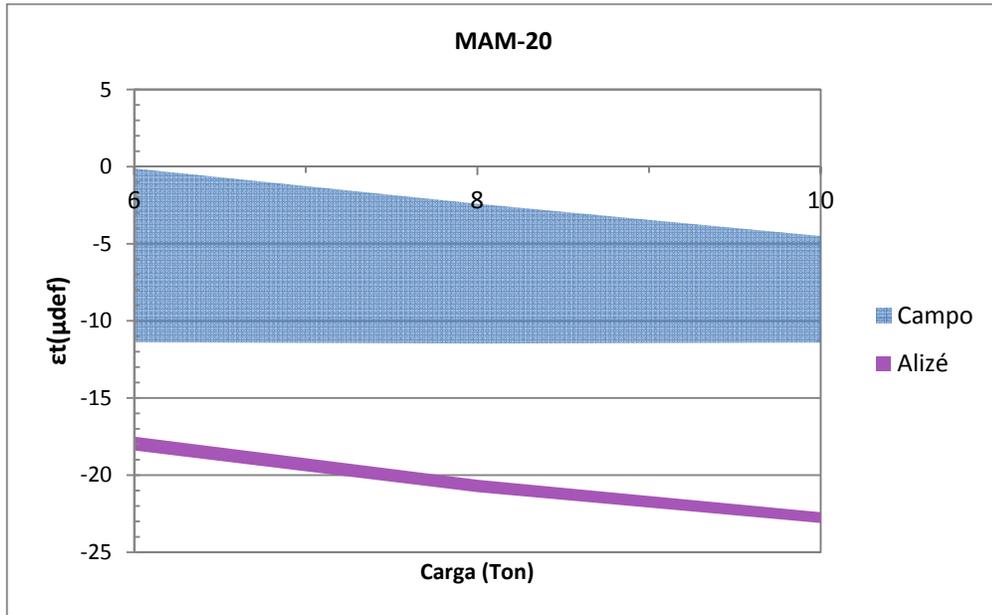


Figura 10.26. Intervalos de μ_{def} para capa intermedia eje direccional.

- **Eje simple con llantas duales**

Las Figuras 10.27 y 10.28 muestran la comparación entre los resultados obtenidos por Alizé y los reportados en campo para las capas 1 y 2, respectivamente.

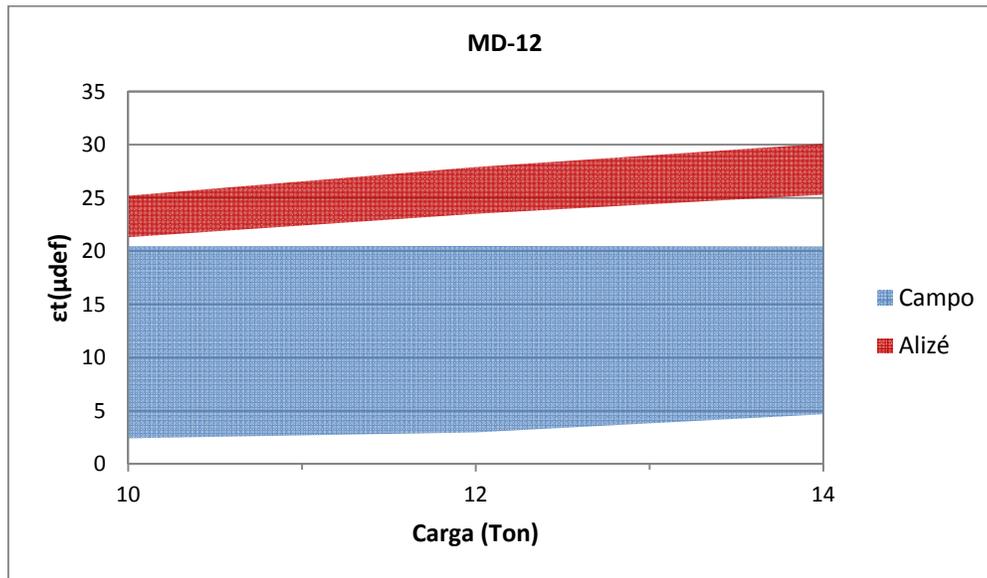


Figura 10.27. Intervalos de μ_{def} para rodadura, eje simple con llantas duales.

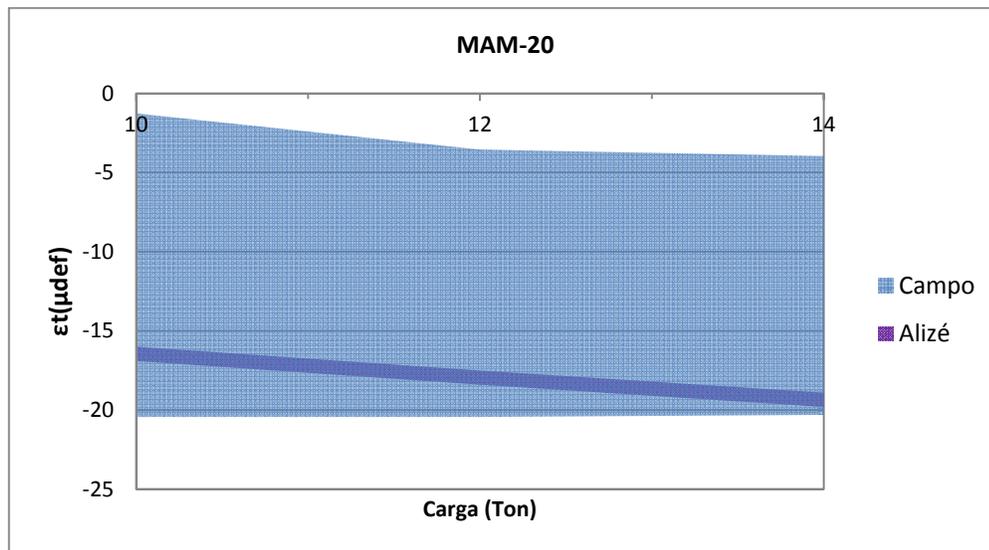


Figura 10.28. Intervalo de μ_{def} para capa intermedia, eje simple con llantas duales.

En general, se puede ver que para el eje direccional los datos capturados para las dos capas son inferiores o muy cercanos a la deformación obtenida mediante las simulaciones realizadas con Alizé y que los rangos de variación de las mismas son mucho más grandes. Por su parte, en cuanto a los datos obtenidos para el eje simple con llantas

duales, el rango de deformación de la primera capa (MD-12) es menor a la obtenida mediante las simulaciones, aunque presenta una variabilidad mayor, mientras que para la segunda capa (MAM-20) se puede ver que el intervalo de deformaciones (la amplitud del rango de valores) que se presenta en campo es mucho mayor al de Alizé y, de igual manera para las cargas registradas en campo, en general se tiene que la deformación máxima para la capa MAM-20 supera lo registrado por Alizé. No obstante, los valores de Alizé se encuentran cerca al límite superior de los valores reportados en campo, y estos valores tienden a igualarse para cargas más altas (superiores a 13 ton).

Ahora bien, lo que se busca con este ejercicio es identificar la diferencia que existe entre los tres grupos de datos que se tienen. Por esta razón, a continuación se presenta la comparación entre las deformaciones obtenidas con Alizé, las deformaciones obtenidas para el caso base de diseño en donde se considera una frecuencia y una temperatura específica y constante (10.0 Hz y 20.0°C) y las deformaciones obtenidas en campo para la carga más frecuente para cada tipo de eje.

Considerando los datos capturados en campo, se tomó como carga más frecuente para el eje direccional la de 8.0 ton mientras que para el eje dual, se tiene una carga de 12.0 ton. Inicialmente se tienen los datos de deformación para todas las capas entre las deformaciones obtenidas a través de Alizé variando la temperatura de las capas y las deformaciones obtenidas para los casos bases; posteriormente se muestran los intervalos de deformación de Alizé, el caso base y los registrados en campo.

- **Eje direccional para una carga de 8.0 Ton**

Las Figuras 10.29 a 10.31 muestran los respectivos resultados encontrados para las tres capas iniciales.

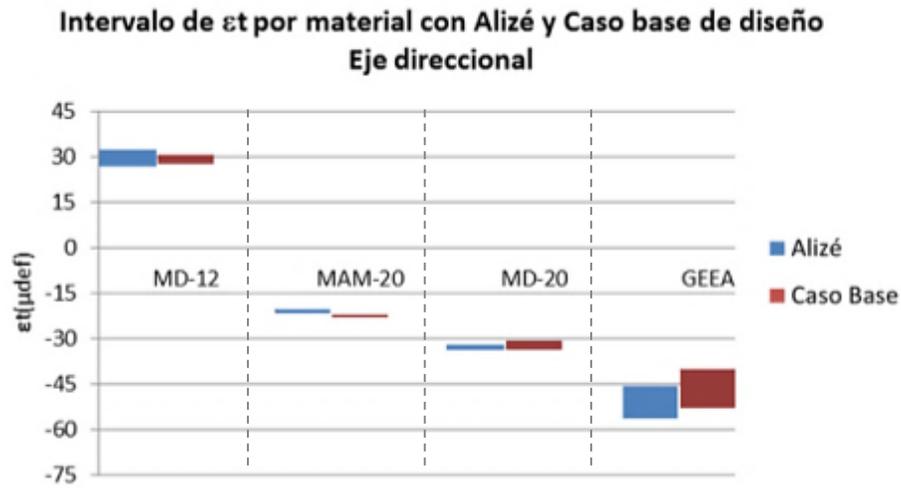


Figura 10.29 Intervalos de μ_{def} perfiles de temperatura y caso base materiales asfálticos.

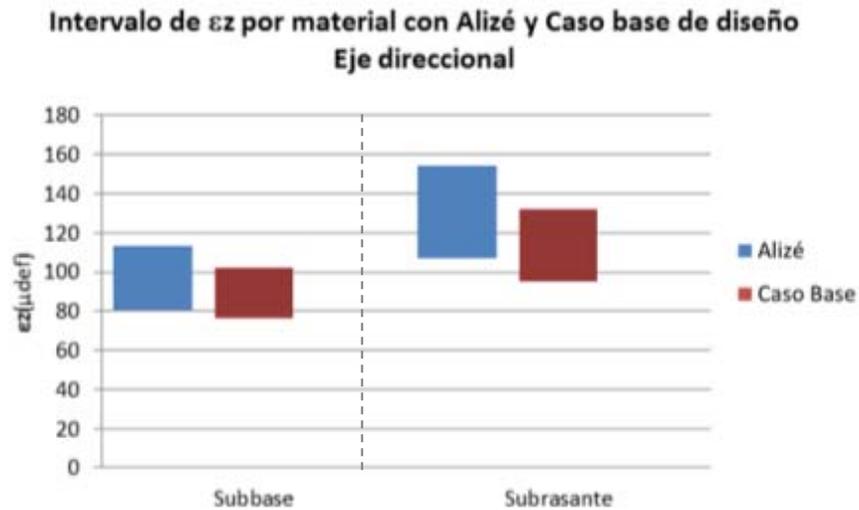


Figura 10.30. Intervalos de μ_{def} Alizé y caso base para subbase y subrasante.

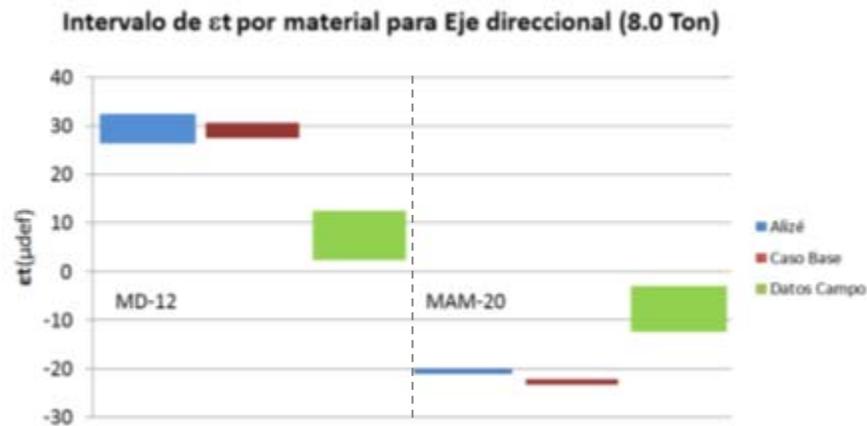


Figura 10.31. Intervalos de μ_{def} para perfiles de temperatura, caso base y datos de campo para MD-12 y MAM-20.

Como se puede ver en las gráficas anteriores, en el caso de los materiales asfálticos existe una diferencia en los rangos de deformación horizontal obtenidos al variar la temperatura con el caso base de diseño. Por ejemplo, para el MD-12 y el GEAA el rango es mayor al de diseño, mientras que para los materiales MAM-20 y MD-20 la diferencia en los intervalos no es tan amplia como en los otros dos casos. Para la subbase y subrasante también se aprecia una diferencia en los rangos de deformación máxima vertical, de manera que en el caso base de diseño la deformación máxima actuante es menor.

Al comparar los datos obtenidos en campo para MD-12 y MAM-20 con los datos de las simulaciones, se puede observar que, en general, las deformaciones en campo son mucho menores a las obtenidas para los perfiles de temperatura y para las obtenidas con los parámetros de diseño, aunque éstas presentan una variabilidad mayor. En este sentido, se podría afirmar que los valores típicos que se emplean para el control de fatiga en las capas asfálticas mediante el empleo de programas elásticos multicapa proporcionan valores conservadores, en comparación con los valores de deformación que realmente se pueden esperar en el pavimento.

- **Eje simple con llantas duales para una carga de 12.0 ton**

Las Figuras 10.29 a 10.31 muestran los respectivos resultados encontrados para las tres capas iniciales.



Figura 10.32. Intervalos de μ_{def} perfiles de temperatura y caso base materiales asfálticos.

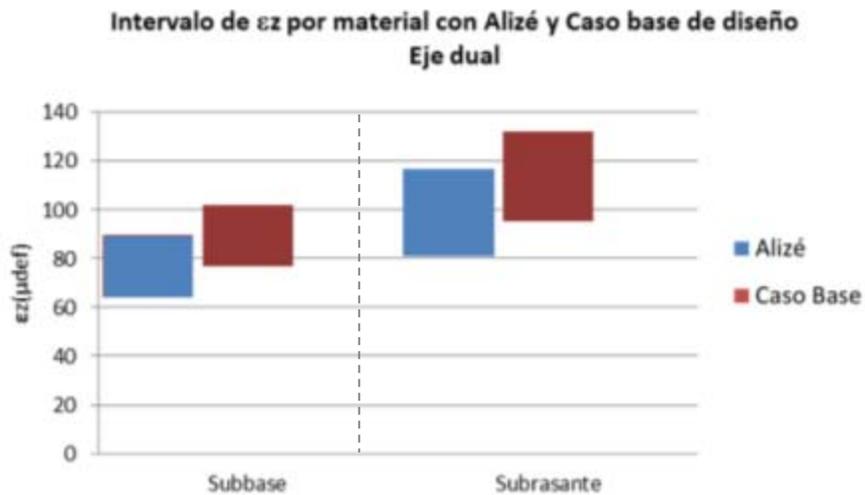


Figura 10.33. Intervalos de μ_{def} Alizé y caso base para subbase y subrasante.

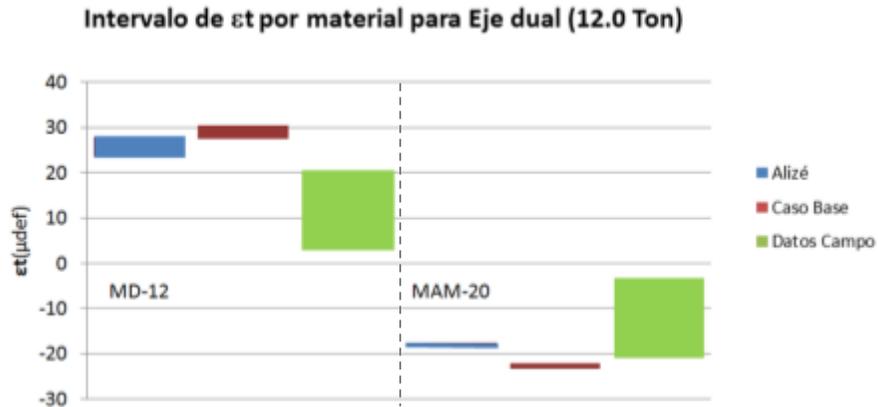


Figura 10.34. Intervalos de μ_{def} para perfiles de temperatura, caso base y datos de campo para MD-12 y MAM-20.

Para el eje simple con llantas duales, se puede ver que para todas las capas asfálticas el intervalo de deformación que se obtiene con los parámetros de diseño (10.0 Hz, 20.0°C y 13.0 Ton) es mayor al obtenido al modificar la temperatura de los materiales asfálticos para una carga de 12.0 ton. Lo anterior no sólo se evidencia para estos materiales, sino también se observa para la subbase y la subrasante. Al observar ahora los datos de campo, se observa que para la capa 1 o MD-12, la deformación registrada por los instrumentos es menor a la deformación obtenida en las simulaciones, tanto al modificar la temperatura de las capas como para el escenario base, aunque los valores de deformación en campo presentan una variabilidad mucho mayor. De nuevo es importante resaltar que estos valores son de compresión, y por lo tanto no afectan los resultados de diseño pues no inducen procesos de fatiga en esa capa.

Por su parte, la deformación a tensión registrada para la segunda capa o MAM-20, es superior en variabilidad a las otras dos opciones e incluso alcanza a superar la máxima deformación obtenida con Alizé al modificar la temperatura. No obstante, los valores de deformación en campo no alcanzan a tomar valores superiores a los obtenidos con los parámetros de diseño o caso base. Una vez más, esto sugiere que los diseños realizados con la metodología mecanicista que supone valores de temperatura constantes de 20°C para la ciudad en las capas asfálticas y una frecuencia de 10Hz proveen escenarios conservadores con respecto al comportamiento real de las capas de pavimento en campo.

10.1.9. Consideraciones adicionales

En la última etapa de este estudio, se quisieron determinar los potenciales valores de módulo que deberían tomar las capas asfálticas para que en las modelaciones de Alizé proporcionen valores de deformaciones similares a los valores medios registrados en campo. Para esto, se realizaron simulaciones a partir del perfil de temperatura frío, el cual se desplazó hacia temperaturas más bajas hasta determinar el módulo aproximado de la capa de rodadura (MD-12) y de la capa intermedia MAM-20 que estarían asociados a la deformación media que se registra en campo. Para esto, el perfil se desplazó en un intervalo de temperaturas desde los 0°C hasta la temperatura del perfil medio de 14.8°C en el punto más alto. Cabe recalcar que el hecho de desplazar el perfil de temperatura frío se hizo con el fin de simular escenarios realistas, considerando que se pueden obtener infinitas soluciones que generen las deformaciones en campo que se buscan.

A continuación se presentan los perfiles de temperatura asociados al perfil frío y a los perfiles de temperatura que permiten tener deformaciones promedio similares a las deformaciones medias registradas en campo para los materiales MD-12 y MAM-20 (Figuras 10.35 y 10.36).

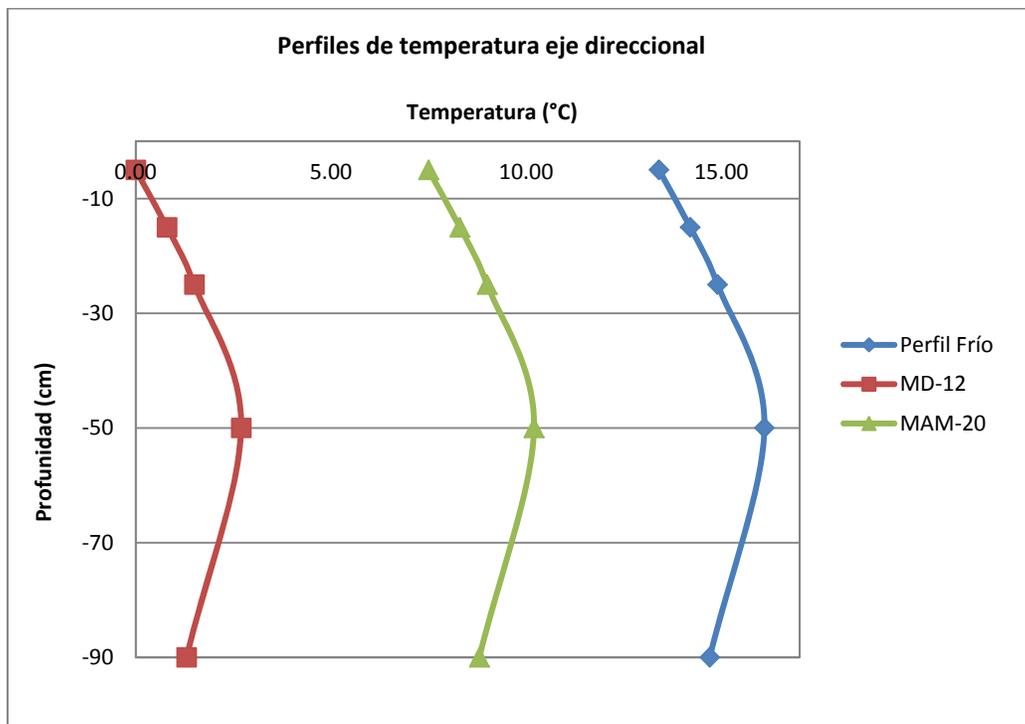


Figura 10.35. Perfiles de temperatura asociados a cada material del eje direccional para alcanzar los valores de deformación de campo.

