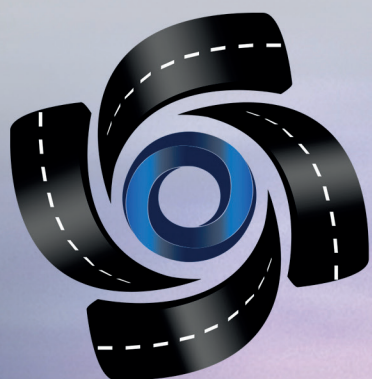


M A R Z O 2 0 2 1



CIID

Investigación, Innovación y Desarrollo

Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo en
Infraestructura y Seguridad Vial

**ESPECTROS DE CARGA Y DAÑO
PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS**

Dr. Paul Garnica Anguas



In Memoriam

Mtro. Alfonso Rico Domínguez

Prólogo

El haber sido nombrado para impartir la Quinta Conferencia Magistral “Alfonso Rico Rodríguez” es un honor que, como me dijo una gran amiga y colega, ni se pide ni se rechaza. Agradezco la distinción tanto a la Asociación Mexicana de Vías Terrestres como a la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.

Muchos tuvieron la suerte de tratar y convivir con el Maestro Alfonso Rico en diferentes momentos. Unos durante sus estudios de ingeniería civil en la Universidad, otros durante los largos y fructíferos años en la Dirección General de Servicios Técnicos de la actual Secretaría de Comunicaciones y Transportes y otros, como es mi caso, durante su estadía en el Instituto Mexicano del Transporte, IMT.

Seis fueron los años, sus últimos, en que tuve la ocasión de disfrutar de su conversación, aprender de sus conocimientos, debatir temas diversos, enfrentar sus disgustos y padecer de su fina ironía. El Maestro Alfonso Rico fue realmente un ingeniero destacado, de esos que representan las cumbres del ejercicio profesional, y realmente de aquellos en que aplican las palabras del verdadero maestro, en el que enseñar es un ejercicio de inmortalidad. Ya que de alguna forma sigue viviendo en aquellos en que aprendimos a ver el mundo a través de la magia de su palabra.

Así, el profesor no muere nunca... Gracias por ello.

El autor.

1. Introducción

Se dice que diseñar un pavimento es un arte; el arte de utilizar materiales que no conocemos completamente, en formas que no podemos analizar con precisión, para que soporten cargas que no sabemos predecir, de tal forma que nadie sospeche nuestra ignorancia.

Y es que, “de esa estructura compleja a la que llamamos pavimento, que construimos muchos en muchas variedades, con distintos materiales, para muy diferentes usos, en muy diferentes terrenos y que usamos en todo momento, a fondo, lo ignoramos todo”. Así escribió el Maestro Alfonso Rico en la Decimocuarta Conferencia Nabor Carrillo.

El pavimento es un caso típico de una estructura que la mayor parte de las veces se diseña gracias al éxito en la observación y en la acumulación de experiencia. Ahí tenemos los caminos de la civilización romana o los caminos pre-hispánicos en México (ver Figura 1). De esos caminos antiguos a las modernas autopistas, una misma actividad económica se mantiene: el Transporte.

Así también, se comparte, entre épocas pasadas y modernas, la necesidad de minimización de los costos de construcción y mantenimiento de esos caminos, preservando la infraestructura, para cumplimiento de su función.

En México, la extensión actual de toda la red es de más de 349,000 km, de los cuales el 33.5% son pavimentadas y el 66.5% no lo son. De la red pavimentada, el 91% comprende carreteras de dos carriles y el resto son de cuatro carriles ó más. En cuanto a su jurisdicción, el 13.8% de la red es federal, el 21.4% es estatal, el 45.7% son caminos rurales y el 15.9% son brechas mejoradas.

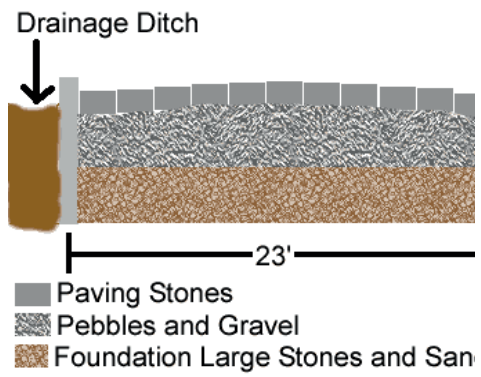
El sector transporte es la cuarta actividad generadora de valor agregado bruto, en donde el transporte de carga y pasajeros participa con el 80% del total.

Es por ello que, para fines de análisis y diseño de pavimentos, la caracterización adecuada del tránsito de los vehículos de carga es indispensable.

En este trabajo se presenta una metodología (Figura 2) que, sin descuidar otros factores, pone un énfasis en el concepto de <<espectro de carga>> para relacionarlo con el de <<espectro de daño>>, a través del análisis de esfuerzos y deformaciones en la estructura de pavimento y su correlación con los principales tipos de deterioros que se pueden presentar.

A continuación los detalles.

a) Caminos de la civilización romana

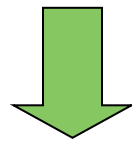
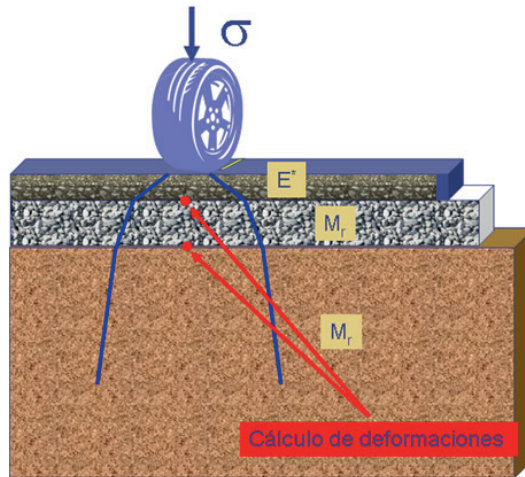
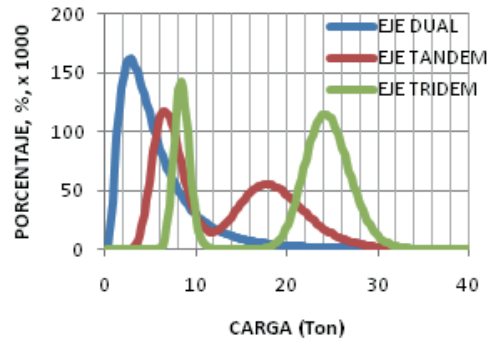


b) Antiguos caminos pre-hispánicos



Figura 1. Antiguos caminos romanos y pre-hispánicos.

ESPECTROS DE CARGA



ESPECTROS DE DAÑO

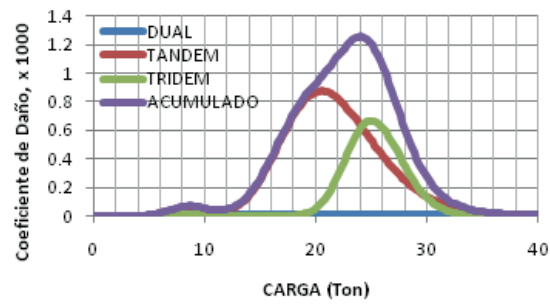


Figura 2. Esquema de la metodología propuesta.

2. Espectros de carga

Dentro del gran número de factores que se consideran actualmente para el análisis estructural y diseño de pavimentos, el tránsito vehicular es uno de los más importantes. Su caracterización adecuada es fundamental para poder concebir estructuras de pavimento que sean capaces de ofrecer altos desempeños en términos de durabilidad.

La importancia de ese factor es exponencialmente mayor en vías de alto y muy alto tránsito vehicular, como sucede en los ejes carreteros troncales del País, aunque no exclusivamente, en donde un gran porcentaje de los vehículos son de carga y muy pesados. En México, el interés se centra en cinco tipos de vehículos de carga, cuya configuración y pesos legales se indican en la Figura 3, e imágenes de los mismos en la Figura 4. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana de Pesos y Dimensiones del 2008 los pesos máximos permitidos para los ejes sencillos duales, en tándem y en tridem son 11, 18 y 23.5 toneladas, respectivamente. En la misma figura se presentan, para fines de comparación, los valores que se tenían anteriormente en la Norma del año 1995 y los que se especifican en las carreteras interestatales de los Estados Unidos.


Esos pesos máximos por eje mencionados son valores legales, en ningún caso se les podría considerar como valores de diseño. La autoridad correspondiente es la responsable de su cumplimiento.


Para fines de diseño, rehabilitación, modernización, reconstrucción, preservación y operación de carreteras, se propone que la mejor caracterización del tránsito vehicular es en términos de lo que denomina espectros de carga de cada uno de los diferentes tipos de ejes. Para ello se utilizan estaciones móviles de pesaje dinámico, denominadas en el ámbito de trabajo como estaciones WIM, por sus siglas en inglés Weight In Motion, y de las que se presentan unas imágenes en la Figura 5.


Esas estaciones de pesaje están compuestas básicamente por sensores piezo-eléctricos de alta precisión, cableado y consola de registro. Se realiza una calibración inicial con un vehículo de carga de peso conocido que permite definir los factores de ajuste dinámicos. Con las tecnologías más recientes, esas estaciones son muy fáciles de operar y registran en tiempo real la configuración y pesos de cada eje de los vehículos de carga circulando a velocidades de operación.

TIPO	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO Y PESO POR EJE (Ton)			PBV (Ton)
------	---	--	--	-----------

C2 <i>Class 5</i>				
	NOM 1995	11	6.5	17.5
	NOM 2008	11	6.5	17.5
	Estados Unidos	9	5.5	14.5

C3 <i>Class 6</i>				
	NOM 1995	19.5	6.5	26.0
	NOM 2008	18.0	6.5	24.5
	Estados Unidos	15.5	5.5	21.0

T3-S2 <i>Class 9</i>					
	NOM 1995	6.5	19.5	18	44.0
	NOM 2008	6.5	18	17	41.5
	Estados Unidos	5.5	15.5	15.5	36.5

T3-S3 <i>Class 10</i>					
	NOM 1995	6.5	19.5	22.5	48.5
	NOM 2008	6.5	18	23.5	48
	Estados Unidos	5.5	15.5	19.0	40


T3-S2-R4							
	NOM 1995	6.5	19.5	18	18	18	66.5
	NOM 2008	6.5	18	17	17	17	66.5
	Estados Unidos	5.5	15.5	15.5	15.5	15.5	67.5

Figura 3. Configuraciones y pesos legales de vehículos de carga en México.

a) Vehículo de carga C2



b) Vehículo de carga T3-S2



c) Vehículo de carga C3



d) Vehículo de carga T3-S3



e) Vehículo de carga T3-S2



Figura 4. Fotografías de las principales configuraciones de vehículos de carga en México.

a) Cableado y sensores



b) Sensores piezoeléctricos



c) Consola de registro



d) Señalamiento



Figura 5. Componentes de una estación móvil de pesaje dinámico (WIM).

Las estaciones registran de manera continua por un cierto número días y se pueden instalar, con costos de operación relativamente bajos, a lo largo y ancho de la red carretera y en distintas épocas del año. De hecho es una actividad que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, SCT, realiza desde 1991 como parte de los programas de monitoreo de pesos y dimensiones en la red mexicana de carreteras.

Los espectros de carga se calculan usualmente para cada tipo de eje: sencillo dual, tándem y tridem. Se definen como la relación entre el número de ejes con cierto rango de carga y el número total de ese tipo de eje, expresado en porcentaje. Los rangos de carga, que definen los intervalos de clase, utilizados en este trabajo son los que se indican en la Tabla 1, y que corresponden a los valores utilizados en los Estados Unidos en la futura guía mecanicista para diseño de pavimentos de la AASHTO.

En las Figuras 6 a 12 se presentan los espectros de carga para varias carreteras mexicanas, y que son una muestra de las más de 160 estaciones que se han instalado desde 1991. En todos los casos se indica con una línea roja la carga máxima legal correspondiente. La totalidad de los espectros está en curso de publicación por el Instituto Mexicano del Transporte.

Entre los múltiples aspectos que se pueden mencionar en relación a los espectros de carga conviene destacar los siguientes:

1. Cada punto del espectro de carga representa el porcentaje de ejes de un cierto tipo que circula con cierto nivel de carga.
2. El área bajo la curva de cada espectro de carga debe ser unitaria.
3. El espectro de carga caracteriza al tránsito pesado en el tramo carretero en donde se hace la medición. El seguimiento en el tiempo permite valorar la evolución de la distribución de las cargas, aspecto que está relacionado con la intensidad de las actividades económicas en el sector transporte.
4. Los valores máximos permiten identificar los niveles de carga más usuales; niveles que se pueden asociar a si los vehículos circulan vacíos o con carga completa.
5. Permite identificar los tramos carreteros en donde los niveles de carga exceden el reglamento y en qué porcentaje.
6. Se pueden asociar comportamientos del tránsito de vehículos de carga similares y establecer espectros regionales.
7. Permiten diseñar y revisar la capacidad estructural de un pavimento con datos realmente representativos de una red carretera.
8. Son indicadores de la severidad que se puede esperar de los distintos deterioros en una carretera a lo largo del tiempo. Esto puede ser de particular interés para los responsables de la conservación y mantenimiento de una red carretera en términos de desempeño.

Para el caso de la red mexicana de carreteras, del análisis de las Figuras 6 a 12 se puede constatar que en todos los casos, solo los ejes sencillos duales (vehículos C2) tienen un espectro de carga que se puede considerar como ideal en el sentido del cumplimiento con las cargas legales.

Los ejes tridem son exclusivos de las configuraciones T3-S3 pero en los tándem participan prácticamente todas las configuraciones de los vehículos de carga a excepción del C2.

Se pueden comparar los espectros de carga con niveles de sobrecarga importantes (Fig. 6) con aquellos que prácticamente cumplen el reglamento (Fig. 12).

De una manera general se observa que los niveles de sobrecarga son muy importantes tanto en los ejes tándem como tridem, especialmente en las carreteras libres que forman parte de la red principal, aunque las autopistas de cuota no están exentas de ese fenómeno.

En el capítulo que sigue se muestra como se puede valorar el daño a un pavimento carretero a partir del conocimiento de los espectros de carga, definiendo el concepto de << *espectro de daño* >>.

RANGOS DE CARGA PARA CADA TIPO DE EJE (en Toneladas)								
Sencillo		Promedio	Tándem		Promedio	Tridem		Promedio
0	1.35	0.68	0	2.7	1.35	0	5.4	2.70
1.35	1.8	1.58	2.7	3.6	3.15	5.4	6.75	6.08
1.8	2.25	2.03	3.6	4.5	4.05	6.75	8.1	7.43
2.25	2.7	2.48	4.5	5.4	4.95	8.1	9.45	8.78
2.7	3.15	2.93	5.4	6.3	5.85	9.45	10.8	10.13
3.15	3.6	3.38	6.3	7.2	6.75	10.8	12.15	11.48
3.6	4.05	3.83	7.2	8.1	7.65	12.15	13.5	12.83
4.05	4.5	4.28	8.1	9	8.55	13.5	14.85	14.18
4.5	4.95	4.73	9	9.9	9.45	14.85	16.2	15.53
4.95	5.4	5.18	9.9	10.8	10.35	16.2	17.55	16.88
5.4	5.85	5.63	10.8	11.7	11.25	17.55	18.9	18.23
5.85	6.3	6.08	11.7	12.6	12.15	18.9	20.25	19.58
6.3	6.75	6.53	12.6	13.5	13.05	20.25	21.6	20.93
6.75	7.2	6.98	13.5	14.4	13.95	21.6	22.95	22.28
7.2	7.65	7.43	14.4	15.3	14.85	22.95	24.3	23.63
7.65	8.1	7.88	15.3	16.2	15.75	24.3	25.65	24.98
8.1	8.55	8.33	16.2	17.1	16.65	25.65	27	26.33
8.55	9	8.78	17.1	18	17.55	27	28.35	27.68
9	9.45	9.23	18	18.9	18.45	28.35	29.7	29.03
9.45	9.9	9.68	18.9	19.8	19.35	29.7	31.05	30.38
9.9	10.35	10.13	19.8	20.7	20.25	31.05	32.4	31.73
10.35	10.8	10.58	20.7	21.6	21.15	32.4	33.75	33.08
10.8	11.25	11.03	21.6	22.5	22.05	33.75	35.1	34.43
11.25	11.7	11.48	22.5	23.4	22.95	35.1	36.45	35.78
11.7	12.15	11.93	23.4	24.3	23.85	36.45	37.8	37.13
12.15	12.6	12.38	24.3	25.2	24.75	37.8	39.15	38.48
12.6	13.05	12.83	25.2	26.1	25.65	39.15	40.5	39.83
13.05	13.5	13.28	26.1	27	26.55	40.5	41.85	41.18
13.5	13.95	13.73	27	27.9	27.45	41.85	43.2	42.53
13.95	14.4	14.18	27.9	28.8	28.35	43.2	44.55	43.88
14.4	14.85	14.63	28.8	29.7	29.25	44.55	45.9	45.23
14.85	15.3	15.08	29.7	30.6	30.15	45.9	47.25	46.58
15.3	15.75	15.53	30.6	31.5	31.05	47.25	48.6	47.93
15.75	16.2	15.98	31.5	32.4	31.95	48.6	49.95	49.28
16.2	16.65	16.43	32.4	34.2	33.30	49.95	51.3	50.63

Tabla 1. Rangos de carga utilizados para el cálculo de los espectros carga para los ejes sencillo dual, tándem y tridem de los principales vehículos de carga en México.

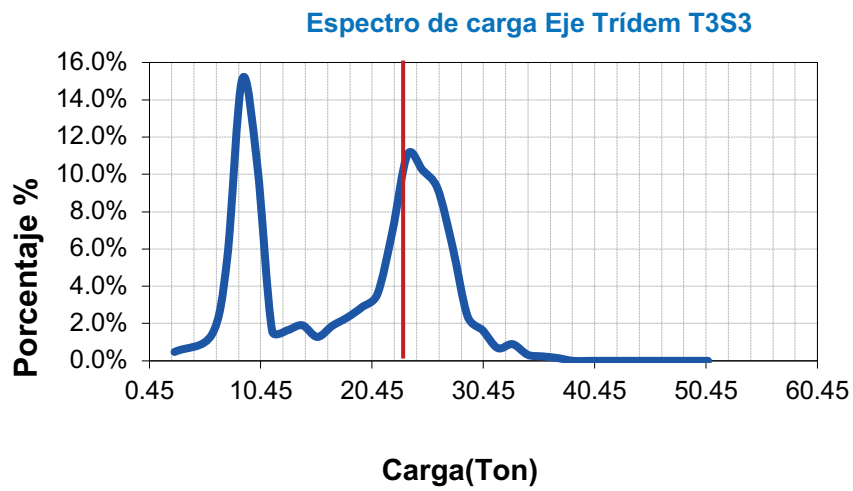
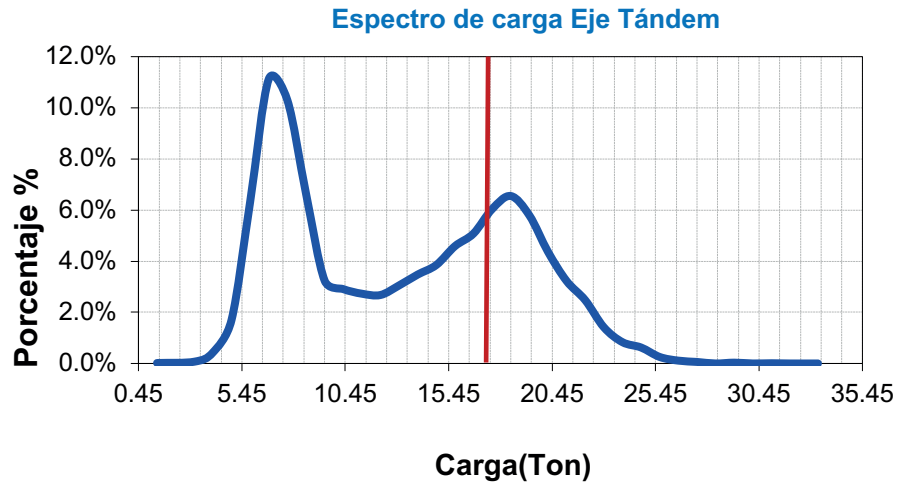
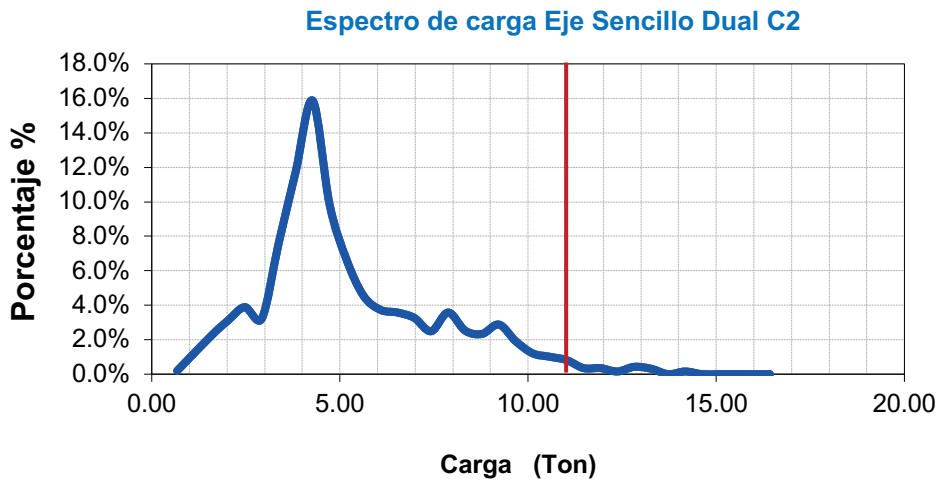


Figura 6. Espectros de carga en la carretera libre Portezuelo-Palmillas (2003).