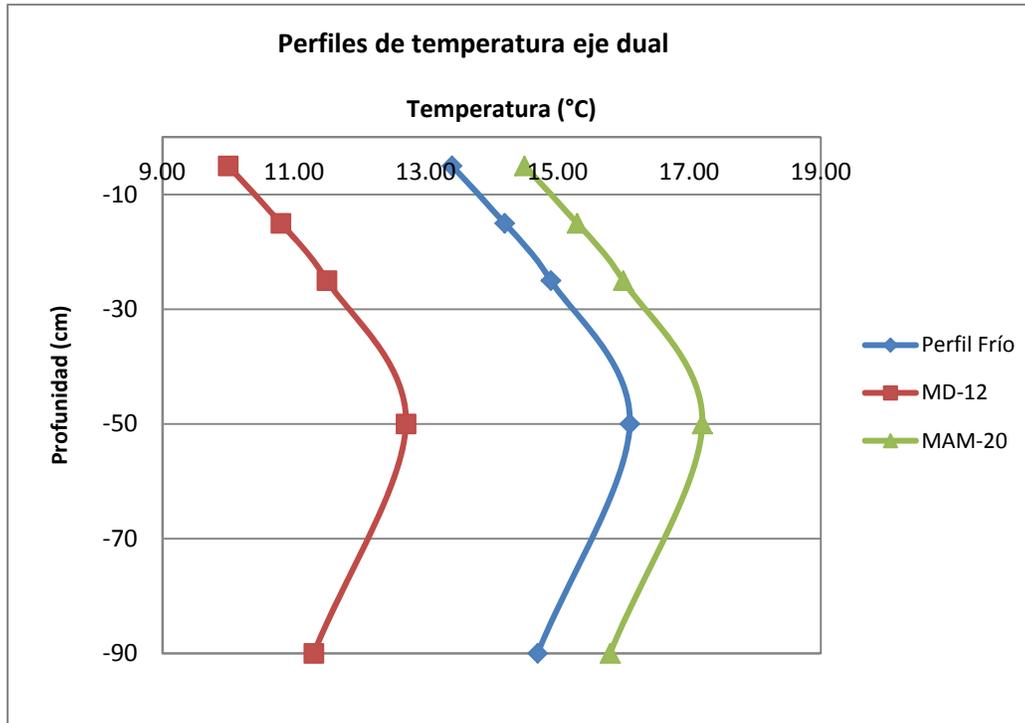


Figura 10.36. Perfiles de temperatura asociados a cada material eje simple con llantas duales para alcanzarlos valores de deformación de campo.

Teniendo en cuenta los perfiles anteriores para cada material y considerando la deformación promedio de los materiales se tiene que, en el caso de la capa de MD-12 para el eje direccional, a pesar de que evaluó el comportamiento de esta en un perfil bajo de temperatura, la deformación promedio que ésta presenta es mayor a la deformación media que se presenta en campo (Figura 10.37). Esto se puede deber a que, como ya se explicó, los módulos reales de esta capa son superiores a los supuestos en este ejercicio, puesto que se desconoce el efecto real que genera el modificante adicionado al material. En cambio, para el caso del MAM-20 para el eje direccional, al tener un perfil de temperatura en donde esa capa presentaría un módulo de 11965 MPa se alcanzaría a tener una deformación promedio similar a la deformación media que se registra en campo (Figura 10.37).

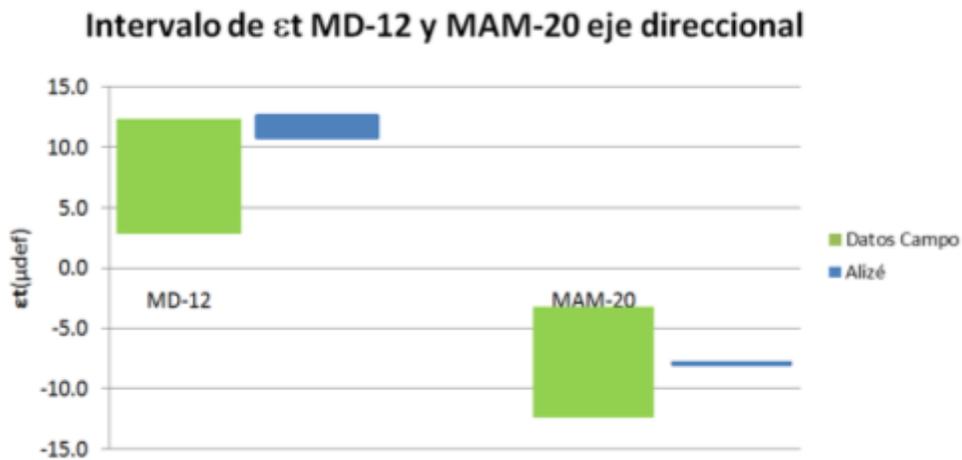


Figura 10.37. Intervalos de deformación obtenidos en campo y Alizé con otros perfiles de temperatura.

En el caso del eje simple con llantas duales, se tiene que para la capa MD-12 el material requeriría un módulo aproximado de 7880 MPa (el cual es posible para una mezcla modificada como la que existe en campo) y el MAM-20 uno de 10365 MPa para presentar deformaciones a tensión promedio similares a las deformaciones medias presentadas en los datos registrados en campo (Figura 10.38).

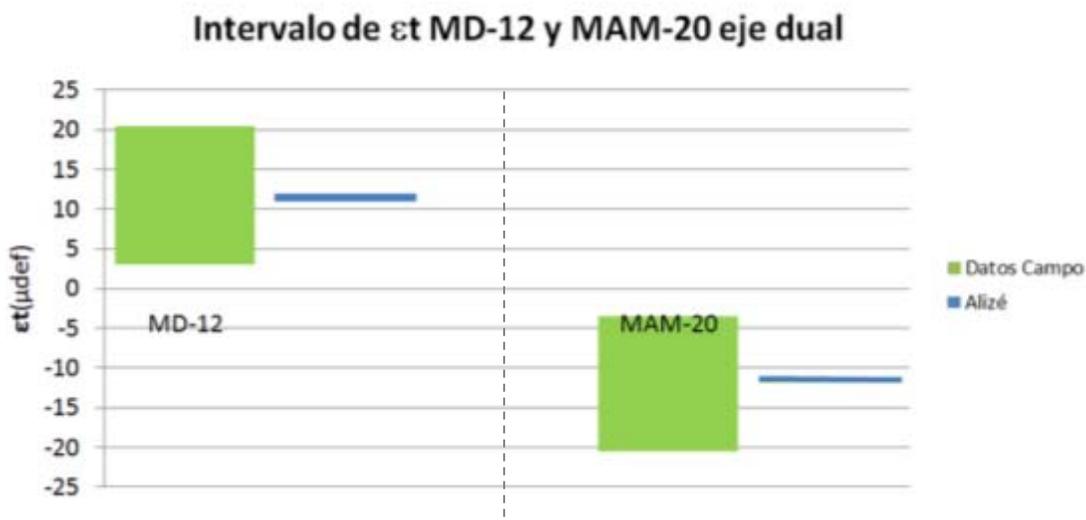


Figura 10.38. Intervalos de deformación obtenidos en campo y Alizé para nuevos perfiles de temperatura.

10.1.10. Comentarios finales

Con base en los resultados presentados en las secciones anteriores se puede concluir que los valores capturados por los sensores instalados en campo presentan una gran variación de la respuesta del pavimento. Estas variaciones en los valores máximos de deformaciones (a tensión y vertical) no fueron capturadas en las simulaciones analizadas, lo que indica que las propiedades mecánicas en la realidad varían mucho más que los supuestos en los escenarios estudiados.

Adicionalmente, se observa que los valores máximos de deformación a tensión reportados por el sistema de instrumentación en las capas asfálticas no superan los valores de las simulaciones. Algo similar se observa para el caso de las deformaciones verticales. En este sentido, se podría decir que las simulaciones realizadas mediante un programa como Alizé ofrecen valores de deformación confiables, ya que se encuentran cerca pero no superan a los obtenidos por los sensores en campo. Aunque esta situación se podría interpretar como un sobrediseño, no se debe olvidar que los valores de los módulos de las capas empleados en las simulaciones fueron supuestos con valores típicos promedio de estos materiales (y en el caso de la rodadura para una mezcla convencional sin modificar). Por lo tanto, éstos valores presentan un grado desconocido de incertidumbre, lo que podría eventualmente generar que los valores reales obtenidos de módulo de los materiales en el laboratorio produjeran en Alizé deformaciones iguales a las obtenidas en campo. En otras palabras, aunque los valores en general de las deformaciones obtenidas en Alizé son mayores que las de campo, no se puede afirmar con certeza que se trata de un sobrediseño y, por el contrario, este resultado ofrece importantes luces sobre la aparente pertinencia de empelar estos programas en el diseño de pavimentos.

10.2. Simulaciones en pavimento rígido

Tomando como base lo realizado para el pavimento flexible, se realizó un análisis similar para el caso del pavimento rígido localizado en el punto de instrumentación de la Autopista Norte con Estación Alcalá. En este caso, se tiene una estructura compuesta inicialmente de 5 capas de material contando la subrasante, pero de las cuales solo se tiene información de 2 de ellas, como se expresó en el Informe de avance 1 y como se muestra a continuación:

Tabla 10.21. Ubicación sensores de deformación unitaria en el pavimento flexible.

No. de Capa	Capa	Tipo de Material	Espesor (m)
1	Losa de Concreto	Concreto Fast-Track	0.25
2	Mezcla Asfáltica	MD 20 Convencional	0.25
3	Base Granular	Material existente	No especificada
4	Estructura existente	No especificada	No especificada

Debido a lo anterior, en el momento de realizar las simulaciones en Alizé se tomaron las capas de base granular y material existente como si éstas fueran equivalentes a una sola capa de subbase estabilizada de 0.80m de espesor, siendo ésta la última capa antes de la subrasante. Así, considerando que en campo se tienen instrumentos de medición dentro de la losa a 0.05m y 0.20m de la superficie y que estos miden deformaciones horizontales o a tensión, a pesar de tener una losa de concreto en la cual usualmente el interés se centra en la obtención de los esfuerzos asociados a tensión en su base, en estas simulaciones se analizaron los respectivos valores de deformaciones.

La Figura 10. 39 presenta la estructura de pavimento rígido utilizado para las simulaciones, en donde se muestra de igual manera los puntos en los cuales se buscaron los valores máximos de deformación horizontal (en XX y YY) para las dos primeras capas (losa de concreto y MD-20) al igual que los puntos en los cuales se mide la máxima deformación vertical (en ZZ) para las capas granulares. La Tabla 10.22, por su parte, muestra las características de los materiales consideradas para las simulaciones.

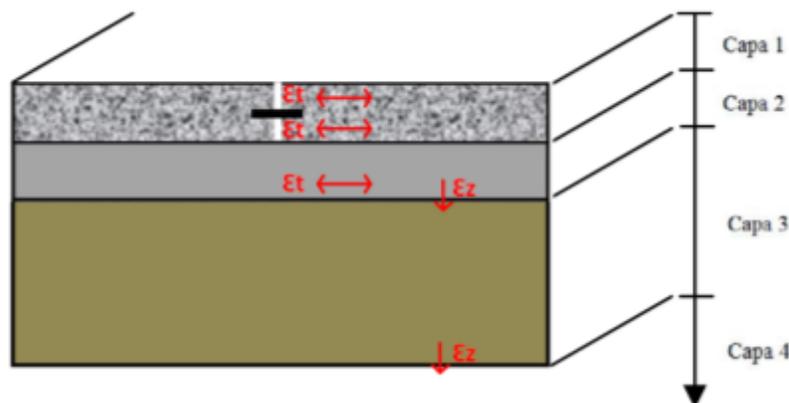


Figura 10.39. Estructura pavimento rígido utilizada en las simulaciones.

Tabla 10.22. Características estructura pavimento rígido utilizada con puntos medición deformación.

No. Capa	Capa	Material	Espesor (m)	Puntos de medida de deformaciones (m)
1	Losa	Concreto Fast Track	0.25	0,05
				0.2
2	Base	MD-20 convencional	0.25	0.5
3	Material remanente	Granular remanente	0.8	0.51
4	Subrasante	Suelo natural	infinito	1.31

10.2.1. Cargas empleadas en las simulaciones

Al igual que para el caso del pavimento flexible, se tuvieron en cuenta tanto el tipo de eje del bus que circula en el pavimento como los valores de carga registrados por los sensores de carga o balanzas tipo WIM. De esta forma, para el eje delantero (eje simple, llanta simple) se tomaron cuatro casos de carga mientras que para los ejes simples con llantas duales (eje simple, llanta dual) se tomaron cinco casos.

Tabla 10.23. Casos de carga para eje direccional

No. Caso	Referencia	Tipo de Eje	Carga (Ton)
1	EDir1	Simple direccional	5.0
2	EDir2	Simple direccional	7.0
3	EDir3	Simple direccional	9.0
4	EDir4	Simple direccional	11.0

Tabla 10.24. Casos de carga eje simple con llantas duales.

No. Caso	Referencia	Tipo de Eje	Carga (Ton)
1	EDuR1	Simple con llanta duales	7.0
2	EDuR2	Simple con llanta duales	9.0
3	EDuR3	Simple con llanta duales	11.0
4	EDuR4	Simple con llanta duales	13.0
5	EDuR5	Simple con llanta duales	15.0

En este caso se mantuvieron los mismos parámetros de entrada en el programa que se usaron para el pavimento flexible, por lo que también se empleó una presión de inflado de 662.1 KPa. Con este valor constante, se calcó el radio de carga o de influencia correspondiente a un tipo de eje y a un valor de carga (Tabla 10.25 y 10.26).

Tabla 10.25. Puntos de aplicación de carga eje direccional por caso de carga.

No. Caso	Referencia	Tipo de Eje	Carga (Ton)	Radio (m)
1	EDir1	Simple direccional	5.0	0.164
2	EDir2	Simple direccional	7.0	0.195
3	EDir3	Simple direccional	9.0	0.221
4	EDir4	Simple direccional	11.0	0.244

Tabla 10.26. Puntos de aplicación de carga eje dual por caso de carga.

No. Caso	Referencia	Tipo de Eje	Carga (Ton)	Radio (m)
1	EDuR1	Simple con llanta duales	7.0	0.1376
2	EDuR2	Simple con llanta duales	9.0	0.1560
3	EDuR3	Simple con llanta duales	11.0	0.1725
4	EDuR4	Simple con llanta duales	13.0	0.1875
5	EDuR5	Simple con llanta duales	15.0	0.2014

10.2.2. Casos evaluados en Alizé

Para este tipo de pavimento se modificó el valor de módulo del concreto, de manera que se utilizó un módulo bajo de 25000 MPa y uno alto de 35000 MPa. En cuanto a la mezcla asfáltica de la estructura (MD-20), se utilizó un valor de módulo usado en diseño, que para el caso sería el que toma el material a una temperatura de 20.0°C y una frecuencia de 10.0 Hz. Considerando que para la capa 3 se tenía una gran incertidumbre respecto a sus características, se tomó un valor de módulo similar al de una subbase estabilizada de 300 MPa. En lo concerniente a la subrasante, se tomaron los mismos valores de módulo que para el caso flexible, en un caso un valor de 30 MPa y en el otro un valor de 50 MPa.

En la siguiente tabla se muestran las diferentes estructuras contempladas para el análisis

Tabla 10.27. Casos utilizados para simulaciones asociados a estructura del pavimento.

Caso	Referencia	Losa	MD-20	Subbase	Subrasante
1	C1-C1.1-C4.1	25000.00	4399.48	300.00	30.00
2	C2-C1.1-C4.2	25000.00	4399.48	300.00	50.00
3	C3-C1.2-C4.1	35000.00	4399.48	300.00	30.00
4	C4-C1.2-C4.2	35000.00	4399.48	300.00	50.00

En la tabla anterior, se puede ver que cada caso tiene asociado una referencia, la cual se basa en los valores de módulo que toman la losa de concreto y la subrasante. La referencia C1.1, por ejemplo, se refiere a un módulo de la losa de 25000 MPa, mientras que la referencia C1.2 indica que el módulo de la losa es de 35000 MPa. Algo similar ocurre con la subrasante de manera que la referencia C4.1 indica un módulo de subrasante de 30MPa y una referencia de C4. indica un valor de módulo de 50 MPa.

Igualmente se evaluó un caso con un eje estándar de 13.0 ton tomando como valor de módulo para la losa de 30000 MPa con los dos valores de módulo para la subrasante (Tabla 10.28). Estos casos se consideraron como casos *base* de diseño.

Tabla 10.28. Casos base de diseño.

Caso	Referencia	Losa	MD-20	Subbase	Subrasante
1	CB-C1.1-C4.1	30000.00	4399.48	300.00	30.00
2	CB-C1.1-C4.2	30000.00	4399.48	300.00	50.00

10.2.3. Resultados de las simulaciones en Alizé

A continuación se presentan los datos obtenidos con Alizé para los casos evaluados. Inicialmente se analizaron los casos de diseño base (2) en donde se trabajó una carga aplicada de 13.0 ton en un eje simple con llantas duales. Para estos casos se obtuvo el siguiente intervalo de deformación:

Tabla 10.29. Intervalos de μ_{def} casos base de diseño.

Intervalos de μ_{def} para casos base de diseño							
Referencia	Carga (Ton)	Losa de concreto			MD-20	Subbase	Subrasante
		et (μ_{def}) 0.05m	et (μ_{def}) 0.20m	et (μ_{def}) 0.25 m	et (μ_{def})	ez (μ_{def})	ez (μ_{def})
CB	13.0	[14.7, 15.3]	[-15.1, -14.6]	[-26.2, -25.3]	[-19.1, -18.8]	[55.8, 56.8]	[33.4, 41]

A continuación se muestran estos intervalos de deformación para cada tipo de eje para las simulaciones realizadas para los diferentes casos de carga.

- **Eje direccional**

La Tabla 10.30 y la Figura 10.40 muestran los resultados obtenidos para el eje direccional.

Tabla 10.30. Intervalos de μ_{def} para el eje direccional.

Intervalos de μ_{def} para eje direccional							
Referencia	Carga (Ton)	Losas de concreto			MD-20	Subbase	Subrasante
		ϵ_t (μ_{def}) 0.05m	ϵ_t (μ_{def}) 0.20m	ϵ_t (μ_{def}) 0.25 m	ϵ_t (μ_{def})	ϵ_z (μ_{def})	ϵ_z (μ_{def})
EDirR1	5.0	[11.8, 15.6]	[-11.8, -15.6]	[-19.9, -26.1]	[-14, -17.9]	[42.3, 53.2]	[25.2, 34.4]
EDirR2	7.0	[13.5, 17.8]	[-15.2, -20.1]	[-25.7, -33.6]	[-18.6, -23.8]	[55.5, 69.2]	[34.8, 47.6]
EDirR3	9.0	[15.2, 19.8]	[-18.4, -24.3]	[-31.1, -40.7]	[-22.9, -29.2]	[67.6, 84.6]	[44.5, 60.9]
EDirR4	11.0	[16.8, 21.4]	[-21.4, -28.1]	[-36.1, -47.2]	[-26.9, -34.2]	[78.7, 98.1]	[54, 74]

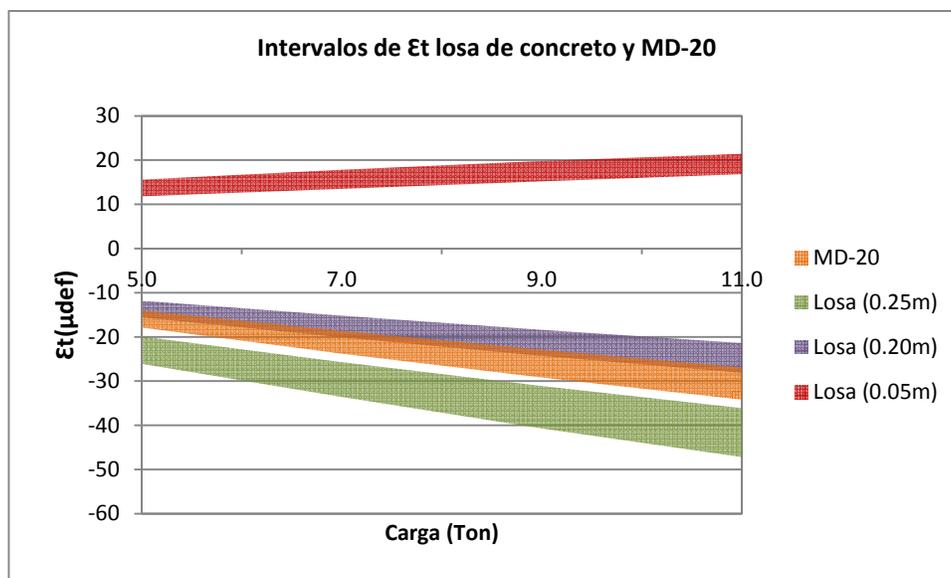


Figura 10.40. Intervalos de μ_{def} losa de concreto y MD-20 eje direccional.

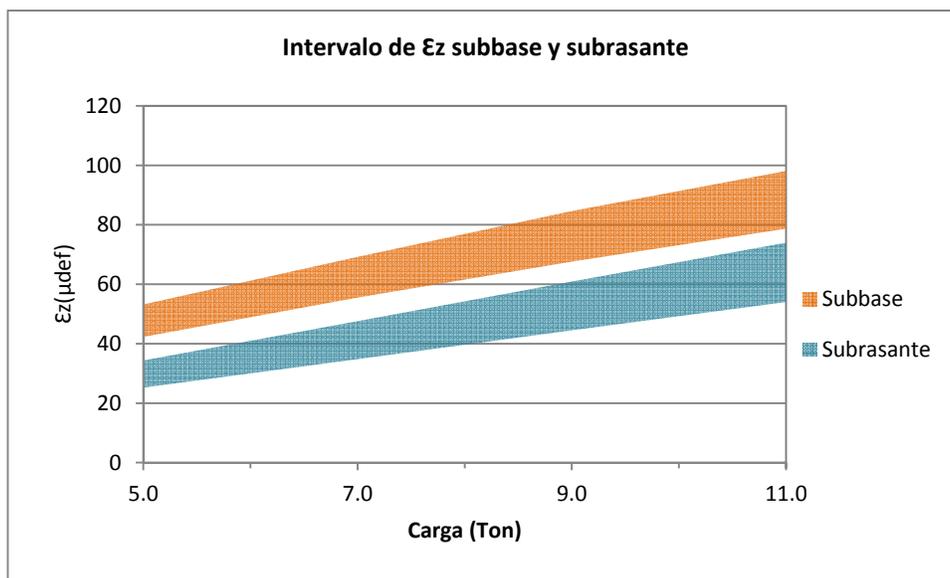


Figura 10.41. Intervalos de μ_{def} para subbase y subrasante eje direccional.

- Eje simple con llantas duales

La Tabla 10.31 y las Figuras 10.42 y 10.43 muestran los resultados obtenidos para el eje simple con llantas duales.

Tabla 10.31. Intervalo de μ_{def} para el eje simple con llantas duales.

Referencia	Carga (Ton)	Intervalos de μ_{def} para eje dual					
		Losas de concreto			MD-20	Subbase	Subrasante
		ϵ_t (μ_{def}) 0.05m	ϵ_t (μ_{def}) 0.20m	ϵ_t (μ_{def}) 0.25 m	ϵ_t (μ_{def})	ϵ_z (μ_{def})	ϵ_z (μ_{def})
EDuR1	7.0	[9.9, 13.2]	[-8.8, -11.7]	[-14.8, -19.5]	[-10.2, -13]	[31, 39.1]	[17.6, 24]
EDuR2	9.0	[11.1, 14.8]	[-10.8, -14.2]	[-18.1, -23.9]	[-12.7, -16.3]	[38.4, 48.4]	[22.5, 30.8]
EDuR3	11.0	[12.2, 16.1]	[-12.6, -16.7]	[-21.3, -28]	[-15.2, -19.4]	[45.5, 57.3]	[27.5, 37.6]
EDuR4	13.0	[13.2, 17.3]	[-14.4, -19]	[-24.2, -31.8]	[-17.5, -22.3]	[52.2, 65.6]	[32.3, 44.3]
EDuR5	15.0	[14, 18.4]	[-16.1, -21.2]	[-27.1, -35.5]	[-19.8, -25.2]	[58.6, 73.5]	[37.2, 51]

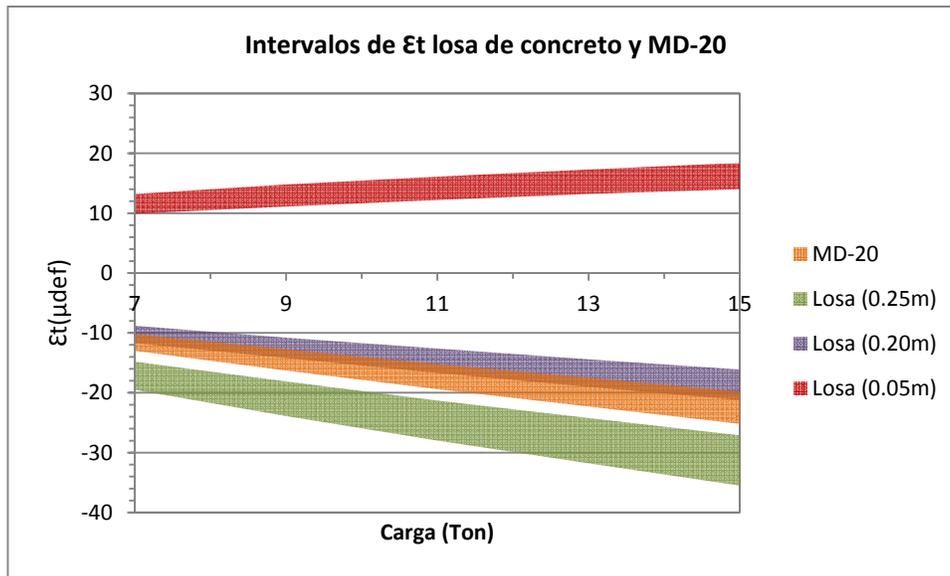


Figura 10.42. Intervalo de μ_{def} para losa y MD-20 eje simple con llantas duales.

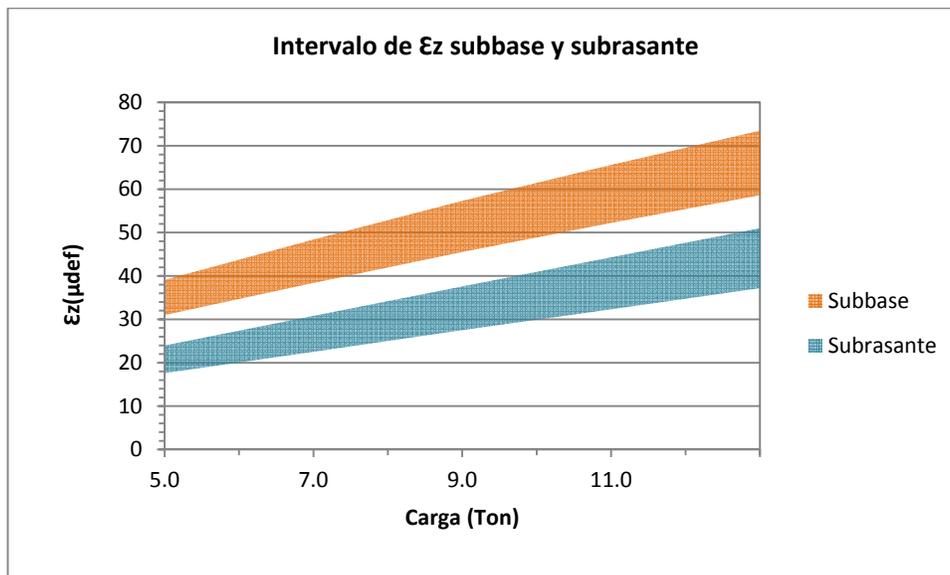


Figura 10.43. Intervalo de μ_{def} para subbase y subrasante eje simple con llantas duales.

En general, en los dos ejes se ve un comportamiento similar de respuesta de los materiales frente a la aplicación de carga. Por ejemplo, se puede ver que en la parte superior de la losa las deformaciones máximas se presentan a compresión y a mayor profundidad empiezan a reportarse deformaciones a tensión, como era de esperarse. Por su parte, la capa de base compuesta por mezcla tipo MD-20 presenta deformaciones a tensión que se traslapan con las deformaciones que presenta la losa a los 0.20m de profundidad a lo largo de todo el intervalo

de carga. Para la subrasante, se presentan deformaciones menores a las obtenidas para la subbase para ambos tipos de eje, sin traslaparse en ningún caso de carga.

10.2.4. Comparación entre los resultados de las simulaciones y los datos de campo

En el caso de este pavimento la comparación de las deformaciones se hizo a dos profundidades dentro de la losa. Para este fin se empleó la información registrada en los sensores instalados en las losas, de manera que se cuenta con información de 14 sensores, 7 para la parte superior (a 5.0cm de la superficie) y 7 para la parte inferior de la losa (a 20.0cm de la superficie).

En el esquema presentado en la Figura 10.44 se puede ver con claridad la ubicación de los sensores utilizados en el pavimento rígido. Los sensores identificados con color azul son los superiores (0.05m) y los de color rojo los inferiores (0.20m), todos embebidos dentro de la losa de concreto. Al momento de revisar los datos obtenidos, a pesar de que se tenían 7 sensores para cada una de las posiciones de interés, se identificaron fallas en la captura de datos de los mismos, por lo cual a 5.0 cm de la losa se trabajaron con los datos de los sensores 3, 5 y 7; mientras que a 20.0cm se trabajó con los datos de los sensores 2, 4, 6 y 8.

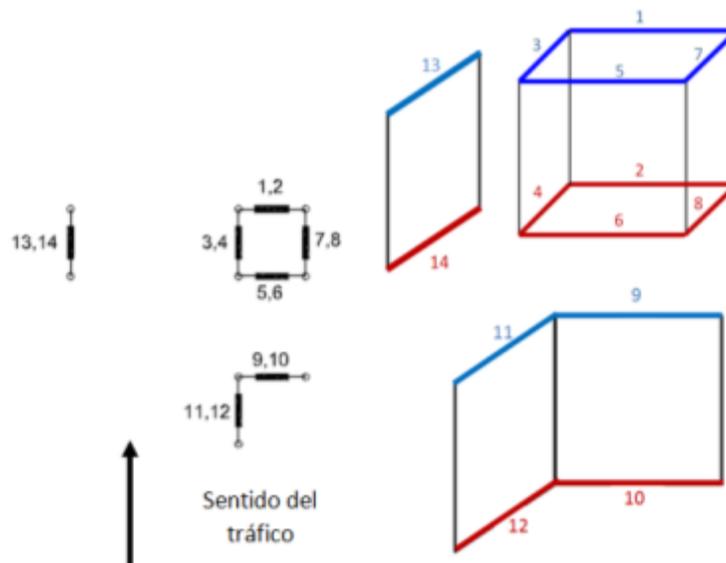


Figura 10.44. Esquema sensores ubicados en losa de concreto.

A continuación se presenta la comparación de las deformaciones registradas en campo y las obtenidas con Alizé para los dos tipos de ejes.

- **Eje direccional**

Las Figuras 10.45 y 10.46 muestran los rangos de deformaciones obtenidos para el eje direccional de las simulaciones, en comparación con los datos de deformación obtenidos en campo.

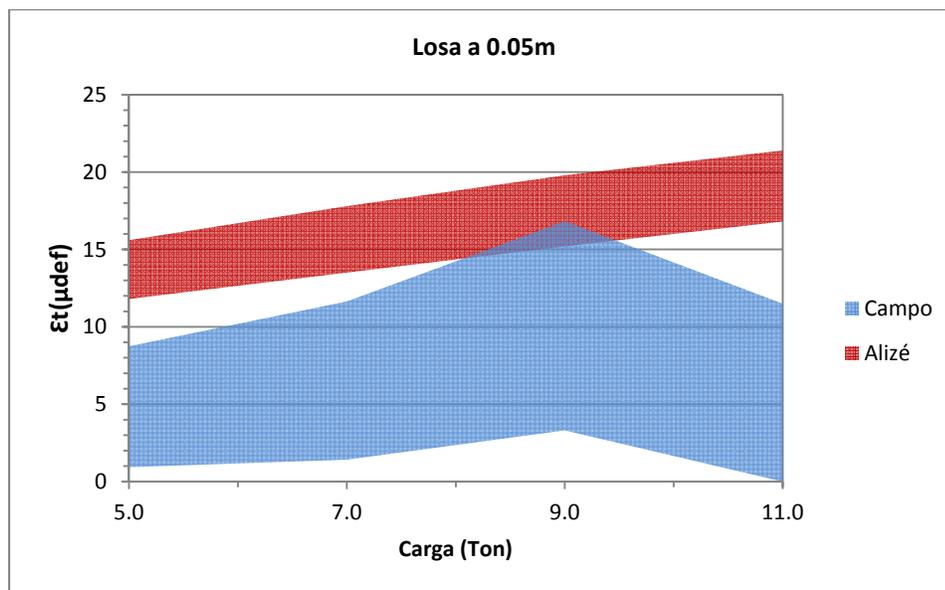


Figura 10.45. Intervalos de μ_{def} a 0.05m eje direccional Alizé y Campo.

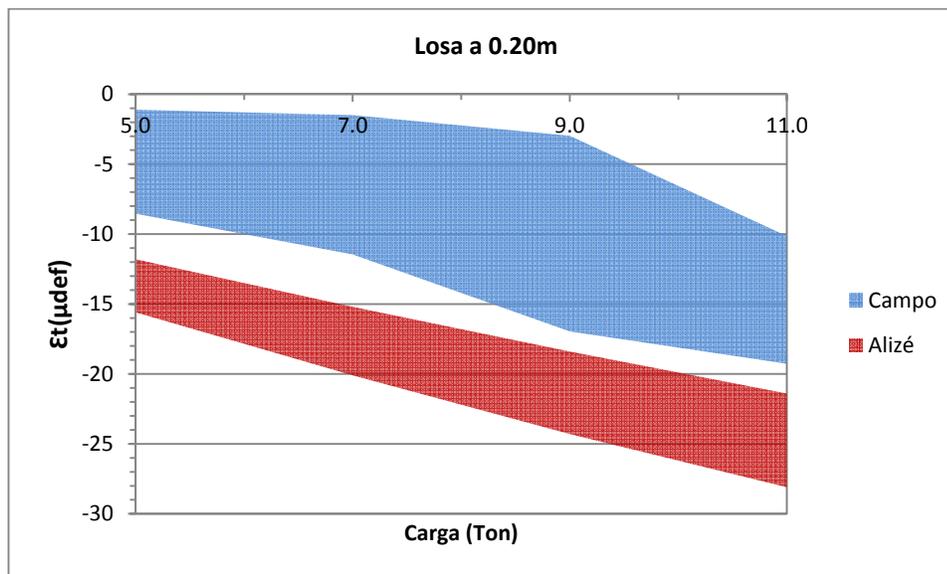


Figura 10.46. Intervalos de μ_{def} a 0.20m eje direccional Alizé y Campo.

Con base en estas figuras se puede afirmar que para este tipo de eje las deformaciones obtenidas en campo son menores a las obtenidas con Alizé, con excepción de los casos para cargas entre 8.0 y 9.5 ton a 0.05 m de profundidad, en donde las deformaciones de campo alcanzan levemente los valores de las registradas en las simulaciones. Adicionalmente se puede ver que en el primer punto de comparación las deformaciones máximas se presentan a compresión, mientras que a 0.20 m estas deformaciones son a tensión y que, en general, el rango de deformaciones que se registran en campo es mayor en variabilidad al presentado con el programa.

- **Eje simple con llantas duales**

Las Figuras 10.47 y 10.48 muestran los rangos de deformaciones obtenidos para el eje simple con llantas duales de las simulaciones, en comparación con los datos de deformación obtenidos en campo.

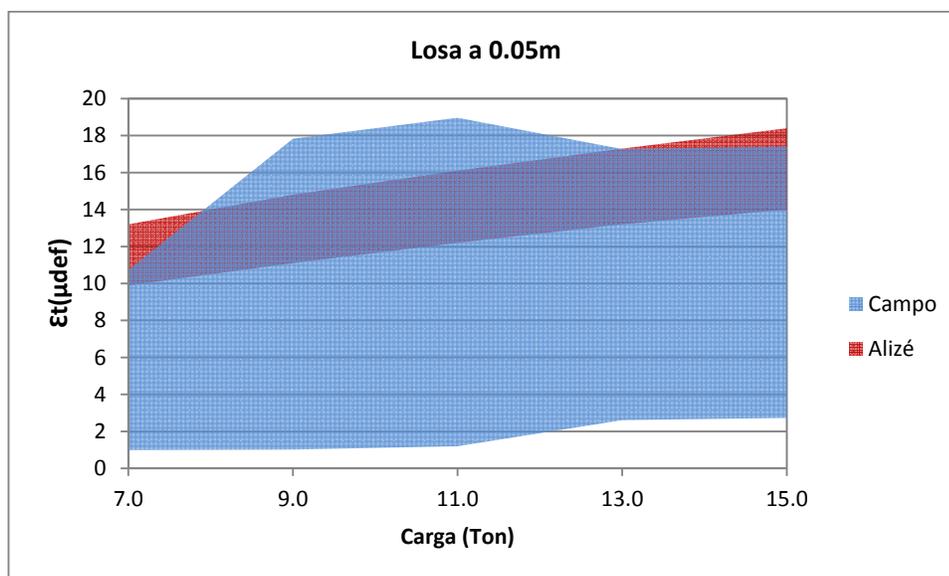


Figura 10.47. Intervalo de μ_{def} a 0.05m eje dual Alizé y Campo.

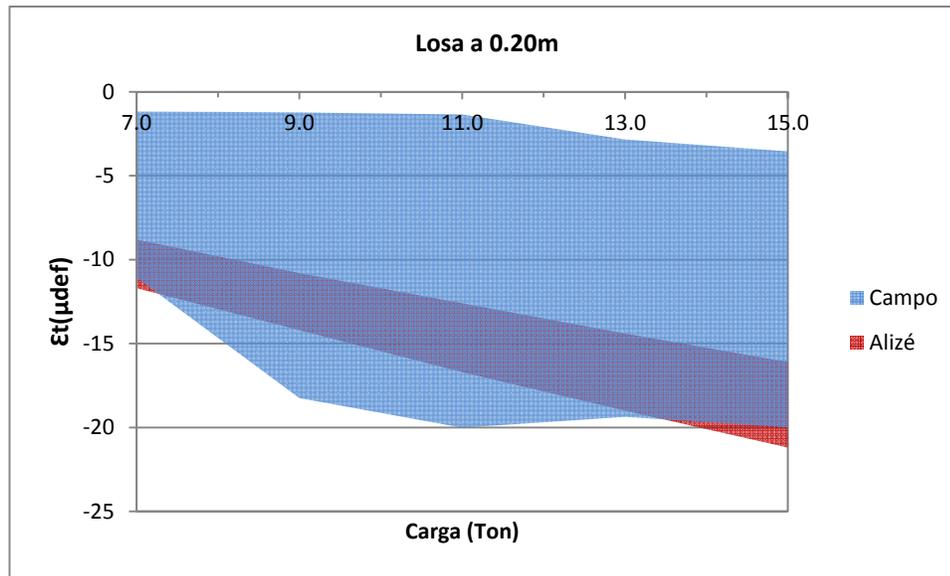


Figura 10.48. Intervalos de μ_{def} a 0.20m eje dual Alizé y Campo.

En el caso de este eje se observa que en los dos puntos de interés las deformaciones de campo presentan un amplio rango de respuesta en donde los valores de deformación superan las deformaciones máximas obtenidas a través de las simulaciones en Alizé. A 0.05 m de profundidad la situación anterior se presenta desde un carga de 8.0 ton hasta una 13.0 ton, mientras que a 0.20 m se presenta desde una carga de 7.3 ton hasta una de 13.0 ton. De igual manera, se observa una variabilidad considerable en las deformaciones presentadas en campo en comparación a las obtenidas con Alizé y se tienen deformaciones a compresión en el primer punto (0.05 m) y a tensión en el segundo (0.20 m).

10.2.5. Comparación para un valor fijo de carga

Para la carga con mayor frecuencia registrada en los datos de deformación se analizaron las diferencias en los intervalos de deformación obtenidas a partir de Alizé para los casos de diversas simulaciones, para el caso base y para los valores registrados en campo. Para el eje direccional se analizó el intervalo de deformaciones generado con una carga media de 7.0 ton, mientras que para el eje dual el intervalo presenta una carga media de 9.0 ton. A continuación se presentan los resultados correspondientes.

- **Eje direccional**

La Figura 10.49 presenta los rangos de deformaciones obtenidos en la losa de concreto para el eje simple direccional en los tres casos de análisis.

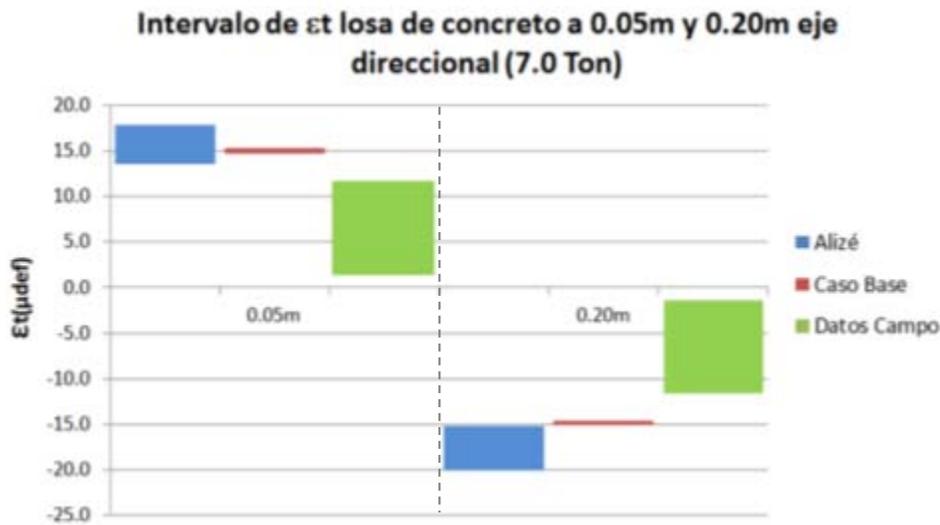


Figura 10.49. Intervalos de μ_{def} para carga de 7.0 ton eje direccional.

Para este caso, se observa que, en general, las deformaciones obtenidas en campo no superan ninguno de los rangos de deformación obtenidos en un caso base, ni siquiera cuando se modificaron los módulos de las capas en Alizé. En lo que respecta al caso base, se puede ver que presenta resultados de deformación menores a las obtenidas con Alizé al modificar el módulo del concreto pero, a pesar de esta condición, los valores son mayores a los obtenidos con los sensores en campo.

- **Eje simple con llantas duales**

La Figura 10.50 presenta los rangos de deformaciones obtenidos en la losa de concreto para el eje simple direccional en los tres casos de análisis.

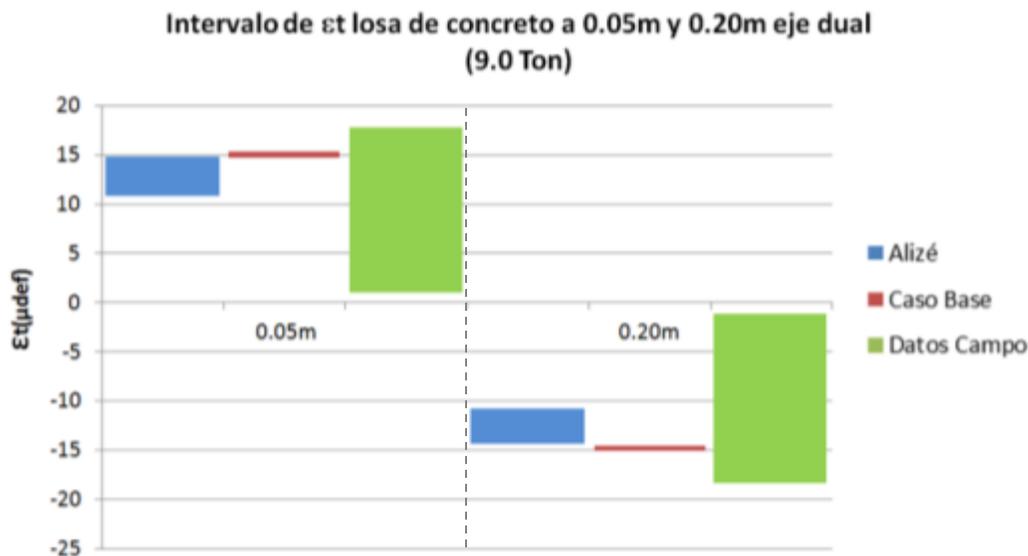


Figura 10.50. Intervalos de μ_{def} para carga de 9.0 Ton eje simple con llantas duales.