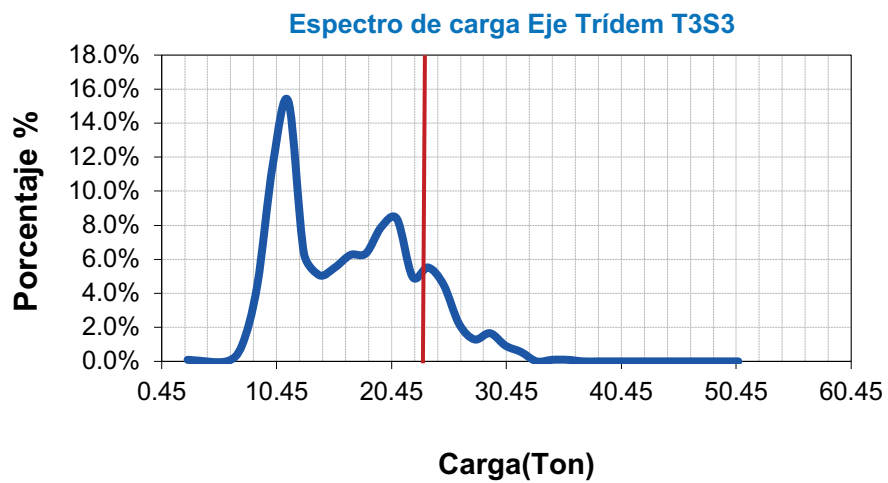
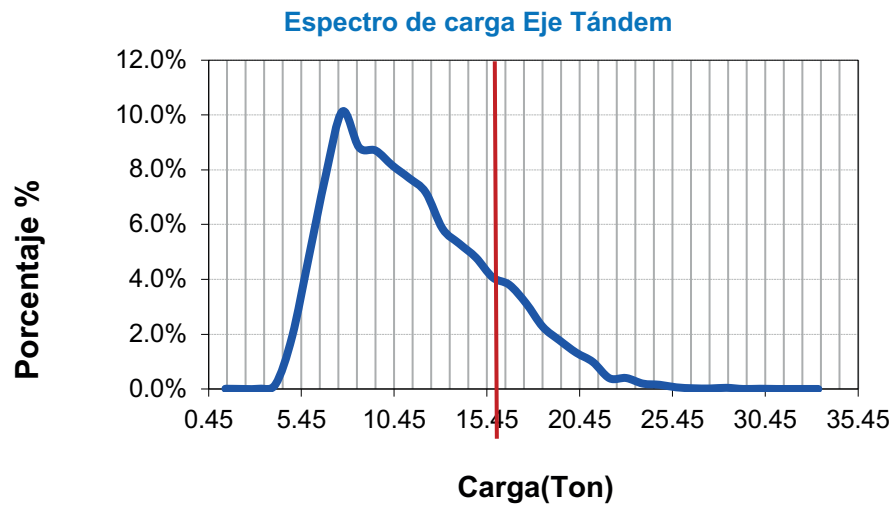
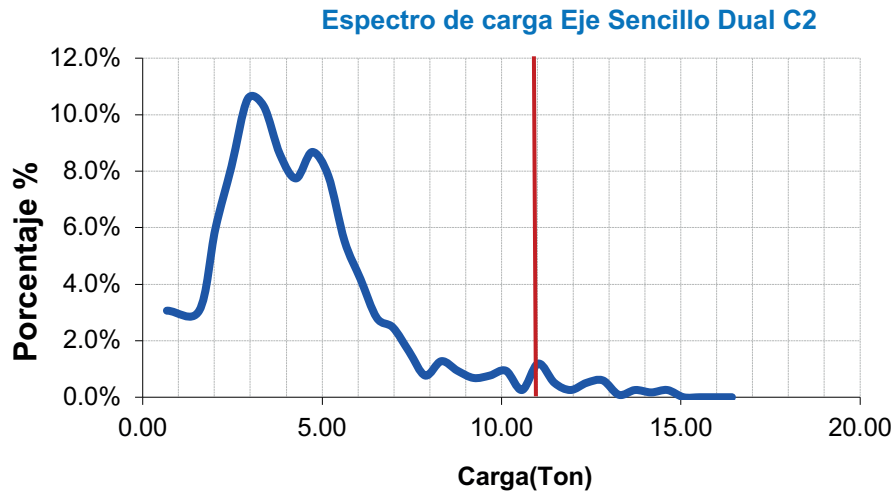


Figura 7. Espectros de carga en la carretera libre Gómez Palacio – Jiménez (2005).

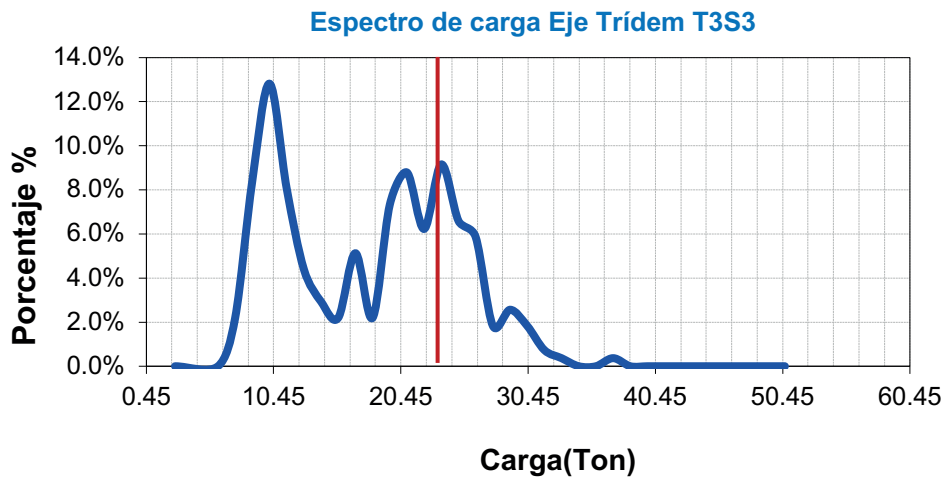
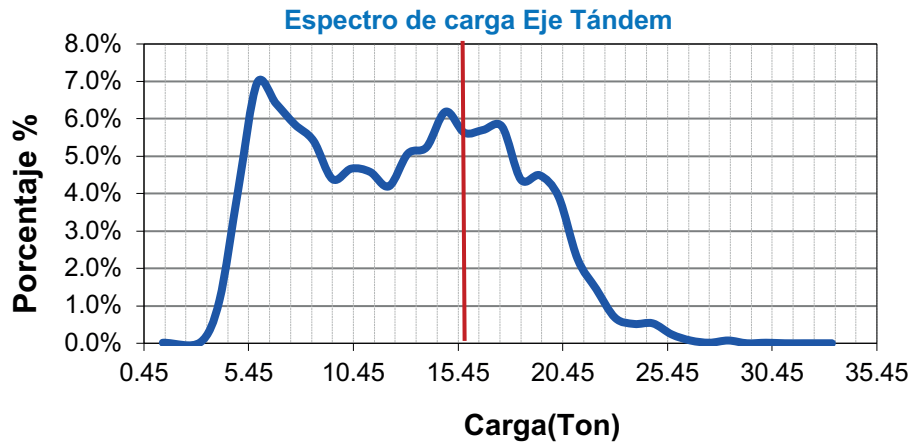
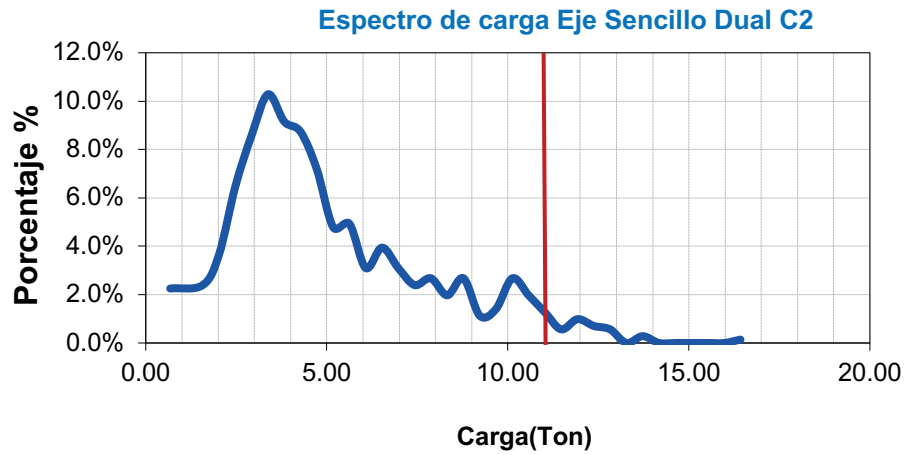


Figura 8. Espectros de carga en la carretera de cuota Champoton – Campeche (2005).

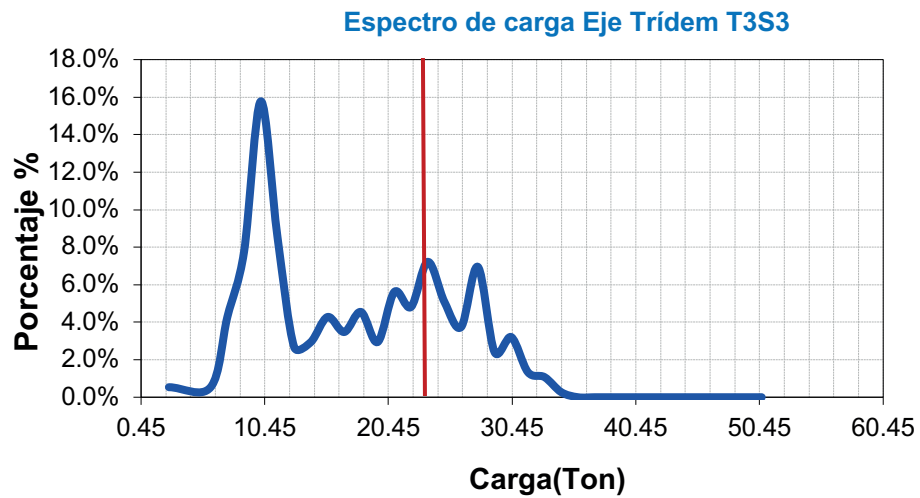
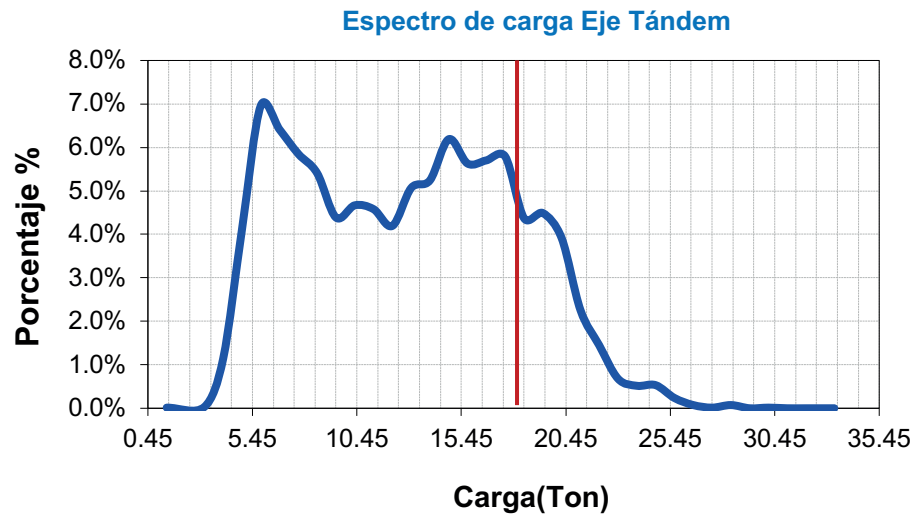
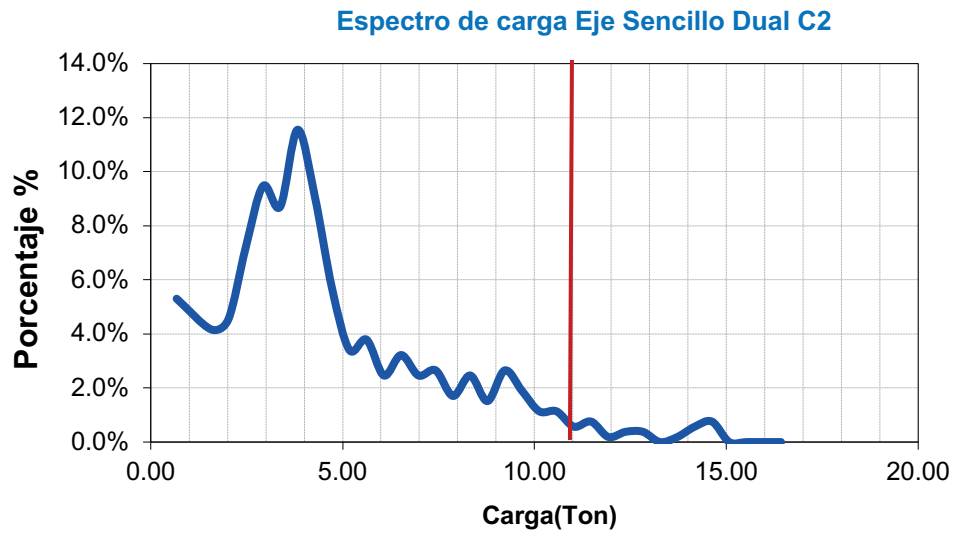


Figura 9. Espectro de carga en la carretera de cuota Las Choapas – Ocozocuahtla (2005).

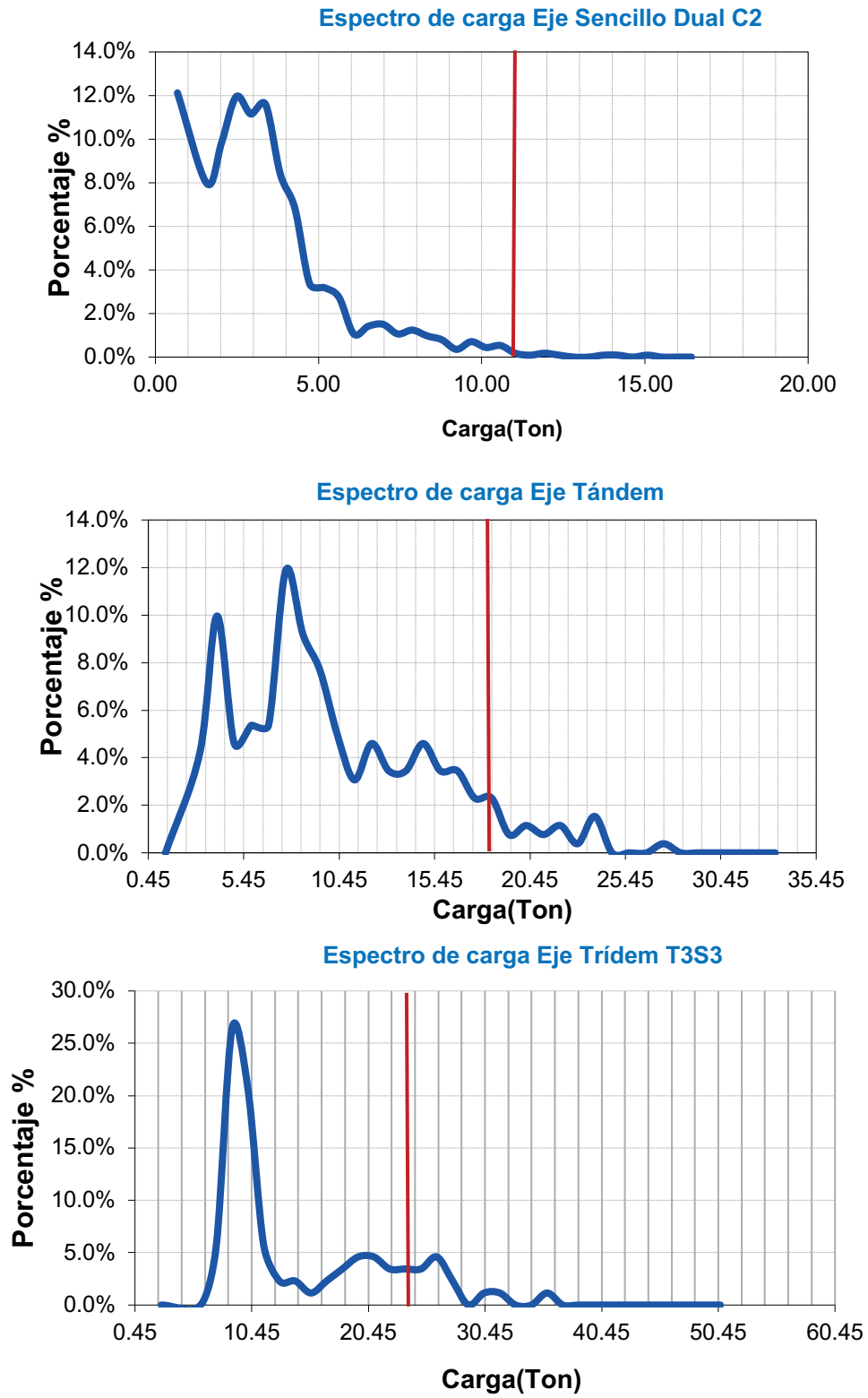


Figura 10. Espectro de carga en la carretera libre Tuxtla Gutiérrez – Cuauhtémoc (2002).

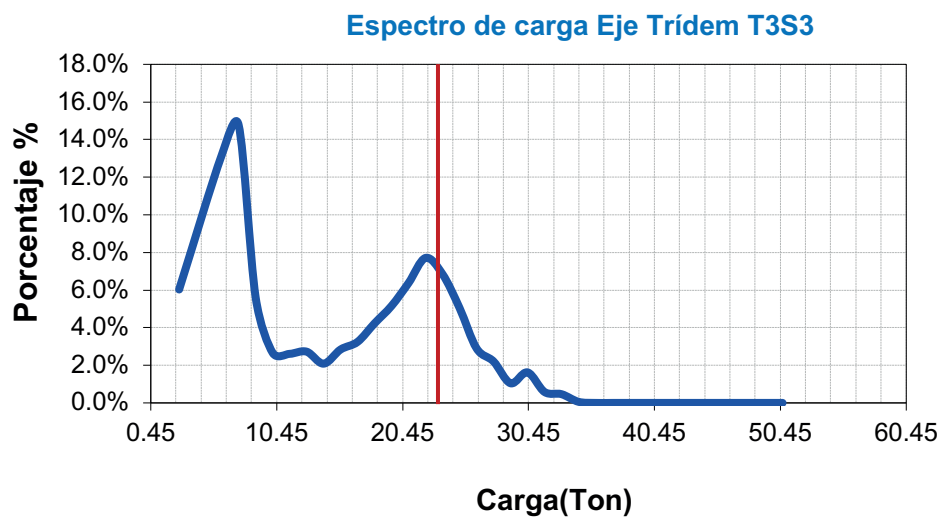
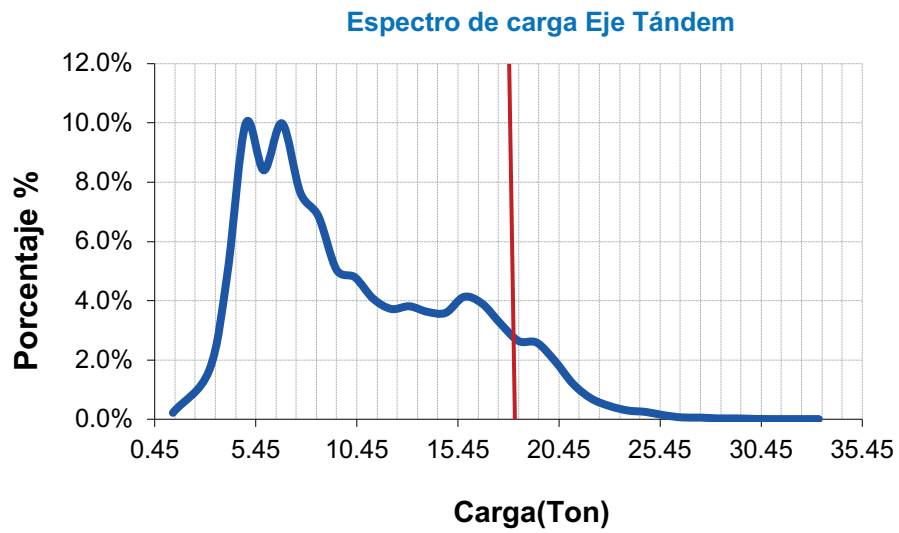
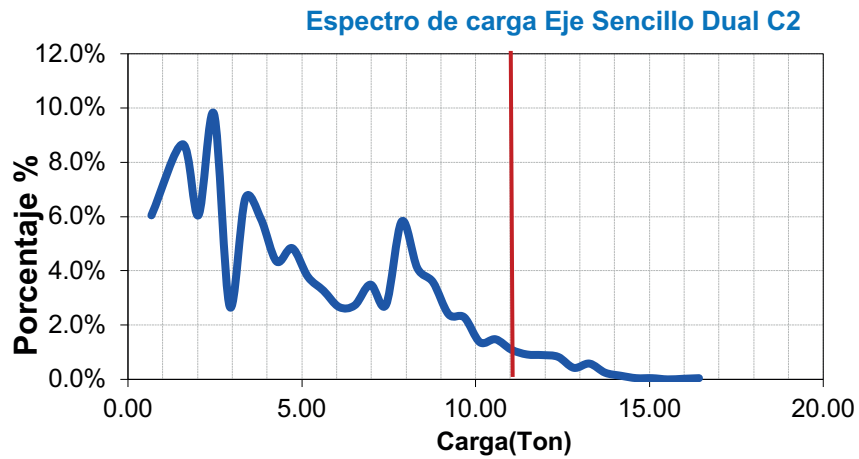


Figura 11. Espectros de carga en la carretera de cuota México – Querétaro (1997).

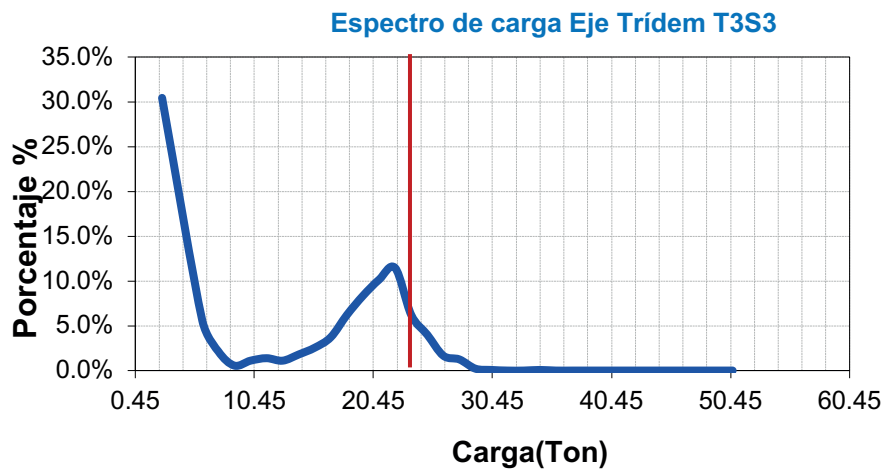
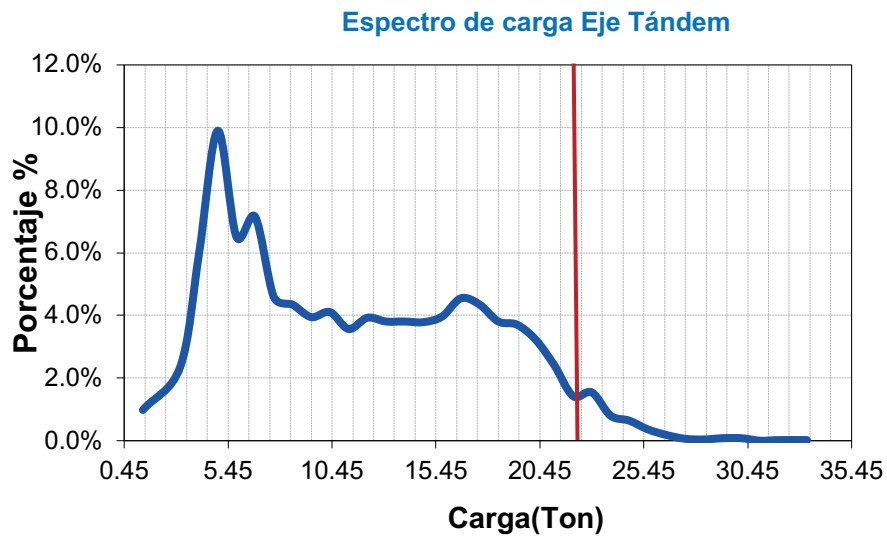
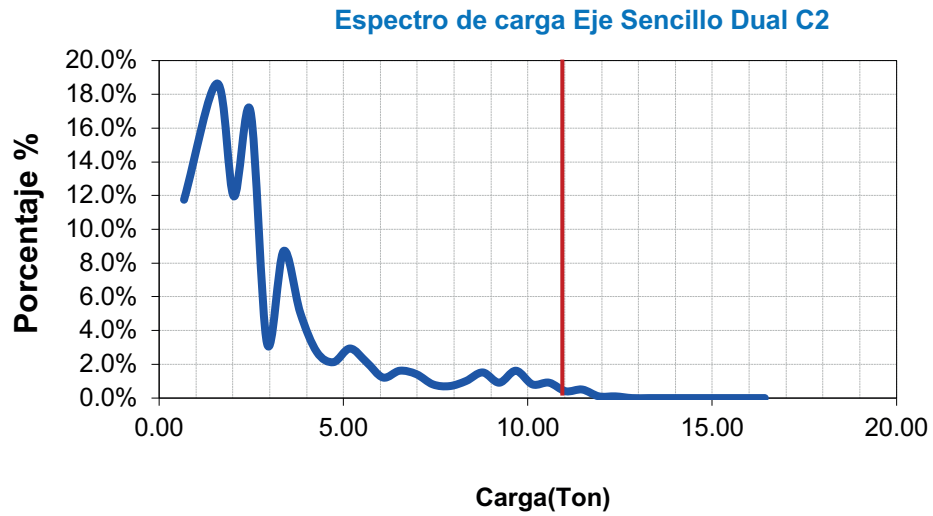