En este caso se puede ver que las deformaciones medidas en campo sí superan las deformaciones obtenidas con Alizé para los diversos casos, incluyendo el caso base. Esto se evidencia en ambas profundidades. Se puede observar que el caso base utilizado presenta deformaciones mayores a las obtenidas con Alizé con un rango de variabilidad bajo, respecto a lo obtenido al modificar el módulo del concreto pero, a pesar de estos, éstas son menores a las obtenidas en campo.

Al igual en el caso del pavimento flexible, en este caso se puede concluir que los valores capturados en campo presentan una amplia variación de los resultados de respuesta del pavimento. Estas variaciones no fueron capturadas en el caso de las simulaciones analizadas, lo que indica que las propiedades mecánicas varían mucho más que los valores de módulo supuestos en el caso de análisis. Adicionalmente, se observa que los valores máximos de deformación a tensión reportados en la parte inferior de la losa en campo alcanzan a superar los valores obtenidos en las simulaciones. Aun cuando estos valores de deformación (máximos campo vs máximos simulaciones) son cercanos, esta situación podría sugerir que hay deficiencias en la confiabilidad de los métodos empleados en el diseño. No obstante, se debe aclarar que las simulaciones en Alizé se realizaron suponiendo valores típicos de módulos y que, dado que estos poseen un rango de variación importante, es probable que las diferencias entre las máximas deformaciones encontradas en campo y mediante Alizé no sean realmente estadísticamente significativas.

11. Conclusiones y Recomendaciones

A continuación se presentan las principales conclusiones y recomendaciones que resultaron de la ejecución de las diferentes etapas realizadas como parte de este proyecto:

- Indudablemente, los sistemas de instrumentación de pavimentos proveen información del funcionamiento real de los pavimentos en servicio que, de otra forma, sería imposible adquirir. Los resultados obtenidos como parte de este proyecto demuestran que los datos capturados de estos sistemas pueden ser empleados de múltiples formas para ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de los pavimentos, para validar metodologías básicas de análisis y diseño de estructuras de pavimento y para cuantificar el impacto real que tienen los cambios climáticos en la respuesta de estas estructuras.

En este sentido, es importante mencionar que para obtener el mayor provecho de estos sistemas se requiere:

1. Recuperar la información almacenada en los sistemas de instrumentación de manera continua,
2. Revisar constantemente la calidad de la información recuperada con el fin de identificar fallas en alguno de los componentes del sistema,
3. En caso de identificar cualquier tipo de falla en el sistema, contar con una metodología pre-establecida que permita identificar la causa de la falla y las posibilidades para su eventual reparación,
4. Contar con herramientas computacionales eficientes que permitan un apropiado procesamiento de la información, y
5. Analizar la información obtenida para dar cumplimiento a los objetivos planteados en el estudio correspondiente.

Con respecto al último punto mencionado, es necesario mencionar que durante la etapa de planeación de un sistema de instrumentación en tramos de pavimentos en servicio se debe tener claridad sobre el propósito de la instrumentación y sobre los objetivos que se quieren alcanzar con estas actividades. Estos objetivos pueden ser, por ejemplo, realizar verificaciones de supuestos de diseño de pavimentos, revisar y definir factores de corrección o ajuste que se emplean en estas metodologías de diseño, revisar la evolución de la condición de servicio del pavimento y de su desempeño y deterioro a lo largo del tiempo, caracterizar el tipo de tráfico y la carga que circula por una vía y correlacionar las condiciones de carga impuestas por el tráfico con la respuesta del pavimento, verificar el buen funcionamiento de nuevas técnicas constructivas o el empleo de nuevos materiales, o emplear los valores obtenidos para calibrar modelos

numéricos del comportamiento del pavimento. Estos objetivos deben ser claramente planteados al inicio de los proyecto ya que éstos determinan no sólo el tipo de sistema de instrumentación a emplear, sino también las metodologías de procesamiento y análisis de la información provista por el sistema.

- Como se mencionó en el Capítulo 7, el procesamiento de las mediciones dinámicas constituyó uno de los principales retos de este proyecto. En general, la cantidad de información que se obtiene de un sistema de instrumentación es abrumadora, más aun cuando se considera que la información relacionada a las variables dinámicas se captura con una frecuencia de 4 milésimas de segundo. Por lo tanto, el diseño, la implementación y el empleo de un software para realizar las actividades de post-procesamiento de las señales de la información dinámica es fundamental para que estos procesos sean eficientes. En el caso de este proyecto, el desarrollo de este software requirió más tiempo del inicialmente estipulado, lo cual afectó el avance en las actividades de análisis de esta información durante los meses iniciales del proyecto. Adicionalmente, se debe contar con un mecanismo para organizar la información recolectada con el objetivo de que ésta sea útil para las actividades posteriores de análisis.
- A manera de observación general, se debe destacar que la experiencia en este proyecto permitió concluir que más que una cantidad significativa de volumen de la información, lo que se requiere para un buen análisis de los datos es información de buena calidad. En este sentido vale recordar que la pérdida temprana de algunos sensores impidió contar con información prolongada de diversas variables. No obstante, la información con la que se contaba fue suficiente para realizar análisis valiosos de la información y para cumplir con los objetivos planteados en el proyecto.
- En cuanto a las correlaciones de las variables estáticas o climáticas analizadas, se concluyó que aunque hay tendencias claras entre algunas de las variables consideradas, es probable que estas correlaciones dependan de más de una variable. Esta conclusión resulta de observar cómo las correlaciones entre la máxima temperatura diaria del aire y la máxima temperatura diaria del pavimento, así como entre la máxima radiación solar diaria del ambiente y la máxima temperatura diaria del pavimento, eran claras y definidas cuando se contaba con la información de unas cuantas semanas. Sin embargo, al aumentar el volumen de la información empleada en estas gráficas, la dispersión de los datos aumentó significativamente. Esto se puede deber a que existe una tercera variable que puede influenciar la relación entre los datos analizados. La validación de esta hipótesis se puede corroborar con un análisis más detallado de estos datos.

- Por otra parte, el análisis de correlaciones de variables climáticas también sirvió para analizar el tiempo que toman los eventos de lluvia en impactar las propiedades hídricas de las capas no cementadas del pavimento y el nivel freático en la zona del proyecto. Con respecto a este análisis, se concluyó que mientras que en el pavimento flexible de la Calle 80 estos tiempo son típicamente de 5 a 7 días, en el pavimento rígido de la Estación Alcalá estos valores de tiempo son más bajos y varían entre 1 y 3 días.

Aunque es difícil establecer las causas que explican estas diferencias, se cree que las condiciones circundantes al proyecto en cuanto al drenaje y a las condiciones de permeabilidad de los separadores adjuntos a los tramos instrumentados cumplen un rol importante en estos procesos. En el pavimento flexible el separador adjunto al tramo es de concreto mientras que en el pavimento rígido es de vegetación natural, lo que podría explicar por qué un evento de lluvia toma más tiempo en afectar las propiedades hídricas de los suelos en el pavimento flexible que en el pavimento rígido.

- En cuanto a las variables dinámicas, la información capturada por las balanzas de carga WIM permitieron establecer los espectros de carga por eje típicos de los dos tramos de estudio. Es importante mencionar que estos espectros corresponden a la carga dinámica que aplican los ejes de los buses articulados sobre el pavimento. Esta carga es usualmente más alta que la estática que se mediría en cada eje si el bus no se encontrara en movimiento. La relación entre la carga dinámica y la estática se conoce como el Factor de Amplificación de Carga o FAC. Para este proyecto se desconoce el valor de FAC de los tramos de interés, pero datos reportados en estudios de puentes disponibles en la bibliografía científica sugieren que un valor del 30% se puede considerar típico.

Con este dato, los espectros de carga dinámica fueron convertidos a espectros de carga estática. Estos nuevos espectros se emplearon para cuantificar las posibles excedencias de carga de los buses del sistema. Los resultados sugieren que entre el 12 y el 18% de los ejes que circulan en la Calle 80 presentan excedencia de carga, y entre el 5 y 24% de los ejes que circular en la Autopista Norte presentan excedencia de carga.

Es importante recordar que estos datos de excedencia dependen completamente del valor de FAC que se tome para el sistema. Si este valor es mayor al supuesto, las excedencias disminuirían drásticamente. Por esta razón, los valores presentados son sólo una primera aproximación y no corresponden a los valores reales de excedencia de carga. Por lo tanto, una recomendación importante que resulta de este estudio es la importancia de realizar actividades experimentales en campo que permitan determinar con certeza el FAC de los tramos de pavimento instrumentados.

- Adicionalmente, en el Capítulo 7 y en el Capítulo 10 se presentaron valores típicos de las variables de respuesta dinámica de los sistemas y se mostraron algunas correlaciones entre la carga aplicada y las deformaciones horizontales que se generan como consecuencia de estas cargas en algunas capas, así como entre la carga aplicada a la estructura y las deflexiones de las capas. En general, se observó una alta correlación de proporcionalidad entre estas variables.
- La información de las variables dinámicas también fue empleada para comparar los resultados que ofrece un programa elástico multicapa de uso común en las metodologías de diseño mecanicista de pavimentos (Alizé) con los valores reportados por los sensores localizados al interior del pavimento. En general, para el pavimento flexible se observó que los valores de deformaciones a tensión de las capas asfálticas reportados por el programa son superiores a los reportados en campo. Para el caso del pavimento rígido éstos valores se encuentran más cerca de los datos reales capturados por los sensores.

En los dos casos se puede concluir que los datos que proveen los programas son cercanos a los valores reales e, incluso, se puede decir que en la mayoría de los casos los resultados del programa corresponden a escenarios seguros o más conservadores. Adicionalmente, se observó que las condiciones climáticas generan una alta variación de la respuesta del pavimento. En otras palabras, para un mismo valor de carga la respuesta de los materiales tiene una alta variación como consecuencia de los cambios climáticos que se presentan al interior de la estructura y que afectan las propiedades mecánicas de los materiales.

Por otra parte, la ausencia de valores reales de los módulos de los materiales que se emplearon en los diseños originales de las estructuras dificultó este análisis. No obstante, este ejercicio fue muy interesante y, desde el punto de vista de los resultados obtenidos, es alentador en cuanto a que sugiere que el empleo de programas elásticos multicapa constituye una herramienta confiable para la predicción de la respuesta del pavimento.

- En el Capítulo 9 de este documento se presentó la formulación de un modelo dinámico acoplado de carga y temperatura para pavimentos. El modelo, que fue implementado numéricamente empleando la teoría de diferencias finitas, tiene tres características fundamentales que lo hacen muy superior a modelos similares disponibles en la literatura: 1) es tridimensional, 2) tiene carácter dinámico, es decir, la carga se aplica en forma de una onda y esta onda se propaga en todos los sentidos a medida que la carga avanza en el pavimento, y 3) el módulo térmico es capaz de predecir los perfiles internos de temperatura dentro de la estructura en función de un conjunto completo de características atmosféricas que caracterizan una zona en particular. Las simulaciones

realizadas con el programa mostraron su eficiente funcionamiento y su capacidad de acoplar los efectos mecánicos con los atmosféricos. No obstante, el modelo es susceptible a mejoras y éste requiere en la actualidad de una calibración detallada con base en los resultados reportados por los sistemas de instrumentación.

- Finalmente, en cuanto al estudio de envejecimiento de la carpeta de rodadura, se puede afirmar que los resultados obtenidos no son concluyentes. Por una parte, en los diferentes estudios realizados de caracterización reológica se observó que el asfalto localizado en la parte superior de la carpeta de rodadura tiene mayores valores de módulo complejo y menores valores de ángulo de fase que el asfalto localizado en la parte inferior de la carpeta de rodadura. Este resultado parece ser acorde con la teoría que predice que el envejecimiento del asfalto ocurre con mayor velocidad en los primeros centímetros de la carpeta de rodadura debido a su contacto directo con la atmósfera. No obstante, cuando se compararon las propiedades reológicas de asfaltos recuperados en diferentes periodos de tiempo (cada 3 meses por un periodo de 1 año), no se observó una tendencia definida en la rigidización del material. Resultados similares fueron encontrados en los ensayos de caracterización química mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier o FTIR. En conclusión, el estudio de envejecimiento arrojó resultados mixtos que no permitieron obtener conclusiones confiables. En cuanto al ensayo de FTIR, se recomienda desarrollar un procedimiento estandarizado de preparación de las muestras y de análisis de los resultados, con el objetivo de garantizar resultados consistentes, comparables y de alta calidad.
- A manera de resumen, se puede concluir que en la actualidad el sistema de instrumentación del Pavimento Flexible (Calle 80) tiene un 39.5% de sus sensores en funcionamiento y reportando datos válidos, y el sistema de instrumentación de Pavimento Rígido (Estación Alcalá) tiene un 38.4% de sus sensores en funcionamiento y reportando datos válidos. Esto es producto del deterioro normal de los equipos expuestos algunos a la intemperie, y otros, a las solicitaciones extremas impuestas por el tránsito y por el ambiente. Sin embargo, algunos de estos sensores y equipos pueden ser recuperados, ejemplo: los equipos de captura de información (la “estación meteorológica” y los almacenados al interior de las cajas de adquisición de datos de ambas estaciones instrumentadas). Aquellos equipos instalados al interior de la estructura, incluidas las balanzas WIM no podrán ser recuperados, más aún cuando la mayoría de los mismos se reportaron como averiados al final del proyecto.
- Con base en la experiencia adquirida a través de la primera fase de este proyecto y durante la ejecución de este convenio, se recomienda:
 1. Implementar sistemas que permitan la revisión y descarga de la información mediante tecnología inalámbrica. En los sistemas de instrumentación desarrollados

como parte de este proyecto la información debe ser recuperada mediante visitas a campo. Las visitas constantes a los tramos son importantes y de cualquier forma se deben realizar, pues éstas permiten identificar situaciones o factores del entorno que pueden afectar el sistema de instrumentación, así como aspectos del sistema que requieren reparación. Dos ejemplos de estas situaciones fueron la identificación del punzonamiento de los cables observado en la entrada a la caja de instrumentación del sistema Alcalá y la situación detectada en los sistemas de medida de carga tipo WIM en donde la tapa de la balanza se soltó en varias oportunidades, presentando una amenaza al funcionamiento y operación del sistema de transporte masivo.

No obstante, la posibilidad de revisar la información de manera inalámbrica permitiría una revisión más frecuente de la calidad de la información y la identificación prematura de problemas en el sistema, tales como la pérdida de la señales de medición de uno o más sensores. En este sentido, se puede mencionar como ejemplo el caso del pavimento flexible (Calle 80 con estación Escuela Militar), en donde después de realizar las reparaciones de los deformímetros de las capas asfálticas se observó la pérdida intermitente de las mediciones de las variables dinámicas. Aunque el problema fue finalmente solucionado, el seguimiento del problema requirió la asistencia constante al tramo instrumentado para la verificación de la calidad de la información capturada. Si bien un mecanismo que permita este tipo de revisiones desde una oficina no hubiera evitado que se presentara el problema mencionado, éste sí hubiera permitido realizar actividades de tipo correctivo más eficientes que, en consecuencia, hubieran permitido contar con una mayor cantidad de información de estas variables.

2. Como se mencionó con anterioridad, los sistemas de instrumentación requieren de un seguimiento permanente que incluya actividades de mantenimiento rutinario del sistema y que permita determinar la presencia de posibles daños en el sistema. En el Manual de Sistemas de Instrumentación de Pavimentos, que resultó de la Fase I de este proyecto, se presentaron metodologías para enfrentar situaciones en las cuales se detecte la pérdida de señales de sensores.

En la mayoría de los casos, la ausencia de la señal de un sensor implica dar de baja el sensor respectivo y aceptar esta pérdida como parte del deterioro natural de los sistemas de instrumentación. No obstante, en dicho Manual también se presentan algunos casos particulares de sensores que, debido a su ubicación o a su naturaleza, permiten realizar actividades relativamente sencillas de reparación. Este fue el caso de las balanzas de carga o WIM. En el sistema de la Calle 80 se detectó la pérdida temprana de mediciones de la carga impuesta por los buses articulados del sistema sobre el pavimento. Debido a la importancia de esta información, se procedió a realizar una reparación que incluyó el cambio del tipo de sensores

empleados para las mediciones. Los resultados fueron tan positivos, que incluso se decidió realizar un cambio similar en las balanzas WIM instaladas en el pavimento rígido en la estación Alcalá.

En este sentido, es también importante mencionar que existen situaciones excepcionales en donde la reparación no es sencilla pero que, debido a otras razones, ésta se justifica. A manera de ejemplo se puede mencionar el caso de los deformímetros instalados en las capas asfálticas del pavimento flexible. Algunos de estos deformímetros se dañaron durante la construcción del pavimento y los restantes dejaron de funcionar al cabo de unos meses de la puesta en servicio del sistema de instrumentación. Debido a que no se contaba con información válida de estos sensores y a que estas variables son fundamentales en el análisis de estructuras de pavimento (i.e., para controlar los procesos de fatiga), era importante evaluar la posibilidad de su recuperación. Para esto, se propuso realizar actividades invasivas que permitieran la re-instalación de los sensores en el pavimento. Estas actividades incluyeron la extracción de núcleos del tramo instrumentado y la ejecución de labores intensivas de instalación, prueba y calibración de sensores tipo strain gauge en estos núcleos en el laboratorio. Al finalizar estas actividades, los núcleos fueron re-ubicados en campo y sus cables fueron conducidos a nivel subsuperficial del pavimento a la caja de instrumentación.

El resultado inicial de estas actividades de reparación fue muy satisfactorio, puesto que los sensores reportaron datos válidos. No obstante, la metodología empleada demostró no ser duradera en el mediano o largo plazo. Esta conclusión se deriva de la pérdida registrada de los sensores luego de, aproximadamente, un mes de su instalación. No obstante, el equipo de trabajo no considera que esto signifique que la técnica desarrollada no pueda o deba ser empleada en el futuro, sino que esta metodología requiere mejoras. Específicamente, se cree que la pérdida de lecturas se debe a la pérdida de adhesión entre las capas de mezcla asfáltica y las placas de garolita que se emplearon para la instalación de los sensores. Con base en esta experiencia, para futuras experiencias se recomienda: 1) instalar sensores de mayor tamaño directamente sobre el espécimen para evitar la presencia de interfaces entre varios materiales, y b) realizar pruebas de carga dinámica de larga duración sobre los especímenes en el laboratorio para verificar su funcionamiento ante condiciones exigentes como las esperadas en campo.

A manera de recomendación general, ante un daño eminente de un sensor se debe evaluar la factibilidad de su reparación considerando las particularidades específicas del sensor, su importancia dentro del proyecto, las diversas posibilidades para su recuperación y los costos asociados a estas actividades.

3. Finalmente, se encontró que una dificultad importante para realizar las actividades de análisis y modelación en este proyecto fue la ausencia de los valores de las propiedades mecánicas de los materiales que conforman las estructuras del pavimento. La información disponible de los tramos instrumentados incluía solamente los espesores y los materiales genéricos que conformaban cada uno de los pavimentos. En este sentido, para futuros proyectos se recomienda realizar una caracterización muy completa de las propiedades físicas y mecánicas de todos y cada uno de los materiales que conforman las capas del pavimento. Esta información es fundamental para realizar actividades de verificación de diseño de pavimentos y para realizar análisis confiables del comportamiento esperado de las estructuras.
- Se recomienda recuperar los siguientes elementos de los sistemas de instrumentación tanto de la Estación Escuela Militar (Pavimento Flexible), como de la Estación Alcalá (Pavimento Rígido):
 - Una (1) caja de adquisición de datos con su contenido: el sistema de captura de información y un (1) PC portátil, en cada estación instrumentada.
 - Una (1) estación meteorológica, localizada en la parte superior de los vagones de cada estación.
 - Un (1) sistema de adquisición de datos de variables meteorológicas, localizado en los gabinetes dentro de cada una de las estaciones.

Lo anterior, con el ánimo de conservar los elementos y equipos que una vez finalizado el Convenio 10 de 2011, pueden ser de utilidad para posteriores actividades del IDU.

- Por último, se sugiere considerar la posibilidad de utilizar los equipos recuperados del presente proyecto, adaptándolos como unidades portátiles que puedan ser desplazadas a distintos puntos de instrumentación de la ciudad; de acuerdo con los intereses de la Entidad.

12. Referencias

Acelas, A.F. "Recopilación y Análisis de Ensayos de Caracterización Dinámica de Materiales Asfálticos en Colombia". Proyecto de Grado. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Los Andes. Bogotá, Colombia.

M. Le Guern, E. Chailleux, F. Farcas, S. Dreessen, I. Mabile. Physico-chemical analysis of five hard bitumens: Identification of chemical species and molecular organization before and after artificial aging. *Fuel* 89 (2010).

Mothé, Michelle G. and others. Thermal Characterization of Asphalt Mixtures by TG/DTG, DTA and FTIR. Department of Organic Processes, School of Chemistry, Federal university of Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol 93 (2008). 105-109.

Ohminato, T., & Bernard, A. (1997). A Free-Surface Boundary Condition for Including 3D Topography in the Finite-Difference Method. *Seismological Society of America* , 87 (2), 494-515.

Samuel Lai and Kumares C. Sinha. Purdue University, Indianapolis. *Measures of Short-Term Effectiveness of Highways Pavement Maintenance*. *Journal of Transportation Engineering*. Vol 129, No. 6, November 1, 2003. ASCE, USA.

Tristancho, J., Caicedo, B., & Thorel, L. (2010). "Algunos avances en la modelización física en centrífuga para suelos no saturados". Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes, Reconnaissance et Mécanique des Sols.

13. Lista de Anexos

- ANEXO 1. Reportes de procesamiento de variables estáticas.
- ANEXO 2. Código del programa de procesamiento de variables dinámicas.
- ANEXO 3. Reportes de procesamiento de variables dinámicas.
- ANEXO 4. Compilación resumida de variables dinámicas.
- ANEXO 5. Resultados adicionales de la respuesta del modelo mecánico.
- ANEXO 6. Datos de clima obtenidos de la Calle 80-Escuela Militar empleados para la simulación acoplada de pavimentos.
- ANEXO 7. Código de programación del Modelo Numérico.
- ANEXO 8. Memorias del proyecto en medio magnético.

ANEXO 1

Reportes de procesamiento de variables estáticas

ANEXO 2

Código del programa de procesamiento de variables dinámicas

ANEXO 3

Código del programa de procesamiento de variables dinámicas

ANEXO 4

Compilación resumida de variables dinámicas

ANEXO 5

Resultados adicionales de las simulaciones con el módulo mecánico del modelo numérico

Resultados para el eje delantero o eje 1 con carga de 10.8 ton

Para el caso de 10.8 toneladas la onda aplicada corresponde a la presentada en la Figura A.5.1. Esta onda tiene una amplitud de 242210 Pa y una frecuencia de 35.37 Hz.