Figura 12. Espectros de carga en la carretera libre Monclova – Piedras Negras (1997).

3. Espectros de daño

Para la obtención de los espectros de daño, generalizaremos el concepto de daño definido por Miner, 1945, en donde para cada tipo de eje, i , y cada nivel de carga, j , se obtiene el cociente entre el número de repeticiones correspondiente esperado por año, n , y el número de repeticiones admisibles, N , para limitar el desarrollo de un cierto tipo de deterioro. El daño total se calcula con la ecuación (1).

$$D = \sum_i \sum_j \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \quad (1)$$

El coeficiente de Daño, D , así obtenido, está asociado a un cierto tipo de deterioro en el pavimento, como los que se muestran en la Figura 13. El inverso de D representa el tiempo, T (en años), en que se alcanzará el número de repeticiones admisible de ese deterioro y es el que se debe comparar con el período de diseño deseado (usualmente 20 años en pavimentos asfálticos).

Es práctica común el asociar el número de repeticiones admisible con los esfuerzos y deformaciones máximos que se presentan en puntos críticos de la sección estructural de un pavimento. Para agrietamiento por fatiga se toma, por ejemplo, la deformación unitaria de tensión máxima, ε_t , en la fibra inferior de la carpeta asfáltica y, para la deformación permanente de las capas inferiores, la deformación unitaria de compresión máxima, ε_c , en la parte superior de las terracerías. El cálculo de esas deformaciones supone un comportamiento elástico de los materiales, lo que es válido en pavimentos ya que los niveles de esfuerzos que se generan al paso de las cargas vehiculares son muy inferiores a la resistencia al esfuerzo cortante. Los módulos elásticos que se utilizan deben ser, sin embargo, obtenidos en ensayos de carga cíclica. Los procedimientos de ensaye para la obtención de los módulos dinámicos en mezclas asfálticas, módulos elásticos en suelos estabilizados, y módulos resilientes en suelos compactados y materiales granulares, están todos normalizados. El proceso descrito se ilustra en la Figura 14; una mayor información en relación al comportamiento de materiales para carreteras se puede consultar en mucha de la bibliografía que se menciona al final del trabajo.

Para el número de repeticiones admisible para agrietamiento por fatiga, N_f , se utilizan modelos del tipo que se indica en la ecuación (2). La Tabla 2 resume los valores de f_1 y f_2 más usuales.

$$N_f = f_1 \varepsilon_t^{-f_2} \quad (2)$$

INSTITUCIÓN	f_1	f_2
Illinois DOT, USA	5×10^{-6}	3.0
TRRL, U.K.	1.66×10^{-10}	4.32
BRRC, Bélgica	4.92×10^{-14}	4.76

Tabla 2. Parámetros de los modelos de agrietamiento por fatiga utilizados por diferentes instituciones.

Para los modelos de deterioro por deformación permanente de las capas inferiores la forma matemática es la que se establece en la ecuación (3). En la Tabla 3 se muestran los valores típicos de f_4 y f_5 utilizados por diversas instituciones.

$$N_d = f_4 \varepsilon_c^{-f_5} \quad (3)$$

En los cálculos que se presentan en lo que sigue, se utilizarán los parámetros del Laboratorio de Investigación Británico sobre Transporte Carretero, TRRL.

El cálculo de esfuerzos y deformaciones se realizó con el método de Odemark, 1949, que permite transformar la estructura de un pavimento en una sección homogénea equivalente. Los detalles del método se pueden encontrar en el libro de Ullidtz, 1998. Los resultados obtenidos con esta metodología para las deformaciones unitarias que se requieren son muy similares a los que proporcionan los programas de cómputo existentes basados en la Teoría de Burmister para medios estratificados, además de permitir una programación mucho más sencilla.

Las configuraciones de los ejes de carga y distribución de áreas de contacto que se utilizaron son las que se muestran en la Figura 15. Se considero válido el principio de superposición.

La Figura 16 muestra el diagrama de flujo general de las etapas necesarias para el cálculo de los Espectros de Daño.

INSTITUCIÓN	f_4	f_5	Deformación permanente máxima, en mm
Compañía Shell			
50 % de confiabilidad	6.15×10^{-7}	4.0	
85 % de confiabilidad	1.94×10^{-7}	4.0	
95 % de confiabilidad	1.05×10^{-7}	4.0	
Instituto del Asfalto	1.365×10^{-9}	4.477	12.7
TRL, U.K.			
85 % de confiabilidad	6.18×10^{-8}	3.97	10.16
BRR, Bélgica	3.05×10^{-9}	4.35	

Tabla 3. Parámetros de los modelos de deterioro por deformación permanente de las capas inferiores utilizados por diversas Instituciones.

a) Agrietamiento por fatiga



b) Deformaciones permanentes en las capas inferiores



c) Agrietamiento térmico

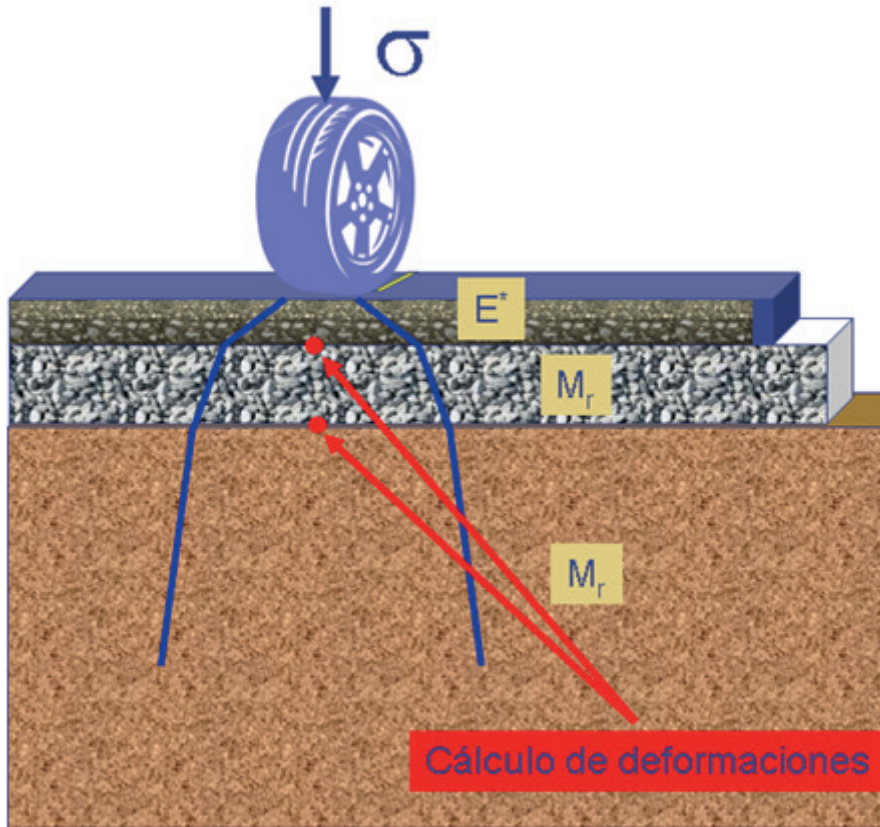


d) Roderas



Figura 13. Tipos de deterioros comunes en pavimentos asfálticos.

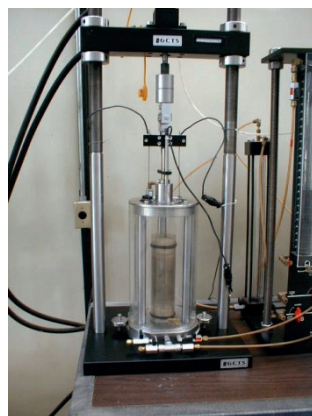
a) Modelación de la sección estructural de un pavimento y ubicación de puntos críticos para el cálculo de esfuerzos y deformaciones unitarias



b) Ensayo de Módulo Dinámico, E^*



d) Ensayo de Módulo de Resiliencia, M_r

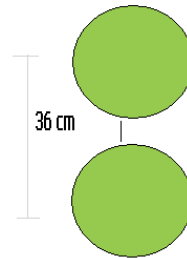
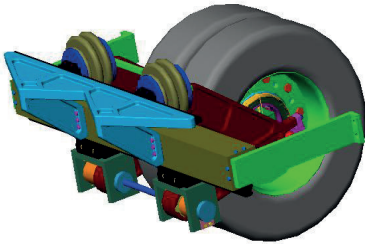


c) Ensayo de Fatiga

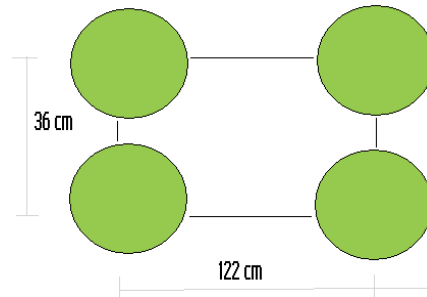
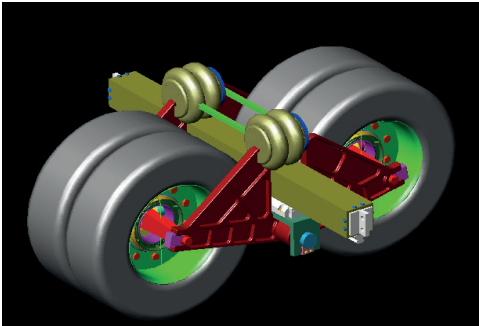


Figura 14. Esquema de la modelación de la sección estructural de un pavimento y equipos para la determinación de módulos dinámicos, resilientes y propiedades de fatiga.

a) Eje Sencillo Dual



b) Eje Tándem



c) Eje Tridem

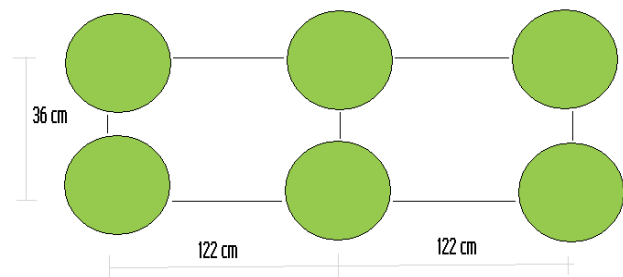
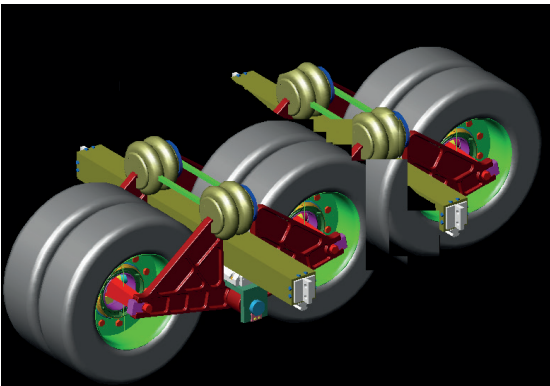


Figura 15. Configuración de los ejes de carga considerados y representación de las áreas de contacto correspondientes.