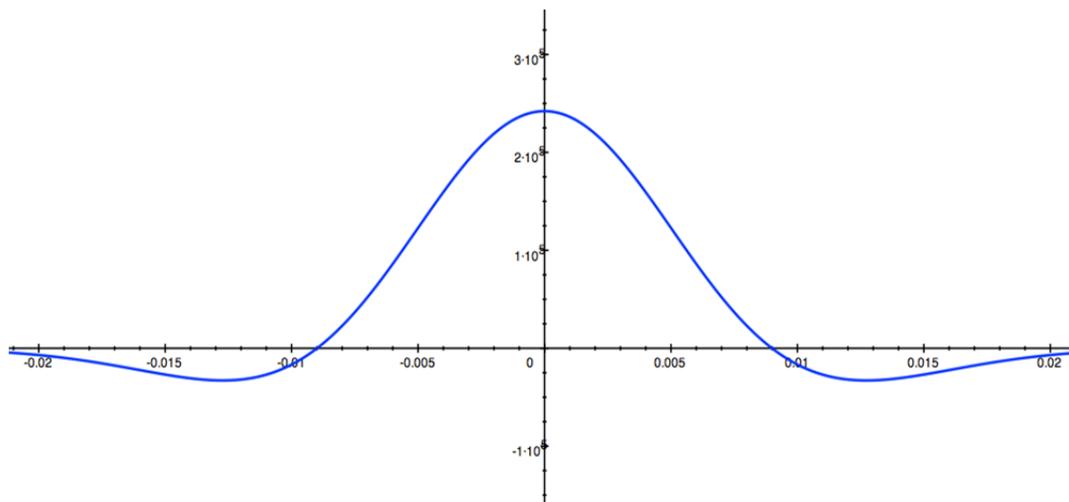


Figura A.5.1. Onda Ricker de Presión (Pa) contra Tiempo (s) para 10.8 Ton.

La Figura A.5.2 presenta los resultados de los desplazamientos en “y” para la sección central o longitudinal. De forma similar, la Figura A.5.3. muestra los resultados equivalentes obtenidos para la sección transversal del modelo.

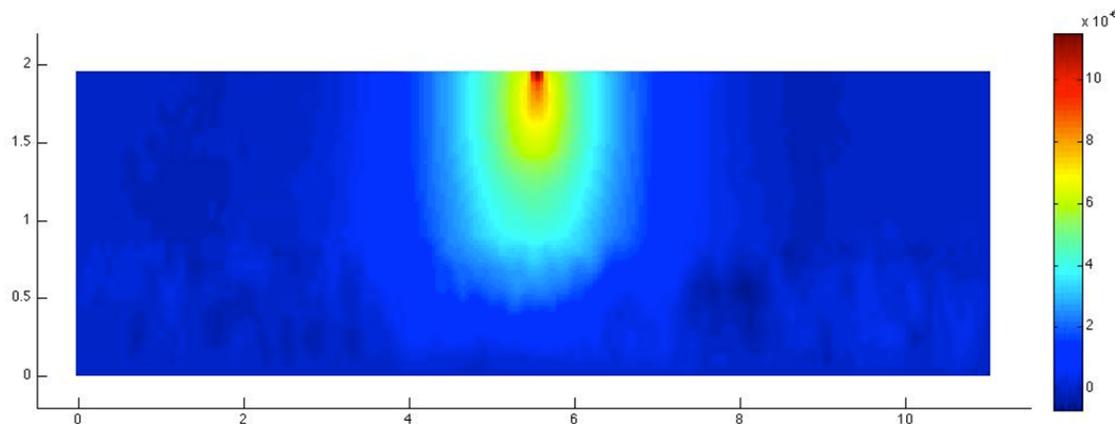


Figura A.5.2. Desplazamientos en "y(m)" para el plano central de la pista.

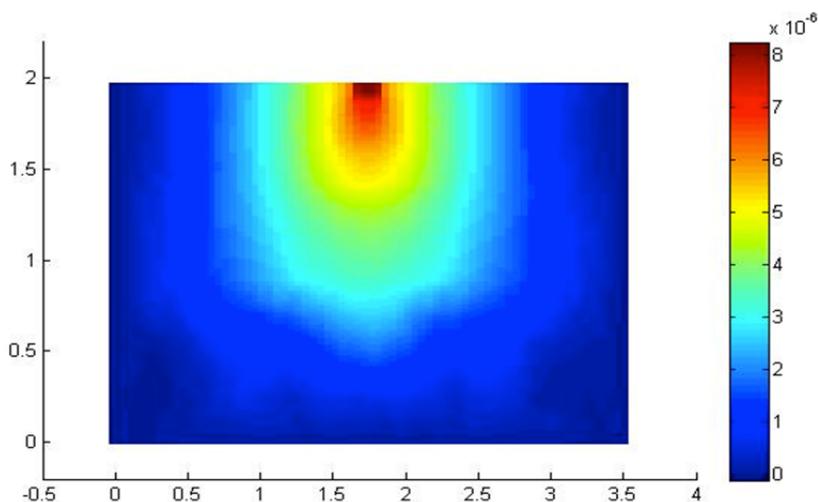


Figura A.5.3. Desplazamientos en "y(m)" para la sección transversal de la Pista.

Los valores máximos y mínimos se muestran en las Tablas A.5.1, A.5.2 y A.5.3.

Tabla A.5.1. Valores máximos y mínimos de deformaciones axiales durante la simulación.

Nodo	Capa	$\epsilon_x(m/m)$		$\epsilon_y(m/m)$		$\epsilon_z(m/m)$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-5.000.E-06	6.450.E-06	-8.175.E-06	6.025.E-05	-6.875.E-06	7.750.E-06
	Capa 1-2	-5.575.E-07	1.433.E-05	-5.550.E-06	4.900.E-05	-7.000.E-07	2.000.E-05
	Capa 2-1	-3.870.E-07	5.530.E-06	-1.410.E-06	1.570.E-05	-3.700.E-07	7.060.E-06
	Capa 2-3	-1.650.E-06	1.040.E-06	-2.500.E-07	5.940.E-06	-9.200.E-07	2.970.E-07
	Capa 3-2	-3.183.E-06	7.583.E-07	-4.117.E-07	5.800.E-06	-2.433.E-06	3.250.E-07
	Capa 3-4	-4.017.E-06	5.400.E-07	-3.900.E-07	3.400.E-06	-3.567.E-06	3.083.E-07
	Capa 4-3	-3.840.E-06	7.350.E-07	-8.400.E-07	7.050.E-06	-3.225.E-06	5.850.E-07
	Capa 4-5	-3.820.E-06	1.015.E-06	-7.050.E-07	1.520.E-06	-4.160.E-06	7.250.E-07
	Capa 5-4	-3.833.E-06	2.910.E-06	-2.057.E-06	6.267.E-06	-4.367.E-06	1.910.E-06
	Capa 5-SN	-3.567.E-06	1.843.E-06	-1.983.E-06	1.987.E-06	-3.767.E-06	1.507.E-06
Capa SN-5	-4.867.E-06	5.633.E-06	-5.733.E-06	1.100.E-05	-4.833.E-06	5.300.E-06	

Tabla A.5.2. Valores Máximos y Mínimos de esfuerzos durante la simulación.

Nodo	Capa	σ_{xx} (Pa)		σ_{yy} (Pa)		σ_{zz} (Pa)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-2.000.E+04	2.580.E+04	-3.270.E+04	2.410.E+05	-2.750.E+04	3.100.E+04
	Capa 1-2	-2.230.E+03	5.730.E+04	-2.220.E+04	1.960.E+05	-2.800.E+03	8.000.E+04
	Capa 2-1	-3.870.E+03	5.530.E+04	-1.410.E+04	1.570.E+05	-3.700.E+03	7.060.E+04
	Capa 2-3	-1.650.E+04	1.040.E+04	-2.500.E+03	5.940.E+04	-9.200.E+03	2.970.E+03
	Capa 3-2	-1.910.E+04	4.550.E+03	-2.470.E+03	3.480.E+04	-1.460.E+04	1.950.E+03
	Capa 3-4	-2.410.E+04	3.240.E+03	-2.340.E+03	2.040.E+04	-2.140.E+04	1.850.E+03
	Capa 4-3	-7.680.E+03	1.470.E+03	-1.680.E+03	1.410.E+04	-6.450.E+03	1.170.E+03
	Capa 4-5	-7.640.E+03	2.030.E+03	-1.410.E+03	3.040.E+03	-8.320.E+03	1.450.E+03
	Capa 5-4	-1.150.E+03	8.730.E+02	-6.170.E+02	1.880.E+03	-1.310.E+03	5.730.E+02
	Capa 5-SN	-1.070.E+03	5.530.E+02	-5.950.E+02	5.960.E+02	-1.130.E+03	4.520.E+02
Capa SN-5	-1.460.E+02	1.690.E+02	-1.720.E+02	3.300.E+02	-1.450.E+02	1.590.E+02	

Tabla A.5.3. Valores Máximos y Mínimos de desplazamientos durante la simulación.

Nodo	Capa	desp "x" (m)		desp "y" (m)		desp "z" (m)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-2.790.E-07	2.760.E-07	-4.650.E-07	1.110.E-05	-3.500.E-07	3.590.E-07
	Capa 1-2	-5.420.E-07	5.430.E-07	-4.740.E-07	8.780.E-06	-1.140.E-07	1.120.E-07
	Capa 2-1	-4.250.E-07	4.130.E-07	-4.750.E-07	8.460.E-06	-7.670.E-08	2.620.E-08
	Capa 2-3	-2.740.E-07	2.530.E-07	-4.640.E-07	7.880.E-06	-2.910.E-08	1.280.E-07
	Capa 3-2	-3.880.E-07	3.930.E-07	-4.540.E-07	7.600.E-06	-2.590.E-08	1.780.E-07
	Capa 3-4	-4.420.E-07	4.430.E-07	-4.440.E-07	7.370.E-06	-2.710.E-08	1.850.E-07
	Capa 4-3	-5.870.E-07	5.780.E-07	-4.290.E-07	7.030.E-06	-4.090.E-08	2.330.E-07
	Capa 4-5	-8.560.E-07	8.930.E-07	-4.220.E-07	6.130.E-06	-5.160.E-08	1.840.E-07
	Capa 5-4	-1.050.E-06	1.070.E-06	-4.010.E-07	5.750.E-06	-6.360.E-08	2.320.E-07
	Capa 5-SN	-1.370.E-06	1.410.E-06	-4.420.E-07	4.130.E-06	-1.010.E-07	2.110.E-07
Capa SN-5	-1.620.E-06	1.650.E-06	-6.910.E-07	3.560.E-06	-2.070.E-07	3.050.E-07	

Resultados para el eje central o eje 2 con carga de 14.5 ton

Para el caso de 14.5 toneladas, la onda Ricker resultante se muestra en la Figura A.5.4. Esta onda tiene una amplitud de 162590 Pa, y una frecuencia de 35.37 Hz.

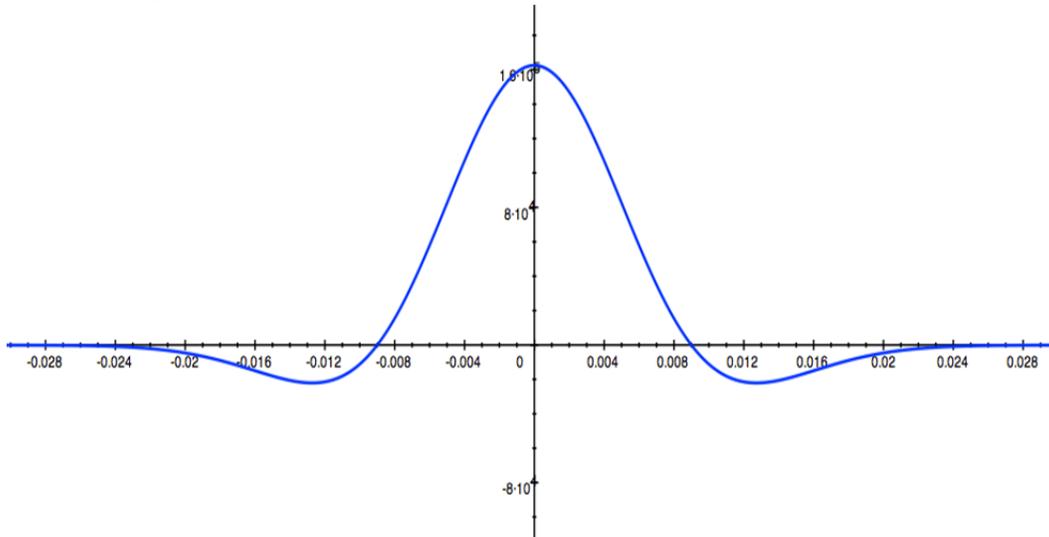


Figura A.5.4. Onda Ricker de Presión (Pa) contra Tiempo (s) para 14.5 Toneladas

La sección central obtenida se muestra en la Figura A.5.5 para 0.45 segundos.

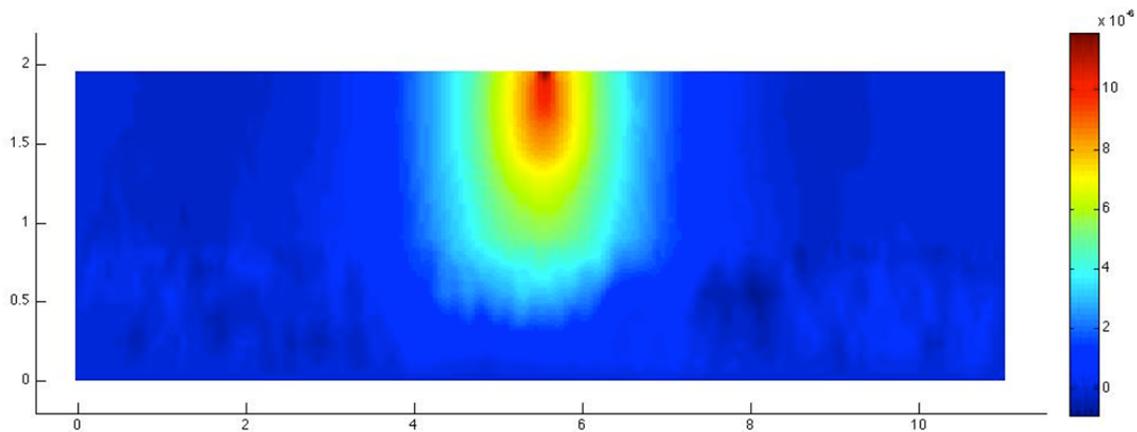


Figura A.5.5. Desplazamientos en "y(m)" para el plano central de la pista.

La sección transversal para este caso se muestra en la Figura A.5.6.

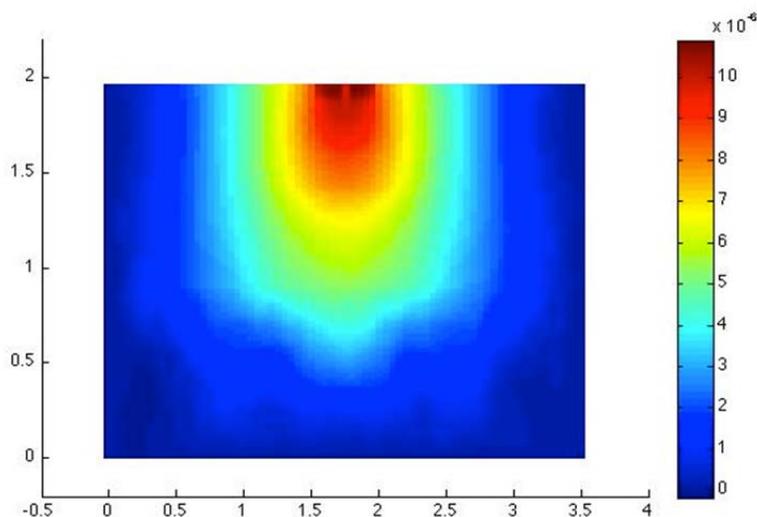


Figura A.5.6. Desplazamientos en "y(m)" para la sección transversal de la Pista.

Los valores máximos y mínimos se muestran en las Tablas A.5.4, A.5.5 y A.5.6.

Tabla A.5.4. Valores Máximos y Mínimos de deformación durante la simulación

Nodo	Capa	$\epsilon_x(m/m)$		$\epsilon_y(m/m)$		$\epsilon_z(m/m)$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-5.575.E-06	5.950.E-06	-5.500.E-06	4.050.E-05	-5.300.E-06	5.325.E-06
	Capa 1-2	-7.200.E-07	1.150.E-05	-3.450.E-06	3.325.E-05	-5.450.E-07	1.565.E-05
	Capa 2-1	-4.060.E-07	4.910.E-06	-9.660.E-07	1.070.E-05	-2.940.E-07	6.220.E-06
	Capa 2-3	-1.360.E-06	9.700.E-07	-2.360.E-07	4.370.E-06	-1.600.E-07	3.470.E-07
	Capa 3-2	-2.967.E-06	6.017.E-07	-5.233.E-07	4.867.E-06	-1.447.E-06	2.783.E-07
	Capa 3-4	-4.067.E-06	5.200.E-07	-4.050.E-07	2.917.E-06	-2.833.E-06	2.683.E-07
	Capa 4-3	-3.970.E-06	8.250.E-07	-8.400.E-07	6.300.E-06	-2.455.E-06	6.050.E-07
	Capa 4-5	-4.695.E-06	9.600.E-07	-6.350.E-07	1.605.E-06	-4.820.E-06	6.650.E-07
	Capa 5-4	-4.167.E-06	3.600.E-06	-2.610.E-06	7.167.E-06	-4.700.E-06	2.310.E-06
	Capa 5-SN	-4.333.E-06	2.117.E-06	-1.617.E-06	3.077.E-06	-4.900.E-06	1.617.E-06
Capa SN-5	-6.433.E-06	6.967.E-06	-7.233.E-06	1.440.E-05	-5.833.E-06	6.633.E-06	
Nodo B	Superficial	-5.300.E-06	5.825.E-06	-5.500.E-06	4.050.E-05	-5.475.E-06	5.225.E-06
	Capa 1-2	-7.475.E-07	1.058.E-05	-3.300.E-06	2.925.E-05	-5.350.E-07	1.398.E-05
	Capa 2-1	-4.700.E-07	4.660.E-06	-8.690.E-07	9.260.E-06	-3.090.E-07	6.070.E-06
	Capa 2-3	-1.420.E-06	9.310.E-07	-2.230.E-07	3.970.E-06	-1.700.E-07	3.550.E-07
	Capa 3-2	-3.017.E-06	6.483.E-07	-5.000.E-07	4.633.E-06	-1.253.E-06	2.983.E-07
	Capa 3-4	-4.217.E-06	5.550.E-07	-5.367.E-07	2.983.E-06	-2.833.E-06	3.500.E-07
	Capa 4-3	-3.885.E-06	8.650.E-07	-8.650.E-07	6.700.E-06	-2.455.E-06	6.000.E-07

Nodo	Capa	$\epsilon_x(m/m)$		$\epsilon_y(m/m)$		$\epsilon_z(m/m)$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
	Capa 4-5	-4.870.E-06	1.070.E-06	-7.150.E-07	1.710.E-06	-4.775.E-06	6.350.E-07
	Capa 5-4	-4.300.E-06	2.963.E-06	-2.280.E-06	8.133.E-06	-4.500.E-06	2.283.E-06
	Capa 5-SN	-4.300.E-06	2.167.E-06	-1.987.E-06	2.307.E-06	-4.867.E-06	1.817.E-06
	Capa SN-5	-6.300.E-06	7.300.E-06	-6.933.E-06	1.440.E-05	-5.333.E-06	6.333.E-06
Nodo C	Superficial	-4.925.E-06	5.025.E-06	0.000.E+00	0.000.E+00	-4.375.E-06	5.850.E-06
	Capa 1-2	-7.775.E-07	7.125.E-06	-1.530.E-06	9.875.E-06	-6.325.E-07	1.648.E-05
	Capa 2-1	-5.250.E-07	3.760.E-06	-5.040.E-07	4.630.E-06	-3.750.E-07	6.360.E-06
	Capa 2-3	-1.450.E-06	9.410.E-07	-2.460.E-07	3.390.E-06	-1.560.E-07	6.770.E-07
	Capa 3-2	-3.050.E-06	6.517.E-07	-4.850.E-07	4.317.E-06	-1.045.E-06	3.017.E-07
	Capa 3-4	-4.217.E-06	5.550.E-07	-5.367.E-07	2.983.E-06	-2.833.E-06	3.500.E-07
	Capa 4-3	-3.905.E-06	9.050.E-07	-9.350.E-07	6.600.E-06	-2.360.E-06	6.200.E-07
	Capa 4-5	-4.995.E-06	8.900.E-07	-8.650.E-07	1.850.E-06	-4.800.E-06	6.900.E-07
	Capa 5-4	-4.500.E-06	2.503.E-06	-2.033.E-06	7.667.E-06	-4.267.E-06	1.940.E-06
	Capa 5-SN	-4.367.E-06	2.187.E-06	-1.967.E-06	2.303.E-06	-5.633.E-06	1.943.E-06
	Capa SN-5	-6.067.E-06	8.567.E-06	-7.067.E-06	1.483.E-05	-6.433.E-06	7.900.E-06

Tabla A.5.5. Valores Máximos y Mínimos de esfuerzos durante la simulación.

Nodo	Capa	$\sigma_{xx}(Pa)$		$\sigma_{yy}(Pa)$		$\sigma_{zz}(Pa)$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-2.230.E+04	2.380.E+04	-2.200.E+04	1.620.E+05	-2.120.E+04	2.130.E+04
	Capa 1-2	-2.880.E+03	4.600.E+04	-1.380.E+04	1.330.E+05	-2.180.E+03	6.260.E+04
	Capa 2-1	-4.060.E+03	4.910.E+04	-9.660.E+03	1.070.E+05	-2.940.E+03	6.220.E+04
	Capa 2-3	-1.360.E+04	9.700.E+03	-2.360.E+03	4.370.E+04	-1.600.E+03	3.470.E+03
	Capa 3-2	-1.780.E+04	3.610.E+03	-3.140.E+03	2.920.E+04	-8.680.E+03	1.670.E+03
	Capa 3-4	-2.440.E+04	3.120.E+03	-2.430.E+03	1.750.E+04	-1.700.E+04	1.610.E+03
	Capa 4-3	-7.940.E+03	1.650.E+03	-1.680.E+03	1.260.E+04	-4.910.E+03	1.210.E+03
	Capa 4-5	-9.390.E+03	1.920.E+03	-1.270.E+03	3.210.E+03	-9.640.E+03	1.330.E+03
	Capa 5-4	-1.250.E+03	1.080.E+03	-7.830.E+02	2.150.E+03	-1.410.E+03	6.930.E+02
	Capa 5-SN	-1.300.E+03	6.350.E+02	-4.850.E+02	9.230.E+02	-1.470.E+03	4.850.E+02
Capa SN-5	-1.930.E+02	2.090.E+02	-2.170.E+02	4.320.E+02	-1.750.E+02	1.990.E+02	
Nodo B	Superficial	-2.120.E+04	2.330.E+04	-2.200.E+04	1.620.E+05	-2.190.E+04	2.090.E+04
	Capa 1-2	-2.990.E+03	4.230.E+04	-1.320.E+04	1.170.E+05	-2.140.E+03	5.590.E+04
	Capa 2-1	-4.700.E+03	4.660.E+04	-8.690.E+03	9.260.E+04	-3.090.E+03	6.070.E+04
	Capa 2-3	-1.420.E+04	9.310.E+03	-2.230.E+03	3.970.E+04	-1.700.E+03	3.550.E+03
	Capa 3-2	-1.810.E+04	3.890.E+03	-3.000.E+03	2.780.E+04	-7.520.E+03	1.790.E+03

Nodo	Capa	σ_{xx} (Pa)		σ_{yy} (Pa)		σ_{zz} (Pa)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
	Capa 3-4	-2.530.E+04	3.330.E+03	-3.220.E+03	1.790.E+04	-1.700.E+04	2.100.E+03
	Capa 4-3	-7.770.E+03	1.730.E+03	-1.730.E+03	1.340.E+04	-4.910.E+03	1.200.E+03
	Capa 4-5	-9.740.E+03	2.140.E+03	-1.430.E+03	3.420.E+03	-9.550.E+03	1.270.E+03
	Capa 5-4	-1.290.E+03	8.890.E+02	-6.840.E+02	2.440.E+03	-1.350.E+03	6.850.E+02
	Capa 5-SN	-1.290.E+03	6.500.E+02	-5.960.E+02	6.920.E+02	-1.460.E+03	5.450.E+02
	Capa SN-5	-1.890.E+02	2.190.E+02	-2.080.E+02	4.320.E+02	-1.600.E+02	1.900.E+02
Nodo C	Superficial	-1.970.E+04	2.010.E+04	0.000.E+00	0.000.E+00	-1.750.E+04	2.340.E+04
	Capa 1-2	-3.110.E+03	2.850.E+04	-6.120.E+03	3.950.E+04	-2.530.E+03	6.590.E+04
	Capa 2-1	-5.250.E+03	3.760.E+04	-5.040.E+03	4.630.E+04	-3.750.E+03	6.360.E+04
	Capa 2-3	-1.450.E+04	9.410.E+03	-2.460.E+03	3.390.E+04	-1.560.E+03	6.770.E+03
	Capa 3-2	-1.830.E+04	3.910.E+03	-2.910.E+03	2.590.E+04	-6.270.E+03	1.810.E+03
	Capa 3-4	-2.530.E+04	3.330.E+03	-3.220.E+03	1.790.E+04	-1.700.E+04	2.100.E+03
	Capa 4-3	-7.810.E+03	1.810.E+03	-1.870.E+03	1.320.E+04	-4.720.E+03	1.240.E+03
	Capa 4-5	-9.990.E+03	1.780.E+03	-1.730.E+03	3.700.E+03	-9.600.E+03	1.380.E+03
	Capa 5-4	-1.350.E+03	7.510.E+02	-6.100.E+02	2.300.E+03	-1.280.E+03	5.820.E+02
	Capa 5-SN	-1.310.E+03	6.560.E+02	-5.900.E+02	6.910.E+02	-1.690.E+03	5.830.E+02
	Capa SN-5	-1.820.E+02	2.570.E+02	-2.120.E+02	4.450.E+02	-1.930.E+02	2.370.E+02

Tabla A.5.6. Valores Máximos y Mínimos de desplazamientos durante la simulación

Nodo	Capa	desp "x" (m)		desp "y" (m)		desp "z" (m)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-3.380.E-07	2.890.E-07	-5.920.E-07	1.160.E-05	-2.950.E-07	2.400.E-07
	Capa 1-2	-7.020.E-07	6.960.E-07	-6.020.E-07	1.020.E-05	-2.780.E-07	3.580.E-08
	Capa 2-1	-5.570.E-07	5.340.E-07	-6.060.E-07	1.000.E-05	-1.970.E-07	2.510.E-08
	Capa 2-3	-2.590.E-07	2.460.E-07	-5.980.E-07	9.650.E-06	-4.120.E-08	1.060.E-07
	Capa 3-2	-4.030.E-07	4.120.E-07	-5.900.E-07	9.430.E-06	-2.770.E-08	2.280.E-07
	Capa 3-4	-5.030.E-07	5.030.E-07	-5.850.E-07	9.240.E-06	-3.030.E-08	3.110.E-07
	Capa 4-3	-6.940.E-07	6.790.E-07	-5.770.E-07	8.940.E-06	-5.250.E-08	4.230.E-07
	Capa 4-5	-1.110.E-06	1.150.E-06	-5.360.E-07	7.950.E-06	-6.700.E-08	4.460.E-07
	Capa 5-4	-1.370.E-06	1.430.E-06	-5.290.E-07	7.480.E-06	-7.770.E-08	5.700.E-07
	Capa 5-SN	-1.820.E-06	1.890.E-06	-5.520.E-07	5.440.E-06	-1.610.E-07	4.660.E-07
Nodo B	Superficial	-3.470.E-07	3.280.E-07	-5.790.E-07	1.150.E-05	-2.830.E-07	2.820.E-07
	Capa 1-2	-7.150.E-07	7.030.E-07	-6.010.E-07	1.020.E-05	-2.640.E-07	3.230.E-08
	Capa 2-1	-5.590.E-07	5.380.E-07	-6.070.E-07	1.010.E-05	-1.530.E-07	2.760.E-08

	Capa 2-3	-2.650.E-07	2.520.E-07	-6.020.E-07	9.770.E-06	-3.650.E-08	5.340.E-08
	Capa 3-2	-4.170.E-07	4.210.E-07	-5.910.E-07	9.560.E-06	-2.790.E-08	1.300.E-07
	Capa 3-4	-5.170.E-07	5.210.E-07	-5.790.E-07	9.360.E-06	-2.780.E-08	1.900.E-07
	Capa 4-3	-7.070.E-07	6.940.E-07	-5.660.E-07	9.040.E-06	-3.710.E-08	2.570.E-07
	Capa 4-5	-1.120.E-06	1.160.E-06	-5.500.E-07	8.030.E-06	-6.190.E-08	2.850.E-07
	Capa 5-4	-1.370.E-06	1.410.E-06	-5.290.E-07	7.540.E-06	-7.520.E-08	3.430.E-07
	Capa 5-SN	-1.820.E-06	1.870.E-06	-5.730.E-07	5.450.E-06	-1.280.E-07	3.120.E-07
	Capa SN-5	-2.150.E-06	2.170.E-06	-9.090.E-07	4.730.E-06	-2.610.E-07	4.600.E-07
Nodo C	Superficial	-2.780.E-07	3.580.E-07	-5.710.E-07	9.840.E-06	-3.360.E-07	2.790.E-07
	Capa 1-2	-7.020.E-07	7.100.E-07	-5.870.E-07	1.000.E-05	-2.580.E-07	3.580.E-08
	Capa 2-1	-5.540.E-07	5.370.E-07	-5.960.E-07	1.000.E-05	-9.100.E-08	3.110.E-08
	Capa 2-3	-2.670.E-07	2.520.E-07	-6.000.E-07	9.800.E-06	-2.710.E-08	3.280.E-08
	Capa 3-2	-4.220.E-07	4.220.E-07	-5.910.E-07	9.600.E-06	-2.460.E-08	4.890.E-08
	Capa 3-4	-5.170.E-07	5.210.E-07	-5.790.E-07	9.360.E-06	-2.780.E-08	1.900.E-07
	Capa 4-3	-7.110.E-07	7.080.E-07	-5.620.E-07	9.080.E-06	-3.460.E-08	1.180.E-07
	Capa 4-5	-1.130.E-06	1.150.E-06	-5.580.E-07	8.050.E-06	-4.680.E-08	1.100.E-07
	Capa 5-4	-1.380.E-06	1.420.E-06	-5.280.E-07	7.560.E-06	-8.970.E-08	1.420.E-07
	Capa 5-SN	-1.800.E-06	1.870.E-06	-5.490.E-07	5.440.E-06	-1.120.E-07	1.730.E-07
	Capa SN-5	-2.130.E-06	2.140.E-06	-8.140.E-07	4.800.E-06	-2.190.E-07	2.460.E-07

Resultados para el Eje Trasero o Eje 3 con Carga de 12 ton

Para el caso de 12 Toneladas, la onda Ricker obtenida se muestra en la Figura A.5.7. Esta onda tiene una amplitud de 134560 Pa y una frecuencia de 35.37

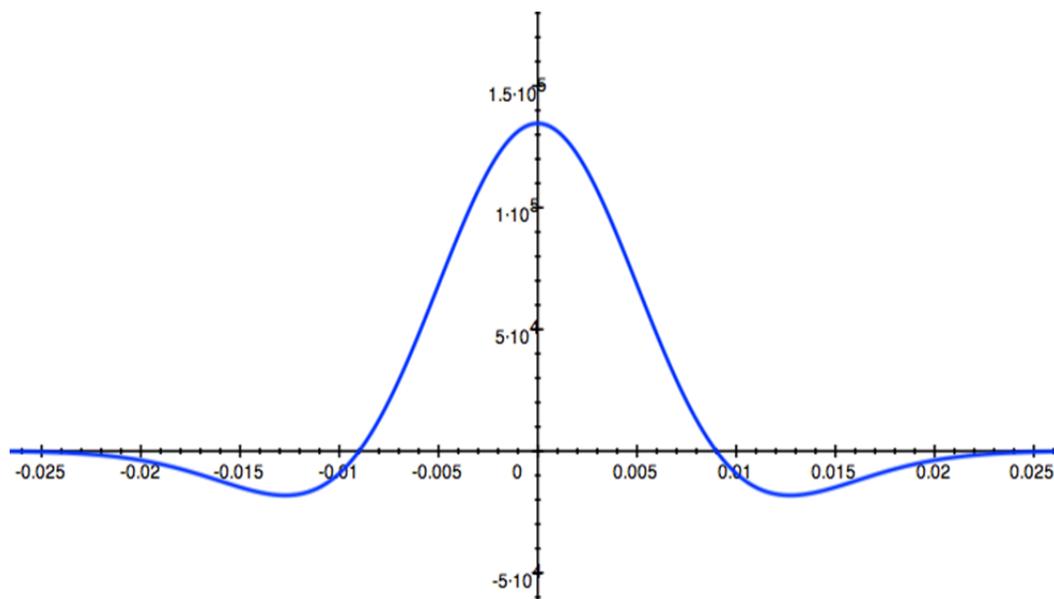


Figura A.5.7. Onda Ricker Presión (Pa) contra Tiempo (s) para 12.0 Toneladas

La sección central en los 0.45 segundos se muestra en la Figura A.5.8. para el eje trasero.

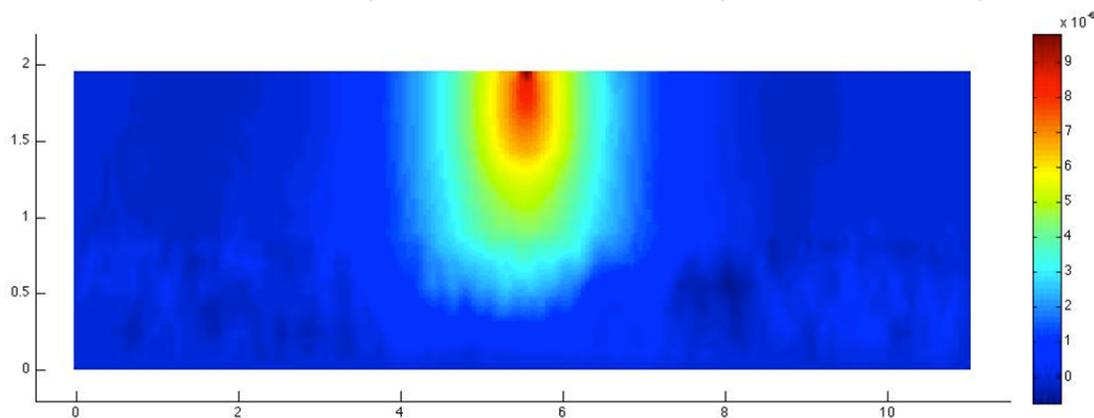


Figura A.5.8. Desplazamientos en "y(m)" para el plano central de la pista.

En la Figura A.5.9. se muestra la sección transversal para este modelo a los 0.45 segundos al igual que las demás secciones mostradas.

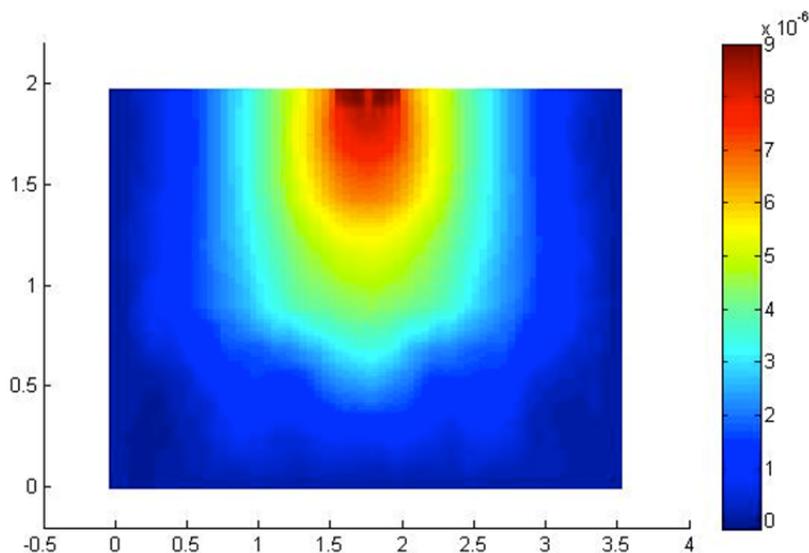


Figura A.5.9. Desplazamientos en "y(m)" para la sección transversal de la Pista.

Las tablas de mínimos y máximos se muestran en las Tablas A.5.7, A.5.8 y A.5.9.

Tabla A.5.7. Valores Máximos y Mínimos de deformación durante la simulación.

Nodo	Capa	$\epsilon_x(m/m)$		$\epsilon_y(m/m)$		$\epsilon_z(m/m)$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-4.150.E-06	4.175.E-06	-4.550.E-06	3.350.E-05	-4.350.E-06	3.800.E-06
	Capa 1-2	-5.975.E-07	9.500.E-06	-2.850.E-06	2.750.E-05	-4.500.E-07	1.295.E-05
	Capa 2-1	-3.360.E-07	4.060.E-06	-7.990.E-07	8.880.E-06	-2.430.E-07	5.150.E-06
	Capa 2-3	-1.130.E-06	8.030.E-07	-1.720.E-07	3.610.E-06	-1.190.E-07	2.880.E-07
	Capa 3-2	-2.450.E-06	4.967.E-07	-4.333.E-07	4.033.E-06	-1.197.E-06	2.317.E-07
	Capa 3-4	-3.367.E-06	4.317.E-07	-3.350.E-07	2.417.E-06	-2.350.E-06	2.217.E-07
	Capa 4-3	-3.285.E-06	6.850.E-07	-6.950.E-07	5.200.E-06	-2.030.E-06	5.000.E-07
	Capa 4-5	-3.890.E-06	7.950.E-07	-5.250.E-07	1.330.E-06	-3.990.E-06	5.500.E-07
	Capa 5-4	-3.433.E-06	2.000.E-06	-2.160.E-06	5.933.E-06	-3.900.E-06	1.913.E-06
	Capa 5-SN	-3.600.E-06	1.813.E-06	-1.787.E-06	2.547.E-06	-4.067.E-06	1.280.E-06
Capa SN-5	-5.333.E-06	5.767.E-06	-6.000.E-06	1.190.E-05	-4.833.E-06	5.400.E-06	
Nodo B	Superficial	-4.400.E-06	4.825.E-06	-4.550.E-06	3.350.E-05	-4.525.E-06	4.325.E-06
	Capa 1-2	-6.175.E-07	8.750.E-06	-2.725.E-06	2.430.E-05	-4.425.E-07	1.158.E-05
	Capa 2-1	-3.890.E-07	3.860.E-06	-7.190.E-07	7.660.E-06	-2.560.E-07	5.020.E-06
	Capa 2-3	-1.180.E-06	7.700.E-07	-1.850.E-07	3.280.E-06	-1.400.E-07	2.940.E-07
	Capa 3-2	-2.500.E-06	5.367.E-07	-4.133.E-07	3.833.E-06	-1.038.E-06	2.467.E-07
	Capa 3-4	-3.483.E-06	4.600.E-07	-4.450.E-07	2.467.E-06	-2.350.E-06	2.900.E-07
	Capa 4-3	-3.215.E-06	7.150.E-07	-7.150.E-07	5.550.E-06	-2.035.E-06	4.945.E-07

Nodo	Capa	$\epsilon_x(m/m)$		$\epsilon_y(m/m)$		$\epsilon_z(m/m)$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
	Capa 4-5	-4.030.E-06	8.850.E-07	-5.900.E-07	1.415.E-06	-3.955.E-06	5.300.E-07
	Capa 5-4	-3.567.E-06	2.453.E-06	-1.890.E-06	6.733.E-06	-3.733.E-06	1.890.E-06
	Capa 5-SN	-3.567.E-06	1.793.E-06	-1.647.E-06	1.910.E-06	-4.033.E-06	1.503.E-06
	Capa SN-5	-5.233.E-06	6.067.E-06	-5.767.E-06	1.190.E-05	-4.400.E-06	5.233.E-06
	Superficial	-4.075.E-06	4.150.E-06	0.000.E+00	0.000.E+00	-3.600.E-06	4.825.E-06
Nodo C	Capa 1-2	-6.425.E-07	5.900.E-06	-1.265.E-06	8.175.E-06	-5.225.E-07	1.363.E-05
	Capa 2-1	-4.350.E-07	3.110.E-06	-4.170.E-07	3.830.E-06	-3.100.E-07	5.260.E-06
	Capa 2-3	-1.200.E-06	7.790.E-07	-2.030.E-07	2.800.E-06	-1.290.E-07	5.600.E-07
	Capa 3-2	-2.517.E-06	5.400.E-07	-4.017.E-07	3.583.E-06	-8.650.E-07	2.500.E-07
	Capa 3-4	-3.483.E-06	4.600.E-07	-4.450.E-07	2.467.E-06	-2.350.E-06	2.900.E-07
	Capa 4-3	-3.235.E-06	7.500.E-07	-7.750.E-07	5.450.E-06	-1.955.E-06	5.150.E-07
	Capa 4-5	-4.135.E-06	7.350.E-07	-7.150.E-07	1.530.E-06	-3.970.E-06	5.700.E-07
	Capa 5-4	-3.733.E-06	2.070.E-06	-1.683.E-06	6.333.E-06	-3.533.E-06	1.603.E-06
	Capa 5-SN	-3.600.E-06	1.810.E-06	-1.627.E-06	1.903.E-06	-4.667.E-06	1.613.E-06
	Capa SN-5	-5.000.E-06	7.100.E-06	-5.833.E-06	1.227.E-05	-5.300.E-06	6.533.E-06

Tabla A.5.8. Valores Máximos y Mínimos de esfuerzos durante la simulación.