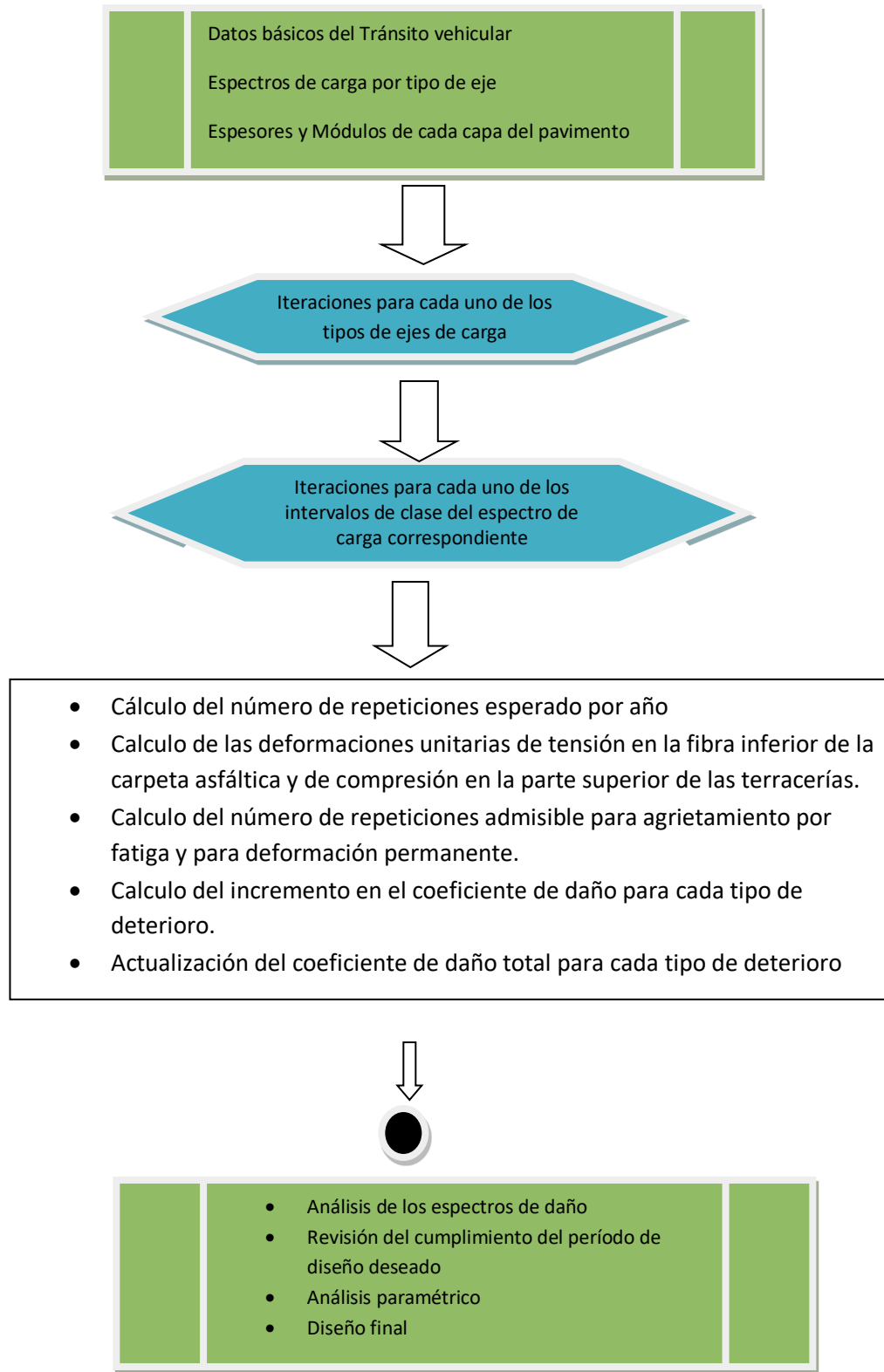


Figura 16. Diagrama de flujo general para el cálculo de los Espectros de Daño.

Ejemplos de diseño

Consideremos una carretera de 4 carriles con un Tránsito Diario Promedio Anual, TDPA, de 44,000 vehículos diarios con una tasa de crecimiento del 3%, de los cuales el 22% son vehículos de carga (5% de C2, 5% de C3, 7% de T3-S2, 4% T3-S3 y 1% de T3-S2-R4). Suponiendo coeficientes de distribución por sentido y por carril de 0.5 en ambos casos, el número promedio por año para cada tipo de eje de carga es el que se indica en la Tabla 4.

Tipo de Eje	Número de repeticiones esperado, por año
Sencillo Dual	71,040
Tándem	383,618
Tridem	56,832

Tabla 4. Número de repeticiones por año esperado para cada tipo de eje en los ejemplo de diseño.

La metodología permite revisar secciones estructurales para pavimentos nuevos o existentes, o bien valorar la modernización de la vía. Para ello la información que se requiere son los espesores de cada una de las capas y los módulos dinámicos, o resilientes, correspondientes.

Las secciones a evaluar pueden tomarse, por ejemplo, de catálogos de secciones, como los que se indican en las Figuras 17 (con base granular) y 18 (con base asfáltica), que son secciones teóricas diseñadas para 20 años con el método del Instituto de Ingeniería de la UNAM en condiciones de muy alto tránsito vehicular y un módulo resiliente de las capas de terracería de 100 MPa.

Para fines de cálculo, es recomendable una representación sencilla en términos de tres capas para la sección de pavimento que queremos analizar. Por ejemplo, si el proyecto considera carpeta, base, sub-base, subrasante y terracerías, el modelo de análisis deberá combinar base y sub-base en una sola capa con propiedades ponderadas por un lado, y de igual manera otra capa combinando subrasante y terracerías por el otro. Este proceso se ilustra en la Figura 19.

La simplificación anterior permite discutir brevemente dos aspectos de la estructuración usual de pavimentos flexibles en México. Si la presencia de la capa de sub-base es por aspectos de índole económico, al permitir un material de menor calidad que la base, el desempeño del pavimento puede verse gravemente afectado en condiciones de alto tránsito vehicular ya que un alto porcentaje de deformación se puede generar en esa capa. En esas condiciones su presencia es cuestionable. Por otro lado, la subrasante constituye en realidad el material de mejor calidad en la parte superior de las terracerías. Su presencia y control de calidad es clave en el desempeño de pavimento.







S150-100	NIVEL DE TRÁNSITO MUY ALTO 150 MILLONES DE EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS EN EL PERIODO DE DISEÑO	
PLATAFORMA DE CIMENTACIÓN CON MÓDULO DE 100 MPa		
		
		

Figura 17. Catálogo de secciones convencionales con base granular diseñadas con el método del Instituto de Ingeniería de la UNAM para niveles de tránsito muy alto y buena plataforma de cimentación.







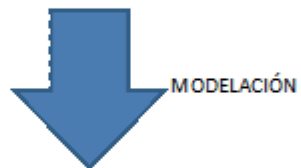
S150-100	NIVEL DE TRÁNSITO MUY ALTO 150 MILLONES DE EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS EN EL PERIODO DE DISEÑO	
PLATAFORMA DE CIMENTACIÓN CON MÓDULO DE 100 MPa	 <p>18.0cm 33.0cm</p>	 <p>25.0cm 48.0cm</p>
	 <p>14.0cm 28.0cm 45.0cm</p>	 <p>15.0cm 31.0cm 50.0cm</p>
	 <p>12.0cm 25.0cm 30.0cm 40.0cm</p>	 <p>12.0cm 25.0cm 30.0cm 40.0cm</p>

Figura 18. Catálogo de secciones con base asfáltica calculadas con el método del Instituto de Ingeniería de la UNAM para niveles de tránsito muy alto y buena plataforma de cimentación.

SECCIÓN DE PAVIMENTO A CONSTRUIR



SECCIÓN DE PAVIMENTO PARA ANÁLISIS



Figura 19. Esquema de modelación de la sección de pavimento para análisis.

Las Figuras 20 y 21 presentan los espectros de carga de diseño y los espectros de daño en términos de agrietamiento por fatiga y deformación permanente de las capas de terracería, respectivamente, para una sección de análisis con los espesores y módulos que se indican en la Tabla 5.

Capa	Espesor	Propiedad
Carpeta asfáltica convencional	15 cm	Módulo dinámico de 3,500 MPa
Base granular	40 cm	Módulo resiliente de 300 MPa
Terracerías		Módulo resiliente de 100 MPa

Tabla 5. Espesores y propiedades de la sección de análisis. Pavimento asfáltico con base granular.

Los espectros de carga de diseño considerados para cada tipo de eje (Figura 20.a) son los correspondientes a la estación de la carretera libre Portezuelo-Palmillas (Figura 6), y que representan condiciones de sobrecarga excesiva comunes en muchas carreteras mexicanas.

Para cada tipo de eje se pueden apreciar los espectros de daño calculados en agrietamiento por fatiga (Fig. 20.b) y deformación permanente (Fig. 21.b). El espectro de daño acumulado que se indica es la suma de los correspondientes a los tres ejes. Para ambos tipos de deterioro se pueden resaltar los siguientes aspectos importantes:

- **La contribución del daño inducido por el eje sencillo dual es despreciable en relación al Tándem y al Tridem, y esto para cualquier nivel de carga.**
- **La contribución del daño inducido por cualquier eje con una carga inferior a 10 Ton es despreciable para fines del análisis.**
- **La forma de los espectros de carga y daño, en cada tipo de eje, son similares para cargas mayores a 10 Ton.**
- **El eje Tridem contribuye en forma relevante en el daño inducido en la sección de análisis.**

Si acumulamos el daño tal y como se indica en las Figuras 20.c y 21.c, se pueden obtener las contribuciones parciales por tipo de eje y la total. En cada curva se indica el tiempo, calculado como el inverso del coeficiente de daño acumulado al final de cada curva, en que se alcanzaría el número de repeticiones admisible de acuerdo con los tipos de deterioro considerados y que se debe comparar con el período de diseño deseado. Se observa que el tipo de deterioro dominante es la deformación permanente de las capas inferiores y que la contribución al mismo de las repeticiones del eje Tridem es significativa.