Nodo	Capa	$\sigma_{xx}(Pa)$		$\sigma_{yy}(Pa)$		$\sigma_{zz}(Pa)$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-1.660.E+04	1.670.E+04	-1.820.E+04	1.340.E+05	-1.740.E+04	1.520.E+04
	Capa 1-2	-2.390.E+03	3.800.E+04	-1.140.E+04	1.100.E+05	-1.800.E+03	5.180.E+04
	Capa 2-1	-3.360.E+03	4.060.E+04	-7.990.E+03	8.880.E+04	-2.430.E+03	5.150.E+04
	Capa 2-3	-1.130.E+04	8.030.E+03	-1.720.E+03	3.610.E+04	-1.190.E+03	2.880.E+03
	Capa 3-2	-1.470.E+04	2.980.E+03	-2.600.E+03	2.420.E+04	-7.180.E+03	1.390.E+03
	Capa 3-4	-2.020.E+04	2.590.E+03	-2.010.E+03	1.450.E+04	-1.410.E+04	1.330.E+03
	Capa 4-3	-6.570.E+03	1.370.E+03	-1.390.E+03	1.040.E+04	-4.060.E+03	1.000.E+03
	Capa 4-5	-7.780.E+03	1.590.E+03	-1.050.E+03	2.660.E+03	-7.980.E+03	1.100.E+03
	Capa 5-4	-1.030.E+03	6.000.E+02	-6.480.E+02	1.780.E+03	-1.170.E+03	5.740.E+02
	Capa 5-SN	-1.080.E+03	5.440.E+02	-5.360.E+02	7.640.E+02	-1.220.E+03	3.840.E+02
Nodo B	Capa SN-5	-1.600.E+02	1.730.E+02	-1.800.E+02	3.570.E+02	-1.450.E+02	1.620.E+02
	Superficial	-1.760.E+04	1.930.E+04	-1.820.E+04	1.340.E+05	-1.810.E+04	1.730.E+04
	Capa 1-2	-2.470.E+03	3.500.E+04	-1.090.E+04	9.720.E+04	-1.770.E+03	4.630.E+04
	Capa 2-1	-3.890.E+03	3.860.E+04	-7.190.E+03	7.660.E+04	-2.560.E+03	5.020.E+04
	Capa 2-3	-1.180.E+04	7.700.E+03	-1.850.E+03	3.280.E+04	-1.400.E+03	2.940.E+03
Capa 3-2	-1.500.E+04	3.220.E+03	-2.480.E+03	2.300.E+04	-6.230.E+03	1.480.E+03	

Nodo	Capa	σ_{xx} (Pa)		σ_{yy} (Pa)		σ_{zz} (Pa)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
	Capa 3-4	-2.090.E+04	2.760.E+03	-2.670.E+03	1.480.E+04	-1.410.E+04	1.740.E+03
	Capa 4-3	-6.430.E+03	1.430.E+03	-1.430.E+03	1.110.E+04	-4.070.E+03	9.890.E+02
	Capa 4-5	-8.060.E+03	1.770.E+03	-1.180.E+03	2.830.E+03	-7.910.E+03	1.060.E+03
	Capa 5-4	-1.070.E+03	7.360.E+02	-5.670.E+02	2.020.E+03	-1.120.E+03	5.670.E+02
	Capa 5-SN	-1.070.E+03	5.380.E+02	-4.940.E+02	5.730.E+02	-1.210.E+03	4.510.E+02
	Capa SN-5	-1.570.E+02	1.820.E+02	-1.730.E+02	3.570.E+02	-1.320.E+02	1.570.E+02
Nodo C	Superficial	-1.630.E+04	1.660.E+04	0.000.E+00	0.000.E+00	-1.440.E+04	1.930.E+04
	Capa 1-2	-2.570.E+03	2.360.E+04	-5.060.E+03	3.270.E+04	-2.090.E+03	5.450.E+04
	Capa 2-1	-4.350.E+03	3.110.E+04	-4.170.E+03	3.830.E+04	-3.100.E+03	5.260.E+04
	Capa 2-3	-1.200.E+04	7.790.E+03	-2.030.E+03	2.800.E+04	-1.290.E+03	5.600.E+03
	Capa 3-2	-1.510.E+04	3.240.E+03	-2.410.E+03	2.150.E+04	-5.190.E+03	1.500.E+03
	Capa 3-4	-2.090.E+04	2.760.E+03	-2.670.E+03	1.480.E+04	-1.410.E+04	1.740.E+03
	Capa 4-3	-6.470.E+03	1.500.E+03	-1.550.E+03	1.090.E+04	-3.910.E+03	1.030.E+03
	Capa 4-5	-8.270.E+03	1.470.E+03	-1.430.E+03	3.060.E+03	-7.940.E+03	1.140.E+03
	Capa 5-4	-1.120.E+03	6.210.E+02	-5.050.E+02	1.900.E+03	-1.060.E+03	4.810.E+02
	Capa 5-SN	-1.080.E+03	5.430.E+02	-4.880.E+02	5.710.E+02	-1.400.E+03	4.840.E+02
Capa SN-5	-1.500.E+02	2.130.E+02	-1.750.E+02	3.680.E+02	-1.590.E+02	1.960.E+02	

Tabla A.5.9. Valores Máximos y Mínimos de desplazamientos durante la simulación.

Nodo	Capa	desp "x" (m)		desp "y" (m)		desp "z" (m)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo A	Superficial	-2.380.E-07	2.380.E-07	-4.900.E-07	9.600.E-06	-2.040.E-07	1.780.E-07
	Capa 1-2	-5.760.E-07	5.760.E-07	-4.980.E-07	8.430.E-06	-2.300.E-07	3.480.E-08
	Capa 2-1	-4.510.E-07	4.420.E-07	-5.020.E-07	8.310.E-06	-1.630.E-07	2.790.E-08
	Capa 2-3	-2.150.E-07	2.040.E-07	-4.950.E-07	7.990.E-06	-4.420.E-08	8.770.E-08
	Capa 3-2	-3.330.E-07	3.410.E-07	-4.880.E-07	7.810.E-06	-2.300.E-08	1.890.E-07
	Capa 3-4	-4.160.E-07	4.160.E-07	-4.840.E-07	7.650.E-06	-2.510.E-08	2.570.E-07
	Capa 4-3	-5.740.E-07	5.620.E-07	-4.780.E-07	7.400.E-06	-2.940.E-08	3.500.E-07
	Capa 4-5	-9.150.E-07	9.540.E-07	-4.440.E-07	6.580.E-06	-4.830.E-08	3.690.E-07
	Capa 5-4	-1.130.E-06	1.180.E-06	-4.380.E-07	6.190.E-06	-6.940.E-08	4.720.E-07
	Capa 5-SN	-1.500.E-06	1.510.E-06	-4.390.E-07	4.500.E-06	-1.330.E-07	4.440.E-07
Capa SN-5	-1.790.E-06	1.720.E-06	-6.590.E-07	3.910.E-06	-2.900.E-07	5.740.E-07	
Nodo B	Superficial	-2.880.E-07	2.710.E-07	-4.790.E-07	9.530.E-06	-2.340.E-07	2.330.E-07
	Capa 1-2	-5.920.E-07	5.820.E-07	-4.970.E-07	8.450.E-06	-2.190.E-07	2.670.E-08
	Capa 2-1	-4.620.E-07	4.450.E-07	-5.020.E-07	8.360.E-06	-1.260.E-07	2.290.E-08
	Capa 2-3	-2.190.E-07	2.090.E-07	-4.980.E-07	8.090.E-06	-3.020.E-08	4.420.E-08

Nodo	Capa	desp "x" (m)		desp "y" (m)		desp "z" (m)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Nodo	Capa 3-2	-3.450.E-07	3.480.E-07	-4.890.E-07	7.910.E-06	-2.310.E-08	1.080.E-07
	Capa 3-4	-4.280.E-07	4.310.E-07	-4.790.E-07	7.750.E-06	-2.290.E-08	1.570.E-07
	Capa 4-3	-5.860.E-07	5.750.E-07	-4.690.E-07	7.480.E-06	-3.070.E-08	2.130.E-07
	Capa 4-5	-9.300.E-07	9.580.E-07	-4.550.E-07	6.640.E-06	-5.130.E-08	2.360.E-07
	Capa 5-4	-1.130.E-06	1.170.E-06	-4.380.E-07	6.240.E-06	-6.220.E-08	2.840.E-07
	Capa 5-SN	-1.510.E-06	1.550.E-06	-4.750.E-07	4.510.E-06	-1.060.E-07	2.590.E-07
	Capa SN-5	-1.770.E-06	1.800.E-06	-7.520.E-07	3.910.E-06	-2.160.E-07	3.820.E-07
Nodo C	Superficial	-2.300.E-07	2.960.E-07	-4.730.E-07	8.140.E-06	-2.780.E-07	2.310.E-07
	Capa 1-2	-5.810.E-07	5.870.E-07	-4.860.E-07	8.300.E-06	-2.140.E-07	2.960.E-08
	Capa 2-1	-4.580.E-07	4.440.E-07	-4.940.E-07	8.290.E-06	-7.530.E-08	2.570.E-08
	Capa 2-3	-2.210.E-07	2.080.E-07	-4.960.E-07	8.110.E-06	-2.240.E-08	2.710.E-08
	Capa 3-2	-3.500.E-07	3.490.E-07	-4.900.E-07	7.950.E-06	-2.040.E-08	4.050.E-08
	Capa 3-4	-4.280.E-07	4.310.E-07	-4.790.E-07	7.750.E-06	-2.290.E-08	1.570.E-07
	Capa 4-3	-5.890.E-07	5.860.E-07	-4.650.E-07	7.510.E-06	-2.870.E-08	9.770.E-08
	Capa 4-5	-9.310.E-07	9.530.E-07	-4.620.E-07	6.660.E-06	-3.880.E-08	9.140.E-08
	Capa 5-4	-1.140.E-06	1.180.E-06	-4.370.E-07	6.250.E-06	-7.430.E-08	1.180.E-07
	Capa 5-SN	-1.490.E-06	1.550.E-06	-4.540.E-07	4.500.E-06	-9.290.E-08	1.430.E-07
	Capa SN-5	-1.770.E-06	1.770.E-06	-6.730.E-07	3.980.E-06	-1.810.E-07	2.040.E-07

ANEXO 6

Datos de clima obtenidos de la Calle 80- Escuela Militar empleados para la simulación acoplada de pavimentos

Día Evaluado en el modelo Térmico

Hora	Temperatura Ambiente (°C)	Humedad Relativa(%)	Radiación Solar(W/m ²)
0:00	11.58	100%	2.49
0:30	11.11	100%	1.99
1:00	11.28	100%	0.5
1:30	11.24	100%	1.99
2:00	11.51	100%	3.98
2:30	11.45	100%	2.99
3:00	11.48	100%	2.99
3:30	11.85	100%	1.99
4:00	11.88	100%	3.98
4:30	11.85	100%	1.99
5:00	11.95	100%	5.97
5:30	11.55	100%	2.99
6:00	12.65	100%	7.96
6:30	13.39	100%	18.91
7:00	14.16	99%	25.38
7:30	15.06	94%	53.75
8:00	15.46	94%	30.86
8:30	14.83	99%	26.38
9:00	15.36	95%	60.22
9:30	17.47	85%	98.54
10:00	18.47	79%	86.1
10:30	19.71	76%	173.19
11:00	22.72	61%	113.47
11:30	21.45	58%	108
12:00	20.31	61%	136.86
12:30	21.52	64%	431.98
13:00	25.3	54%	297.11
13:30	20.95	64%	136.86
14:00	20.41	65%	340.91
14:30	21.72	59%	105.01
15:00	20.28	63%	71.67
15:30	20.48	77%	78.14

Hora	Temperatura Ambiente (°C)	Humedad Relativa(%)	Radiación Solar(W/m ²)
16:00	20.72	74%	46.78
16:30	17.64	88%	40.81
17:00	17.47	88%	21.4
17:30	16.8	88%	5.97
18:00	16.47	88%	3.48
18:30	16.8	87%	2.49
19:00	16.33	88%	2.99
19:30	15.8	90%	2.49
20:00	15.43	90%	3.98
20:30	14.99	92%	3.48
21:00	14.56	93%	2.49
21:30	14.26	96%	3.98
22:00	14.02	94%	3.98
22:30	13.32	99%	2.99
23:00	12.85	100%	2.49
23:30	12.55	100%	3.98
0:00	11.58	100%	2.49

ANEXO 7

Código de Programación del Modelo Numérico

CÓDIGO DEL PROGRAMA TERMO-HIDRO-MECÁNICO

Módulo Mecánico

```

C *****
C *
C * PROGRAMA TERMO - HIDRO - MECANICO Y DE PROPAGACION *
C * DE ONDAS EN MEDIOS POROSOS PARCIALMENTE SATURADO *
C * POR EL METODO DE LAS DIFERENCIAS FINITAS *
C * AUTORES: BERNARDO CAICEDO, JULIAN TRISTANCHO *
C * VERSION: ABRIL 2010 *
C *
C *****
C * CALCULO DE DEFORMACIONES MECANICAS ELASTICAS *
C *****

C *****
C *SUBROUTINA PRINCIPAL DE CALCULO DE DEFORMACIONES MECANICAS ELASTICAS*
C *****
SUBROUTINE MECTRANS
C ***** VARIABLES GLOBALES DEL PROGRAMA
USE VAR_GLOBAL
C ***** VARIABLES LOCALES DEL PROGRAMA
INTEGER I, J
CALL RESOMEC !Resolver ecuacion diferencial
!$OMP PARALLEL DEFAULT(SHARED) PRIVATE(I,J) NUM_THREADS(NUMHILOS)
!$OMP DO
DO 101 I=INIPO,NPOINTVEC !Actualizar los parametros ecuacion diferencial
DO 101 J=1, 3
NOD_DESP2(I,J) = NOD_DESP1(I,J)
NOD_DESP1(I,J) = NOD_DESP(I,J)
101 CONTINUE
!$OMP END DO
!$OMP END PARALLEL
RETURN
END SUBROUTINE MECTRANS

C *****
C * CALCULO DE LAS CARACTERISTICAS MECANICAS INSTAN. *
C *****
SUBROUTINE NONLINMEC
C ***** VARIABLES GLOBALES DEL PROGRAMA
USE VAR_GLOBAL
IMPLICIT NONE
C ***** VARIABLES LOCALES DEL PROGRAMA
INTEGER I,J
REAL(8) T1(6,6),T2(6,6),T3(6,6),TT1(6,6),TT2(6,6)
REAL(8) TT3(6,6),MT(6,6)
REAL(8) CT(6,6)

!$OMP PARALLEL DEFAULT(SHARED) PRIVATE(I,J,T1,T2,T3,TT1,
! 1 TT2,TT3,MT,CT) NUM_THREADS(NUMHILOS)
!$OMP DO
DO 101 I=INIPO,NPOINT
C INICIAR VARIABLES
T1 = 0
T2 = 0

```

T3 = 0
MT = 0
CT = 0

C MATRICES DE TRANSFORMADA DE COORDENADAS

T1(1,1) = cos(NOD_ANIS(I,1))
T1(1,3) = sin(NOD_ANIS(I,1))
T1(2,2) = 1
T1(3,1) = -T1(1,3)
T1(3,3) = T1(1,1)
T1(4,4) = T1(1,1)
T1(4,6) = T1(1,3)
T1(5,5) = 1
T1(6,4) = T1(3,1)
T1(6,6) = T1(1,1)
TT1 = TRANSPOSE(T1)

T2(1,1) = cos(NOD_ANIS(I,2))
T2(1,2) = sin(NOD_ANIS(I,2))
T2(2,1) = -T2(1,2)
T2(2,2) = T2(1,1)
T2(3,3) = 1
T2(4,4) = T2(1,1)
T2(4,5) = T2(1,2)
T2(5,4) = T2(2,1)
T2(5,5) = T2(1,1)
T2(6,6) = 1
TT2 = TRANSPOSE(T2)

T3(1,1) = cos(NOD_ANIS(I,3))
T3(1,3) = sin(NOD_ANIS(I,3))
T3(2,2) = 1
T3(3,1) = -T3(1,3)
T3(3,3) = T3(1,1)
T3(4,4) = T3(1,1)
T3(4,6) = T3(1,3)
T3(5,5) = 1
T3(6,4) = T3(3,1)
T3(6,6) = T3(1,1)
TT3 = TRANSPOSE(T3)

C MATRIZ DE ANISOTROPIA SUELO

MT(1,1) = SUE_CELAS(NOD_SUELO(I),1)
MT(1,2) = SUE_CELAS(NOD_SUELO(I),7)
MT(1,3) = SUE_CELAS(NOD_SUELO(I),8)
MT(2,1) = MT(1,2)
MT(2,2) = SUE_CELAS(NOD_SUELO(I),2)
MT(2,3) = SUE_CELAS(NOD_SUELO(I),9)
MT(3,1) = MT(1,3)
MT(3,2) = MT(2,3)
MT(3,3) = SUE_CELAS(NOD_SUELO(I),3)
MT(4,4) = SUE_CELAS(NOD_SUELO(I),4)
MT(5,5) = SUE_CELAS(NOD_SUELO(I),5)
MT(6,6) = SUE_CELAS(NOD_SUELO(I),6)

C MATRIZ DE ANISOTROPIA ROTADA

CT = MATMUL(TT3, TT2)
CT = MATMUL(CT, TT1)
CT = MATMUL(CT, MT)
CT = MATMUL(CT, T1)
CT = MATMUL(CT, T2)
CT = MATMUL(CT, T3)

C ACTUALIZAR LAS CONTANTES ELASTICAS POR NODO

NOD_E(I,1) = CT(1,1)

```

NOD_E(I,2) = CT(2,2)
NOD_E(I,3) = CT(3,3)
NOD_E(I,4) = CT(4,4)
NOD_E(I,5) = CT(5,5)
NOD_E(I,6) = CT(6,6)
NOD_E(I,7) = CT(1,2)
NOD_E(I,8) = CT(1,3)
NOD_E(I,9) = CT(2,3)
NOD_E(I,10) = CT(4,5)
NOD_E(I,11) = CT(4,6)
NOD_E(I,12) = CT(5,6)
101 CONTINUE
!$OMP END DO
!$OMP END PARALLEL
RETURN
END SUBROUTINE NONLINMEC

C *****
C * CALCULO DE LAS CARACTERISTICAS MECANICAS INSTAN. *
C *****
SUBROUTINE RESOMEK
C ***** VARIABLES GLOBALES DEL PROGRAMA
USE VAR_GLOBAL
IMPLICIT NONE
C ***** FUNCIONES LOCALES
REAL MEDIAELAST
C ***** VARIABLES LOCALES DEL PROGRAMA
REAL(8) M1(3,3),M2(3,3),M3(3,3),V1(3,1),V2(3,1),V3(3,1)
REAL(8) ROLOC,TAO1(3,1),TAO2(3,1),DX, DY, DZ, coa ,lin
INTEGER CUB(8),CUBLOC(4),I,J,K
LOGICAL BAND
REAL MODLOC(4),CTEELA(6)
REAL LAST_TIME, TIME_TEMP
! INTEGER(8) NODINI, NODFIN,NODDIR,PARENT

!$OMP PARALLEL DEFAULT(SHARED) PRIVATE(M1,M2,M3,V1,V2,V3
! 1 ,ROLOC,TAO1,TAO2,DX, DY, DZ,CUB,CUBLOC,I,J,K
! 2 ,BAND,MODLOC,CTEELA, LAST_TIME, TIME_TEMP) NUM_THREADS(NUMHILOS)

!$OMP DO

! PARENT = IT/2;
!
! IF(PARENT*2.LT.IT)THEN !ES IMPAR
! NODINI = INIPO
! NODFIN = NPOINT
! NODDIR = 1
! ELSE
! NODINI = NPOINT
! NODFIN = INIPO
! NODDIR = -1
! END IF

DO 4 I=INIPO, NPOINT

M1(1,1)= NOD_E(I,1)
M1(1,2)= NOD_E(I,7)
M1(1,3)= NOD_E(I,8)
M1(2,1)= NOD_E(I,7)
M1(2,2)= NOD_E(I,2)
M1(2,3)= NOD_E(I,9)
M1(3,1)= NOD_E(I,8)
M1(3,2)= NOD_E(I,9)

```

```

M1(3,3)= NOD_E(I,3)

M2(1,1)= NOD_E(I,4)
M2(1,2)= NOD_E(I,10)
M2(1,3)= NOD_E(I,11)
M2(2,1)= NOD_E(I,10)
M2(2,2)= NOD_E(I,5)
M2(2,3)= NOD_E(I,12)
M2(3,1)= NOD_E(I,11)
M2(3,2)= NOD_E(I,12)
M2(3,3)= NOD_E(I,6)

M3(1,1)= NOD_E(I,4)
M3(1,2)= NOD_E(I,10)
M3(1,3)= NOD_E(I,11)
M3(2,1)= NOD_E(I,10)
M3(2,2)= NOD_E(I,5)
M3(2,3)= NOD_E(I,12)
M3(3,1)= NOD_E(I,11)
M3(3,2)= NOD_E(I,12)
M3(3,3)= NOD_E(I,6)

C   CALCULAR DENSIDAD PROMEDIO, DE LOS CUBOS QUE SI EXISTEN

C   CALCULO DE DESPLAZAMIENTO POR NODO
C   DESPLAZAMIENTO EN X, VERIFICAR SI ES UN NODO LIBRE O FORZADO

C   CALCULO DE ESFUERZOS
V1(1,1) = (NOD_DESP(NOD_NP(I,1),1)-NOD_DESP(I,1))/NOD_BGEOM(I,1)
V1(2,1) = (NOD_DESP(NOD_NP(I,3),2)-NOD_DESP(I,2))/NOD_BGEOM(I,3)
V1(3,1) = (NOD_DESP(NOD_NP(I,5),3)-NOD_DESP(I,3))/NOD_BGEOM(I,5)

V2(1,1) = (NOD_DESP(I,3)-NOD_DESP(NOD_NP(I,2),3))/NOD_BGEOM(I,2)
V2(2,1) = (NOD_DESP(I,1)-NOD_DESP(NOD_NP(I,4),1))/NOD_BGEOM(I,4)
V2(3,1) = (NOD_DESP(I,2)-NOD_DESP(NOD_NP(I,6),2))/NOD_BGEOM(I,6)

V3(1,1) = (NOD_DESP(I,1)-NOD_DESP(NOD_NP(I,6),1))/NOD_BGEOM(I,6)
V3(2,1) = (NOD_DESP(I,2)-NOD_DESP(NOD_NP(I,2),2))/NOD_BGEOM(I,2)
V3(3,1) = (NOD_DESP(I,3)-NOD_DESP(NOD_NP(I,4),3))/NOD_BGEOM(I,4)

TAO1 = MATMUL(M1,V1)
TAO2 = MATMUL(M2,V2)+MATMUL(M3,V3)

C   ESFUERZO EN X, Y y Z
DO 7 J=1,3
  BAND = NOD_FRS(I).NE.0
  IF(BAND)THEN
    BAND = BAND.AND.(FRO_FRIMP(NOD_FRS(I),PASCURVA,J).EQ.1)!david
  END IF
  IF(NOT(BAND))THEN
    NOD_SIGMA(I,J) = TAO1(J,1)
  ELSE
    NOD_SIGMA(I,J) = ACTXFR(NOD_FRS(I),J)
  END IF
7 CONTINUE
C   ESFUERZO CORTANTES
DO 8 J=1,3
  BAND = NOD_FRS(I).NE.0
  IF(BAND)THEN
    BAND = BAND.AND.(FRO_FRIMP(NOD_FRS(I),PASCURVA,J+3).EQ.1)
  END IF
  IF(NOT(BAND))THEN
    NOD_SIGMA(I,J+3) = TAO2(J,1)
  ELSE
    if (NOD_NP(I,2*J).GT.NPOINT) then

```

```

      NOD_SIGMA(I,J+3) = ACTXFR(NOD_FRS(I),J+3)
elseif (NOD_NP(I,(2*J-1)).GT.NPOINT) then
      NOD_SIGMA(I,J+3) = TAO2(J,1)
      NOD_SIGMA(NOD_NP(I,(2*J-1)),J+3)=ACTXFR(NOD_FRS(I),J+3)
endif
if (J.NE.1) then
  if(NOD_NP(I,2*(J-1)).GT.NPOINT) then
    NOD_SIGMA(I,J+3) = ACTXFR(NOD_FRS(I),J+3)
  elseif (NOD_NP(I,(2*J-3)).GT.NPOINT) then
    NOD_SIGMA(I,J+3) = TAO2(J,1)
    NOD_SIGMA(NOD_NP(I,(2*J-3)),J+3)=ACTXFR(NOD_FRS(I),J+3)
  endif
else
  if(NOD_NP(I,6).GT.NPOINT) then
    NOD_SIGMA(I,J+3) = ACTXFR(NOD_FRS(I),J+3)
  elseif (NOD_NP(I,5).GT.NPOINT) then
    NOD_SIGMA(I,J+3) = TAO2(J,1)
    NOD_SIGMA(NOD_NP(I,5),J+3)=ACTXFR(NOD_FRS(I),J+3)
  endif
endif
END IF
8 CONTINUE
4 CONTINUE

DO 12 I=INIPO, NPOINT
  BAND = NOD_FRU(I).NE.0
  coa=200.0*ROLOC
  IF(BAND)THEN
    BAND = BAND.AND.(FRO_FRIMP(NOD_FRU(I),PASCURVA,1).EQ.1)
  END IF
  IF(NOT(BAND))THEN
    NOD_DESP(I,1) = (NOD_SIGMA(I,1)-NOD_SIGMA(NOD_NP(I,2),1))/
1 NOD_BGEOM(I,2)
    NOD_DESP(I,1) = NOD_DESP(I,1) + (NOD_SIGMA(NOD_NP(I,3),5)
1 -NOD_SIGMA(I,5))/NOD_BGEOM(I,3)
    NOD_DESP(I,1) = NOD_DESP(I,1) + (NOD_SIGMA(NOD_NP(I,5),4)
1 -NOD_SIGMA(I,4))/NOD_BGEOM(I,5)
    NOD_DESP(I,1) = (NOD_DESP(I,1) + ROLOC*GCENTRIF(1))*DT
    NOD_DESP(I,1)=NOD_DESP(I,1)+coa*NOD_DESP1(I,1)+
1 ROLOC*(2.0*NOD_DESP1(I,1)-NOD_DESP2(I,1))/DT
    NOD_DESP(I,1) = NOD_DESP(I,1)/((ROLOC/DT)+coa)
  ELSE
    NOD_DESP(I,1)= ACTXFR(NOD_FRU(I),1)
  END IF
C DESPLAZAMIENTO EN Y, VERIFICAR SI ES UN NODO LIBRE O FORZADO
  BAND = NOD_FRU(I).NE.0
  IF(BAND)THEN
    BAND = BAND.AND.(FRO_FRIMP(NOD_FRU(I),PASCURVA,2).EQ.1)
  END IF
  IF(NOT(BAND))THEN
    NOD_DESP(I,2) = (NOD_SIGMA(NOD_NP(I,1),5)-NOD_SIGMA(I,5))/
1 NOD_BGEOM(I,1)
    NOD_DESP(I,2) = NOD_DESP(I,2)+(NOD_SIGMA(I,2)-
1 NOD_SIGMA(NOD_NP(I,4),2))/NOD_BGEOM(I,4)
    NOD_DESP(I,2) = NOD_DESP(I,2) + (NOD_SIGMA(NOD_NP(I,5),6)-
1 NOD_SIGMA(I,6))/NOD_BGEOM(I,5)
    NOD_DESP(I,2) = (NOD_DESP(I,2) + ROLOC*GCENTRIF(2))*DT
    NOD_DESP(I,2)=NOD_DESP(I,2)+coa*NOD_DESP1(I,2)+
1 ROLOC*(2.0*NOD_DESP1(I,2)-NOD_DESP2(I,2))/DT
    NOD_DESP(I,2) = NOD_DESP(I,2)/((ROLOC/DT)+coa)
  ELSE
    NOD_DESP(I,2)= ACTXFR(NOD_FRU(I),2)
  END IF
C DESPLAZAMIENTO EN Z

```

```

BAND = NOD_FRU(I).NE.0
IF (BAND)THEN
  BAND = BAND.AND.(FRO_FRIMP(NOD_FRU(I),PASCURVA,3).EQ.1)
END IF
IF(NOT(BAND))THEN
  NOD_DESP(I,3) = (NOD_SIGMA(NOD_NP(I,1),4)-NOD_SIGMA(I,4))/
1 NOD_BGEOM(I,1)
  NOD_DESP(I,3) = NOD_DESP(I,3)+(NOD_SIGMA(NOD_NP(I,3),6)-
2 NOD_SIGMA(I,6))/NOD_BGEOM(I,3)
  NOD_DESP(I,3) = NOD_DESP(I,3)+(NOD_SIGMA(I,3)-
3 NOD_SIGMA(NOD_NP(I,6),3))/NOD_BGEOM(I,6)
  NOD_DESP(I,3) = (NOD_DESP(I,3) + ROLOC*GCENTRIF(3))*DT
  NOD_DESP(I,3)=NOD_DESP(I,3)+coa*NOD_DESP1(I,3)+
1 ROLOC*(2.0*NOD_DESP1(I,3)-NOD_DESP2(I,3))/DT
  NOD_DESP(I,3) = NOD_DESP(I,3)/((ROLOC/DT)+coa)
ELSE
  NOD_DESP(I,3)= ACTXFR(NOD_FRU(I),3)
END IF

12 CONTINUE

!$OMP END DO

C CALCULAR DESPLAZAMIENTOS DE LOS PUNTOS EXTRAS DE FRONTERA
!$OMP DO
  DO 9 I=NPOINT+1, NPOINTVEC
    NOD_DESP(I,1) = NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),1)
    NOD_DESP(I,2) = NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),2)
    NOD_DESP(I,3) = NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),3)
  C CALCULAR LAS CONDICIONES DE FRONTERA SI ES UNA CARA ABSORBENTE
  IF(FRO_TFRONT(NOD_FRU(NOD_IORGNOD(I,1)),PASCURVA).EQ.3)THEN
  C CALCULAR LAS CONSTANTES DE ELASTICIDAD LOCALES
  DO 10 J=1, 6
    CTEELA(J) = SQRT(NOD_E(NOD_IORGNOD(I,1),J)/
1 NOD_RO(NOD_IORGNOD(I,1)))
10 CONTINUE
  C CALCULAR EL DESP. DE LA FRONTERA ABSORBENTE
  IF((NOD_IVECNOD(I).EQ.1).OR.(NOD_IVECNOD(I).EQ.2))THEN
    DX = ABS(NOD_X(NOD_IORGNOD(I,2))-NOD_X(I))
    DY = ABS(NOD_Y(NOD_IORGNOD(I,2))-NOD_Y(NOD_IORGNOD(I,1)))
    DZ = ABS(NOD_Z(NOD_IORGNOD(I,2))-NOD_Z(NOD_IORGNOD(I,1)))
    NOD_DESP(I,1) = NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,2),1)-DX
1 *(NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),1)-
2 NOD_DESP1(NOD_IORGNOD(I,1),1))/(DT*CTEELA(1))
    NOD_DESP(I,2) = NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),2)-DY
1 *(NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),2)-
2 NOD_DESP1(NOD_IORGNOD(I,1),2))/(DT*CTEELA(5))
    NOD_DESP(I,3) = NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),3)-DZ
1 *(NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),3)-
2 NOD_DESP1(NOD_IORGNOD(I,1),3))/(DT*CTEELA(4))

  END IF

  IF((NOD_IVECNOD(I).EQ.3).OR.(NOD_IVECNOD(I).EQ.4))THEN
    DX = ABS(NOD_X(NOD_IORGNOD(I,2))-NOD_X(NOD_IORGNOD(I,1)))
    DY = ABS(NOD_Y(NOD_IORGNOD(I,2))-NOD_Y(I))
    DZ = ABS(NOD_Z(NOD_IORGNOD(I,2))-NOD_Z(NOD_IORGNOD(I,1)))
  !verificar dirección IORGNOD 2.. SI EN REALIDAD ES EN 1
  NOD_DESP(I,1) = NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),1)-DX
1 *(NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),1)-
2 NOD_DESP1(NOD_IORGNOD(I,1),1))/(DT*CTEELA(4))
  NOD_DESP(I,2) = NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,2),2)-DY !DAVID
1 *(NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),2)-
2 NOD_DESP1(NOD_IORGNOD(I,1),2))/(DT*CTEELA(2))

```

```

1 NOD_DESP(I,3) = NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),3)-DZ
2 *(NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),3)-
1 NOD_DESP1(NOD_IORGNOD(I,1),3))/(DT*CTEELA(6))

END IF

IF((NOD_IVECNOD(I).EQ.5).OR.(NOD_IVECNOD(I).EQ.6))THEN
DX = ABS(NOD_X(NOD_IORGNOD(I,2))-NOD_X(NOD_IORGNOD(I,1)))
DY = ABS(NOD_Y(NOD_IORGNOD(I,2))-NOD_Y(NOD_IORGNOD(I,1)))
DZ = ABS(NOD_Z(NOD_IORGNOD(I,2))-NOD_Z(I))
NOD_DESP(I,1) = NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),1)-DX
1 *(NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),1) -
2 NOD_DESP1(NOD_IORGNOD(I,1),1))/(DT*CTEELA(4))
NOD_DESP(I,2) = NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),2)-DY
1 *(NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),2)-
2 NOD_DESP1(NOD_IORGNOD(I,1),2))/(DT*CTEELA(6))
NOD_DESP(I,3) = NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,2),3)-DZ
1 *(NOD_DESP(NOD_IORGNOD(I,1),3) -
2 NOD_DESP1(NOD_IORGNOD(I,1),3)) / (DT*CTEELA(3))

END IF
END IF
9 CONTINUE
!$OMP END DO
!$OMP END PARALLEL
RETURN
END SUBROUTINE RESOMECH

C *****
C * FUNCION CALCULA LA ELASTICIDAD MEDIA, SIN FRONT *
C *****
REAL FUNCTION MEDIAELAST(LIMIT,INDICES,MODULOS)
INTEGER I, K, INDICES(4),LIMIT
REAL MODULOS(4)
MEDIAELAST = 0
K = 0
DO 101 I=1,4
IF(INDICES(I).LT.LIMIT)THEN
K = K + 1
MEDIAELAST = MEDIAELAST + MODULOS(I)
END IF
END DO
101 IF(K.NE.0)THEN
MEDIAELAST = MEDIAELAST / K
END IF
RETURN
END FUNCTION MEDIAELAST

C *****
C * CALCULO DEL ESFUERZO OCTAEDRICO DE LA MATRIZ ESFUERZO 6 *
C *****
REAL FUNCTION ESFOCTA(ESFOC)
REAL ESFOC(6), A(3,3)
REAL m, DET,q, p, phi,eig1,eig2,eig3
INTEGER I, J
A(1,1) = ESFOC(1)
A(1,2) = ESFOC(5)
A(1,3) = ESFOC(4)
A(2,1) = ESFOC(5)
A(2,2) = ESFOC(2)
A(2,3) = ESFOC(6)
A(3,1) = ESFOC(4)

```

```

A(3,2) = ESFOC(6)
A(3,3) = ESFOC(3)
m = (A(1,1)+A(2,2)+A(3,3))/3.0
A(1,1) = A(1,1)-m
A(2,2) = A(2,2)-m
A(3,3) = A(3,3)-m

1 2
DET = A(1,1)*A(2,2)*A(3,3)-A(1,1)*A(2,3)*A(3,2)
-A(1,2)*A(2,1)*A(3,3)+A(1,2)*A(2,3)*A(3,1)+A(1,3)*A(2,1)*A(3,2)
-A(1,3)*A(2,2)*A(3,1)
q = DET/2.0
p = 0
DO 100 I=1,3
  DO 100 J=1,3
    p = p + A(I,J)**2.0
100 CONTINUE
p = p/6.0
phi = q/p**(3.0/2.0)
IF(phi.GT.1) phi = 1.0
phi = 1.0/3.0*ACOS(phi)
IF(ABS(q).GE.ABS(p**(3.0/2.0))) phi = 0
IF(phi.LT.0) phi=phi+pi/3.0
eig1 = m + 2*SQRT(p)*cos(phi)
eig2 = m - SQRT(p)*(cos(phi) + SQRT(3.0)*sin(phi))
eig3 = m - SQRT(p)*(cos(phi) - SQRT(3.0)*sin(phi))
ESFOCTA = (eig1+eig2+eig3)/3.0
RETURN
END FUNCTION ESFOCTA

```

Módulo Térmico

```

C *****
C *
C * PROGRAMA TERMO - HIDRO - MECANICO Y DE PROPAGACION *
C * DE ONDAS EN MEDIOS POROSOS PARCIALMENTE SATURADO *
C * POR EL METODO DE LAS DIFERENCIAS FINITAS *
C * AUTORES: BERNARDO CAICEDO, JULIAN TRISTANCHO *
C * VERSION: ABRIL 2010 *
C *
C *****
C * CALCULO DE FLUJO DE CALOR TRANSITORIO *
C *****

C *****
C * SUBROUTINA PRINCIPAL DE CALCULO DE FLUJO DE CALOR TRANSITORIO *
C *****
SUBROUTINE TERMTRANS
C ***** VARIABLES GLOBALES DEL PROGRAMA
  USE VAR_GLOBAL
  IMPLICIT NONE
C ***** VARIABLES LOCALES DEL PROGRAMA
  INTEGER I
  CALL NONLINTP !Calcular parametros no lineales
  CALL RESOTEMP
!$OMP PARALLEL DEFAULT(SHARED) PRIVATE(I) NUM_THREADS(NUMHILOS)
!$OMP DO
  DO 1001 I=INIPO,NPOINTVEC !Actualizar los parametros anteriores
    NOD_TEMP(I) = NOD_TEMP1(I)

```

```

1001 CONTINUE
!$OMP END DO
!$OMP END PARALLEL
RETURN
END SUBROUTINE TERMTRANS

C *****
C * CALCULO DE LAS CARACTERISTICAS TERMICAS PARA CADA PASO DE TIEMPO *
C *****
SUBROUTINE NONLINTP
C ***** VARIABLES GLOBALES DEL PROGRAMA
USE VAR_GLOBAL
IMPLICIT NONE
C ***** VARIABLES LOCALES DEL PROGRAMA
INTEGER I, J
REAL LAMSAT, KE, LAMDRY
!$OMP PARALLEL DEFAULT(SHARED) PRIVATE(I, J) NUM_THREADS(NUMHILOS)
!$OMP DO
DO 1001 I=INIPO, NPOINT
NOD_CES(I) = SUE_CEE(NOD_SUELO(I))*(1.0-NOD_POR(I))+CEW*
2 (NOD_POR(I)*NOD_SR(I))
LAMSAT = SUE_CLAME(NOD_SUELO(I))*(1.0-NOD_POR(I))*CLAMW*NOD_POR(I)
IF(NOD_SR(I).LT.0.1)THEN
KE = 0
ELSE
KE = 0.7*LOG(NOD_SR(I))+1.0
END IF
LAMDRY = 0.135*SUE_DENS(NOD_SUELO(I))+64.7
LAMDRY = LAMDRY/(2700.0-0.947*SUE_DENS(NOD_SUELO(I)))
NOD_CLAMS(I) = (LAMSAT-LAMDRY)*KE+LAMDRY
1001 CONTINUE
!$OMP END DO
!$OMP DO
DO 1002 I=NPOINT+1, NPOINTVEC
NOD_CLAMS(I) = NOD_CLAMS(NOD_IORGNOD(I,1))
1002 CONTINUE
!$OMP END DO
!$OMP END PARALLEL
RETURN
END SUBROUTINE NONLINTP

C *****
C * SOLUCION DE LA ECUACION DIFERENCIAL DE TEMPERATURA *
C *****
SUBROUTINE RESOTEMP
C ***** VARIABLES GLOBALES DEL PROGRAMA
USE VAR_GLOBAL
IMPLICIT NONE
C ***** FUNCIONES LOCALES
REAL AIRE_PRESSATVAP
C ***** VARIABLES LOCALES DEL PROGRAMA
REAL(8) XLAMB(6), XT(6), XLAMBX, QTOT
REAL(8) XLAMBXV, UVX, XLAMBV(6), XV(6)
INTEGER I, J
!$OMP PARALLEL DEFAULT(SHARED) PRIVATE(XLAMB, XT, XLAMBX, QTOT
! 1 , XLAMBXV, UVX, XLAMBV, XV, I, J) NUM_THREADS(NUMHILOS)

!$OMP DO
C CALCULO TEMPERATURA DE LOS NODOS FICTICIOS DE FRONTERA
DO 1001 I = NPOINT+1, NPOINTVEC
XLAMBX = (NOD_CLAMS(I)*NOD_CLAMS(NOD_IORGNOD(I,1)))*0.5
NOD_TEMP(I) = NOD_TEMP(NOD_IORGNOD(I,2))-2*NOD_DELTAFR(I)*
1 ACTXFR(NOD_FRT(NOD_IORGNOD(I,1)), NOD_IVECNOD(I))/XLAMBX

```

```

IF (NOD_FRA(NOD_IORGNOD(I,1)).NE.0) THEN
!CONDICION DE LIMITE ATMOSFERICO
IF (FRO_TFRONT(NOD_FRA(NOD_IORGNOD(I,1)),PASCURVA).EQ.7) THEN
1 QTOT = NOD_FLUCAL(NOD_IORGNOD(I,1))+
1 NOD_FLEVAP(NOD_IORGNOD(I,1))
1 NOD_TEMP(I) = NOD_TEMP(NOD_IORGNOD(I,2))-2*NOD_DELTAFR(I)*
1 (QTOT)/XLAMBX
END IF
END IF

XLAMBXV = (NOD_DV(I) * NOD_DV(NOD_IORGNOD(I,1)))**0.5
NOD_UV(I) = NOD_UV(NOD_IORGNOD(I,1))
! IF (XLAMBXV.EQ.0) THEN
! NOD_UV(I) = AIRE_PRESSATVAP(NOD_TEMP(I))
! ELSE
! NOD_UV(I) = NOD_UV(NOD_IORGNOD(I,2)) - 2*NOD_DELTAFR(I)*
! 1 ACTXFR(NOD_FRV(NOD_IORGNOD(I,1)),NOD_IVECNOD(I))/XLAMBXV
! END IF
1001 CONTINUE
!$OMP END DO
!$OMP DO
DO 1002 I=INIPO,NPOINT
!PARA EL CASO DE TEMPERATURA IMPUESTA
IF (NOD_FRT(I).NE.0) THEN
IF (FRO_TFRONT(NOD_FRT(I),PASCURVA).EQ.2) THEN
NOD_TEMP1(I)=ACTXFR(NOD_FRT(I),1)
GOTO 1002
ENDIF
ENDIF
!PARA EL CASO DE POTENCIAL IMPUESTO
IF (NOD_FRV(I).NE.0) THEN
IF (FRO_TFRONT(NOD_FRV(I),PASCURVA).EQ.2) THEN
NOD_UV1(I) = ACTXFR(NOD_FRV(I),1)
ENDIF
ENDIF

!CUALQUIER OTRO CASO CON FRONTERA
DO 1003 J=1,6
XLAMB(J)=(NOD_CLAMS(I)*NOD_CLAMS(NOD_NP(I,J)))**0.5
XT(J) = NOD_TEMP(NOD_NP(I,J))
XLAMBV(J) = (NOD_DV(I)*NOD_DV(NOD_NP(I,J)))**0.5
XV(J) = NOD_UV(NOD_NP(I,J))
1003 CONTINUE

1 NOD_TEMP1(I) = XLAMB(1)*NOD_AGEOM(I,1)*XT(1)+XLAMB(2)*
2 NOD_AGEOM(I,2)*XT(2)+XLAMB(3)*NOD_AGEOM(I,3)*XT(3)+
3 XLAMB(4)*NOD_AGEOM(I,4)*XT(4)+XLAMB(5)*NOD_AGEOM(I,5)*
4 XT(5)+XLAMB(6)*NOD_AGEOM(I,6)*XT(6)-(XLAMB(1)*
5 NOD_AGEOM(I,1)+XLAMB(2)*NOD_AGEOM(I,2)+XLAMB(3)*
6 NOD_AGEOM(I,3)+XLAMB(4)*NOD_AGEOM(I,4)+XLAMB(5)*
7 NOD_AGEOM(I,5)+XLAMB(6)*NOD_AGEOM(I,6))*NOD_TEMP(I)

1 UVX = XLAMBV(1)*NOD_AGEOM(I,1)*XV(1)+XLAMBV(2)*
2 NOD_AGEOM(I,2)*XV(2)+XLAMBV(3)*NOD_AGEOM(I,3)*XV(3)+
3 XLAMBV(4)*NOD_AGEOM(I,4)*XV(4)+XLAMBV(5)*NOD_AGEOM(I,5)*
4 XV(5)+XLAMBV(6)*NOD_AGEOM(I,6)*XV(6)-(XLAMBV(1)*
5 NOD_AGEOM(I,1)+XLAMBV(2)*NOD_AGEOM(I,2)+XLAMBV(3)*
6 NOD_AGEOM(I,3)+XLAMBV(4)*NOD_AGEOM(I,4)+XLAMBV(5)*
7 NOD_AGEOM(I,5)+XLAMBV(6)*NOD_AGEOM(I,6))*NOD_UV(I)

1 UVX = DT*(UVX*CLV*(NOD_UA(I)-NOD_UV(I))/(NOD_UA(I)+UATM))/
2 NOD_CES(I)

1 NOD_TEMP1(I) = NOD_TEMP(I)+NOD_TEMP1(I)*DT/NOD_CES(I)-UVX

```

```
C      INCLUIR EL CALOR GENERADO POR LA REACCION BIOQUIMICA
      NOD_TEMP1(I) = NOD_TEMP1(I)+NOD_QGEN(I)/NOD_CES(I)

      IF(NOD_FRT(I).NE.0)THEN
        !CONDICION DE FUENTE DE CALOR INTERNO
        IF(FRO_TFRONT(NOD_FRT(I),PASCURVA).EQ.3)THEN
          NOD_TEMP1(I) = NOD_TEMP1(I)+ACTXFR(NOD_FRT(I),1)*DT/NOD_CES(I)
        ENDIF
      ENDIF

1002  CONTINUE
!$OMP END DO
!$OMP END PARALLEL
      RETURN
      END SUBROUTINE RESOTEMP
```