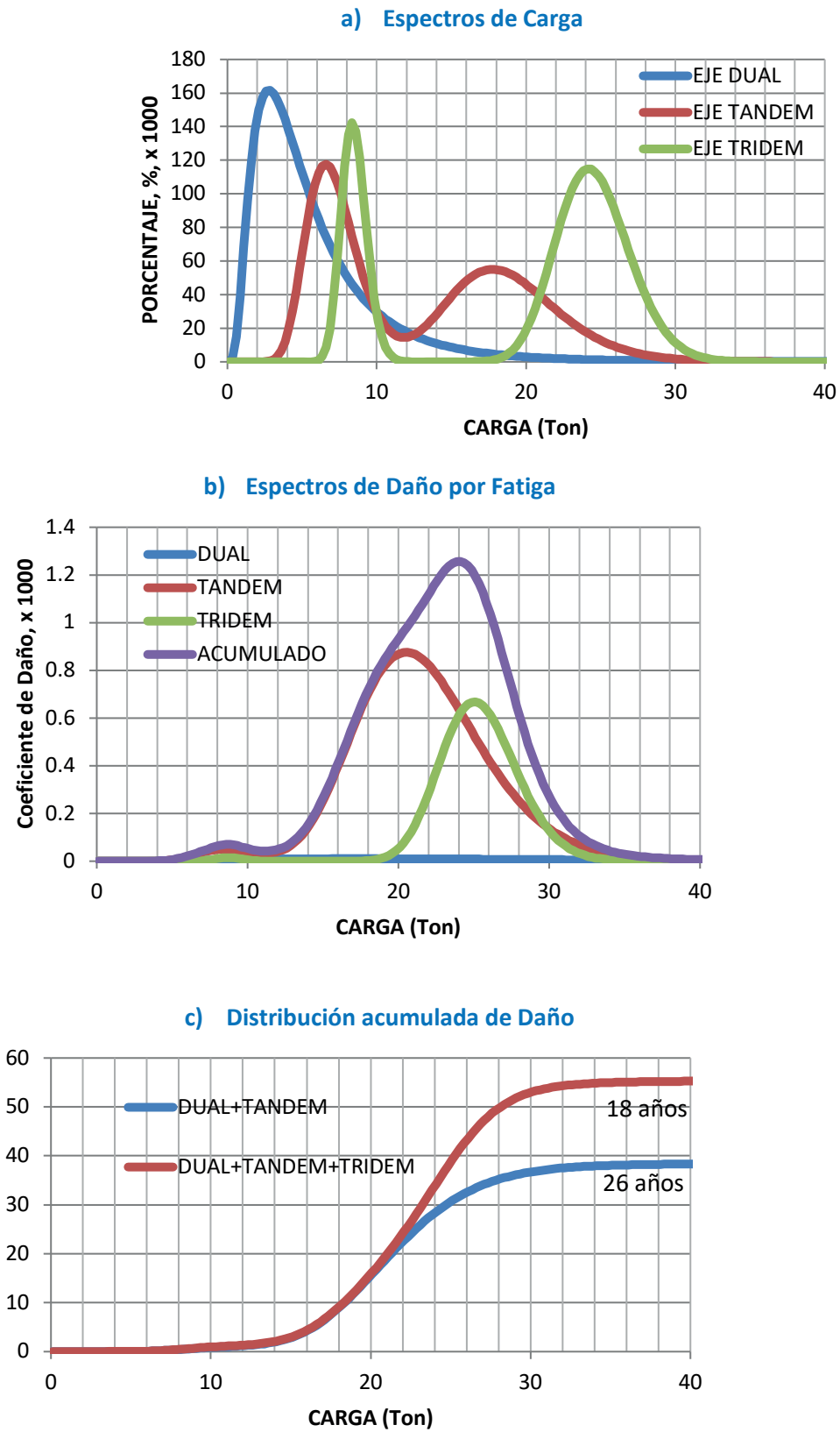
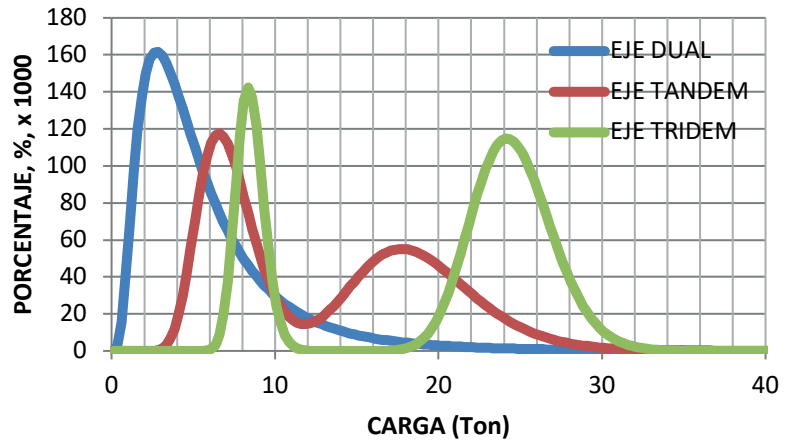
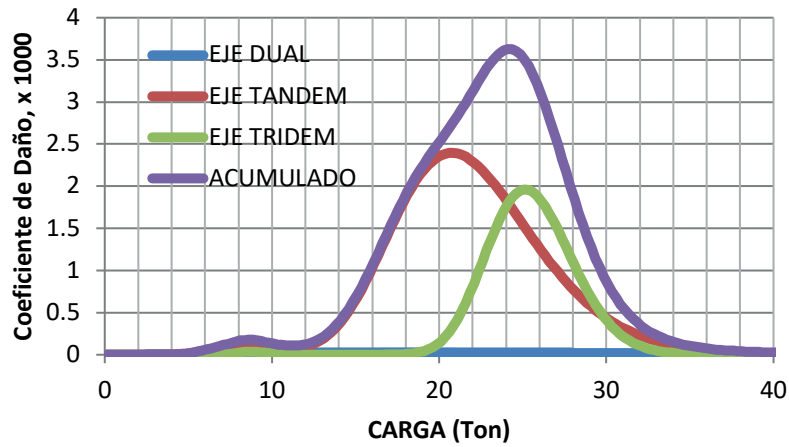


Figura 20. Espectros de Carga y Daño por Fatiga.

a) Espectros de Carga



b) Espectros de Daño por Fatiga



c) Distribución acumulada de Daño

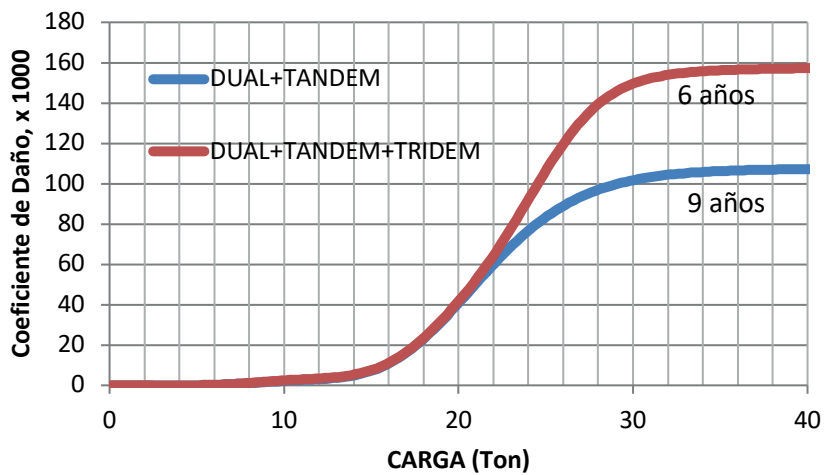


Figura 21. Espectros de Carga y Daño por Deformación Permanente.

La metodología propuesta en este trabajo permite también revisar la misma sección de análisis de pavimento para otros espectros de carga de diseño, representativos de otras regiones de país, o de la evolución económica esperada en una misma región o, incluso, del impacto que se tendría en el caso deseable que se cumpliera a cabalidad el reglamento de pesos y dimensiones de los vehículos de carga que circulan en las carreteras mexicanas.

En la Figura 22.a y 22.b se presentan los espectros de carga de diseño para los ejes tándem y Tridem en tres condiciones de carga diferentes. Para el eje sencillo dual, dada su poca relevancia en términos del daño inducido, se considero el mismo que el que se muestra en la Figura 20.a. Los espectros de daños correspondientes se muestran en la Figura 22.c, solo para el deterioro por deformación permanente de las capas diferentes.

De estos resultados puede resaltarse la ganancia en términos de vida útil del pavimento que se podría lograr con un adecuado control de cargas. También permite explicar el porqué de los severos deterioros que se observan en las carreteras con pavimentos asfálticos convencionales y base granular con ese orden de espesores y para las condiciones de carga reales en la actualidad.

Por supuesto que también se pueden buscar alternativas de estructuración de pavimentos que permitan la obtención de altos desempeños a pesar de los espectros de carga tan severos. Por ejemplo, la Figura 23 muestra los espectros de daño para una sección constituida ahora por una base estabilizada y una carpeta asfáltica construida con una mezcla asfáltica de módulo superior; los espesores y propiedades de tal alternativa se muestran en la Tabla 6. Los períodos de diseño deseados se logran con menores espesores de materiales de alto desempeño.

Capa	Espesor	Propiedad
Carpeta asfáltica de alto desempeño	10 cm	Módulo dinámico de 4,500 MPa
Base estabilizada	30 cm	Módulo elástico de 1500 MPa
Terracerías		Módulo resiliente de 100 MPa

Tabla 6. Espesores y propiedades de la sección de análisis. Pavimento asfáltico con base estabilizada.

Los ejemplos aquí mostrados consideran solo dos tipos de deterioro para fines ilustrativos. Cualquier otro tipo de deterioro se puede incorporar, en especial los relacionados con la evolución de características funcionales como lo son las roderas, la regularidad y la fricción, según lo que sea adecuado para cada tipo de red carretera en particular. Esto aplica por supuesto tanto a pavimentos asfálticos como de concreto hidráulico.

Se recomienda en especial, la determinación sistemática de los espectros de carga en carreteras, como algo que complete la información de calidad superficial y capacidad estructural que comúnmente se realiza en la actualidad para diseñar y evaluar pavimentos.

La determinación de esos espectros de carga es determinante para cualquier mejora sustancial de los procesos relacionados con el diseño, construcción, conservación y operación de las redes carreteras.

Desde un contexto de gestión de carreteras, los espectros de carga permitirán una evaluación más sólida de las distintas alternativas y estrategias de conservación que se deban considerar para lograr la minimización de costos en los análisis del ciclo de vida del pavimento, contribuyendo a una verdadera preservación del patrimonio carretero nacional.

La nueva generación de mexicanos, la que mira al nuevo milenio, ha aprendido a vivir en un mundo de cambios veloces, de relativa incertidumbre e inseguridad. El fenómeno afecta a todos, es nacional y también internacional.

Ahora que nos acercamos al Bicentenario de la Independencia y al Centenario de la Revolución, México se encuentra inserto en un proceso de transformaciones que no pueden ni deben detenerse, pero que deben encausarse.

Las carreteras no sólo son una vía para comunicar a México entre la frontera norte y la sur, entre el océano Pacífico y el Atlántico; son la vía para comunicar a los mexicanos entre regiones terriblemente desiguales. También son una vía para comunicar nuestro presente con el futuro del país.

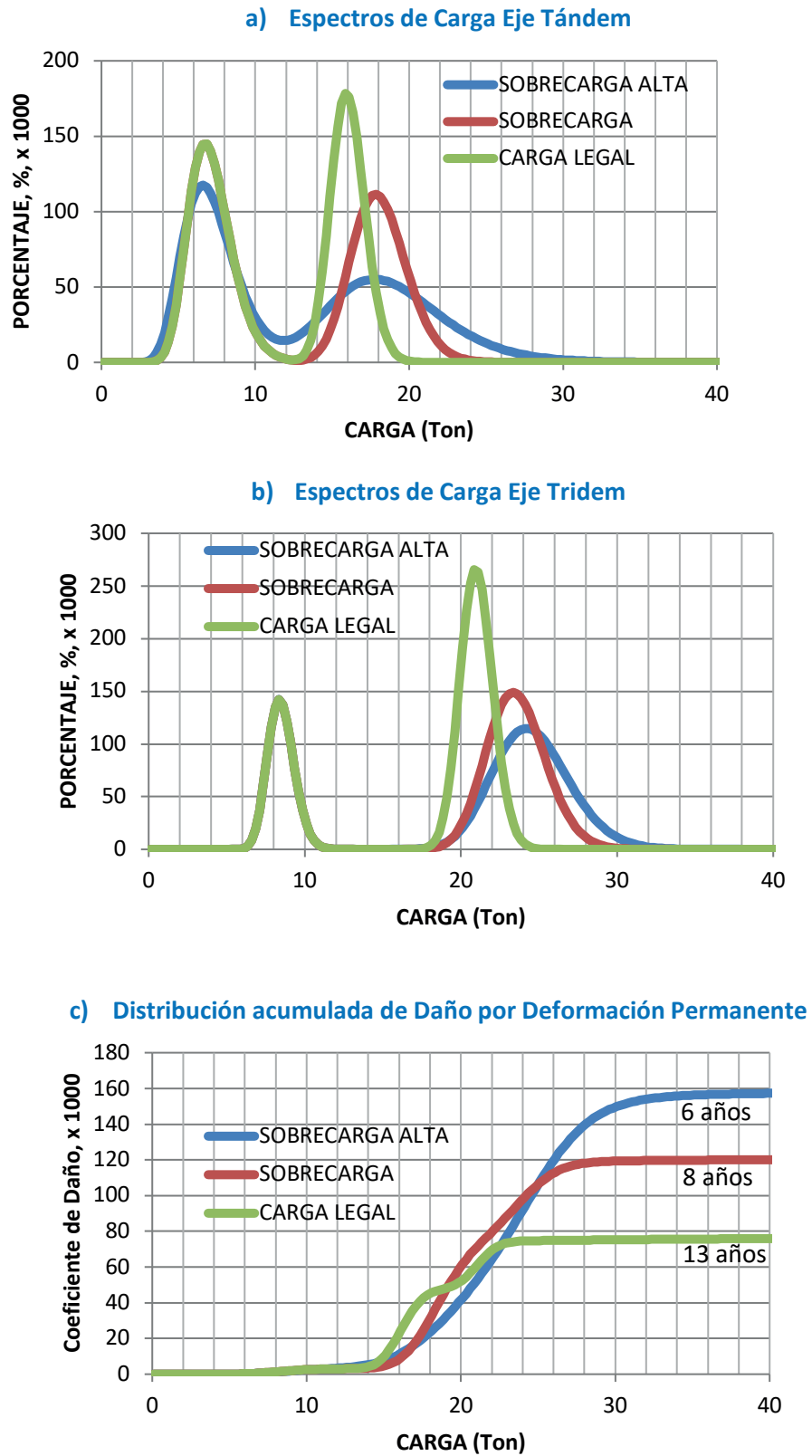


Figura 22. Espectros de Carga y Daño en Deformación Permanente para diferentes condiciones de carga.

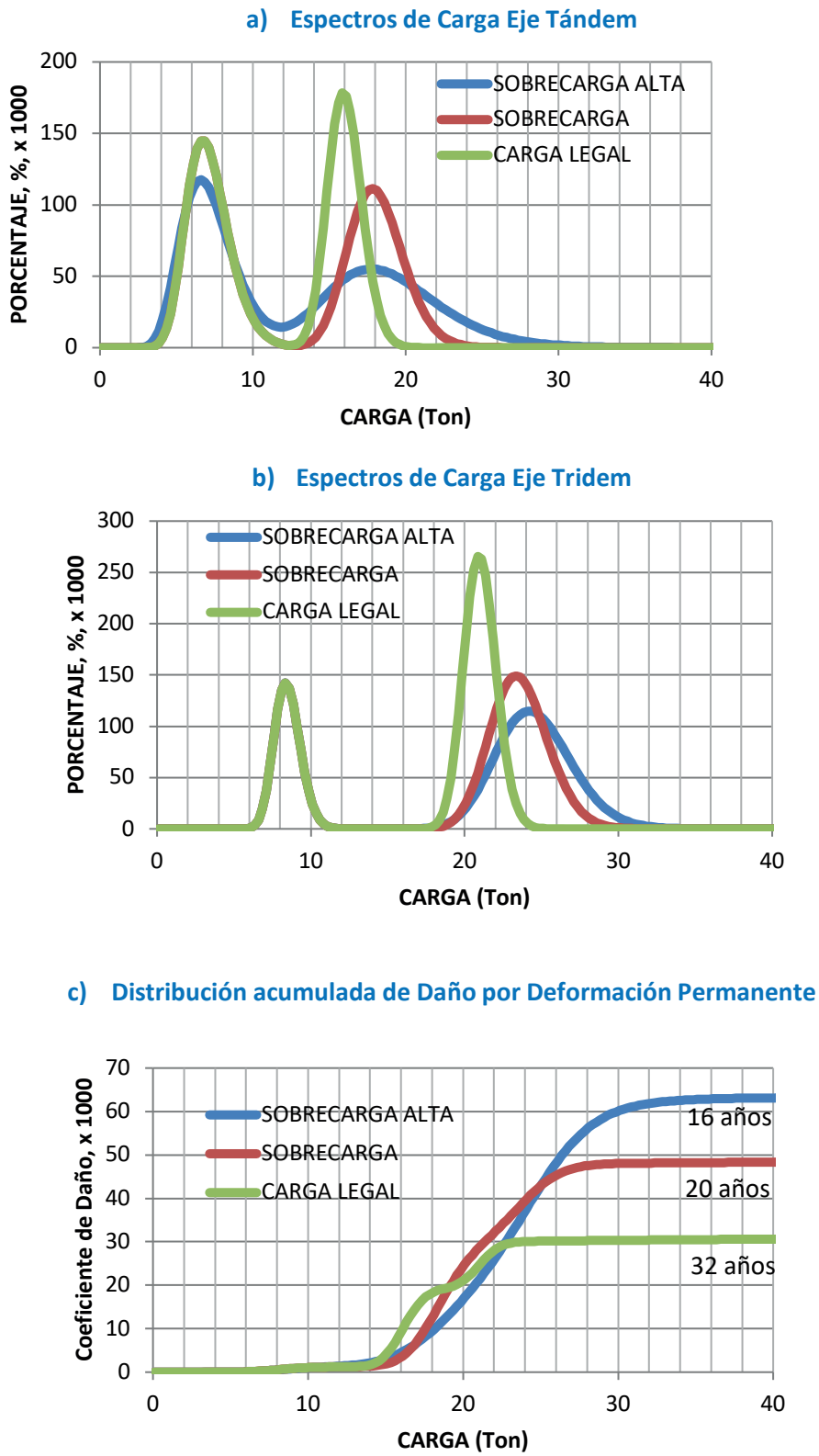


Figura 23. Espectros de Carga y Daño en Deformación Permanente para diferentes condiciones de carga.

4. Conclusiones

Se ha presentado en este trabajo una metodología para análisis y diseño de pavimentos que se considera mejor adaptada a las condiciones de carga en la red mexicana de carreteras.

La caracterización del tránsito vehicular a través de sus espectros de carga, permite el uso del conocimiento de la distribución de la carga real, en los distintos tipos de ejes de los vehículos, para valorar el daño que se puede presentar en una sección de pavimento.

Lo anterior es totalmente pertinente dado el hecho de que el espectro de carga se puede medir en campo, con tecnologías altamente confiables y sin costos excesivos.

Se propone que se haga una campaña de medición más intensa de espectros de carga, incluyéndolo como uno de los aspectos obligatorios que hay que medir en las evaluaciones superficiales y estructurales que comúnmente se hacen en los pavimentos. Es decir, además de medir regularidad, fricción, roderas, deflexiones, espesores con radar de penetración, obtención de corazones para ensayos especiales, etc., es imperativo medir el espectro de carga. Si el tránsito vehicular es uno de los factores más importantes en el diseño y rehabilitación de pavimentos, se impone medirlo en forma sistemática.

Además, se ha demostrado que hay una relación directa entre la forma del espectro de carga y la de su correspondiente espectro de daño, para cada tipo de deterioro. Esto induce a utilizar el espectro de carga como un indicador de la severidad del daño que se puede esperar en una vía, en especial en condiciones de sobrecarga. Esto es de singular importancia para los operadores privados de carreteras, en donde es necesario anticipar los montos de inversión necesarios para preservar la calidad exigida en términos de desempeño de una carretera.

La metodología fomenta el análisis claro y objetivo de los espectros de daño, que permiten al diseñador la definición clara de la contribución de cada configuración de los vehículos de carga presentes en una región en particular.

Su facilidad de programación, incluso con hojas de cálculo, deberá reducir la dependencia de programas de cómputo cerrados, que no permiten la adaptación de las metodologías de diseño a las condiciones específicas de una región o país.

5. Referencias bibliográficas

1. Rico Rodríguez A., (1998), *“Un enfoque personal del estado actual de la Mecánica de Suelos”*, Decimocuarta Conferencia Nabor Carrillo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
2. Rico A., Téllez R., Garnica P. (1998), *“Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodologías de diseño y tendencias”*, Publicación Técnica No. 104, Instituto Mexicano del Transporte.
3. Garnica P., Pérez N. (2001), *“Influencia de las condiciones de compactación en la deformación permanente de suelos cohesivos compactados”*, Publicación Técnica No. 165, Instituto Mexicano del Transporte.
4. Garnica P., Pérez A. (2002), *“Comportamiento de suelos arcillosos compactados adicionados con cloruro de sodio”*, Publicación Técnica 201, Instituto Mexicano del Transporte.
5. Garnica P., Gómez J.A. (2002), *“Mecánica de Materiales para Pavimentos”*, Publicación Técnica 197, Instituto Mexicano del Transporte.
6. Barrera M., Garnica P. (2002), *“Mecánica de suelos no saturados en vías terrestres”*, Publicación Técnica 198, Instituto Mexicano del Transporte.
7. Sánchez F., Garnica P. (2002) *“Metodología racional para el análisis de la densificación y resistencia de geomateriales compactados”*, Publicación Técnica 200, Instituto Mexicano del Transporte.
8. Garnica P., Gómez J.A., Delgado H. (2003), *“Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio”*, Publicación Técnica No. 228, Instituto Mexicano del Transporte.
9. Garnica P., Martínez I., Prado E., (2003), *“Algunos aspectos de la resistencia a la tensión y fatiga en suelos arcillosos estabilizados con cal”*, Publicación Técnica No. 230, Instituto Mexicano del Transporte
10. Barrera M., Garnica P., (2004) *Influencia de la succión en los cambios volumétricos de un suelo compactado*, Publicación Técnica No. 238

5. Referencias bibliográficas

11. Garnica P., Delgado H., (2004) “Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas”, *Publicación Técnica No. 246*
12. Garnica P., Delgado H., (2004) “Análisis de la influencia del método de compactación en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas”, *Publicación Técnica No. 255*.
13. Garnica P., Delgado H. (2004) “Comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con SBR”, *Publicación Técnica No. 254*.
14. Pérez A., Garnica P, (2004) “Uso y calibración de deflectómetros de impacto en la evaluación estructural de carreteras”, *Publicación Técnica No. 252*
15. Garnica P., Correa A. (2004) “Conceptos mecanicistas en pavimentos”, *Publicación Técnica No. 258*
16. Garnica P., Gómez J.A. (2004) “Módulos de resiliencia en agregados provenientes de rocas altamente intemperizadas”, *Publicación Técnica No. 256*.
17. Garnica P., Delgado H (2005) “Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para diseño de mezclas asfálticas”, *Publicación Técnica 271*.
18. Garnica P., Delgado H., (2008), “Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas”, *Publicación Técnica No. 272*
19. Garnica P., Delgado H., (2008), “Nuevo paradigma para el diseño de mezclas asfálticas”, *Revista Asfáltica, Número 12*.
20. Huang Y.H., (2004), “*Pavement Analysis and Design*”, Ed, Prentice Hall.
21. Ullidtz P., (1998), “*Modelling Flexible Pavement Response and Performance*”.