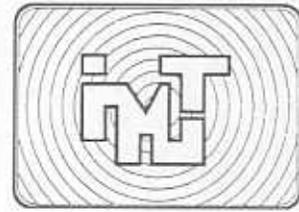
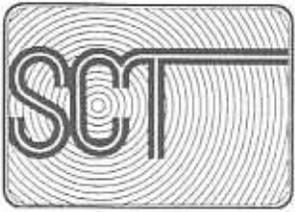


ISSN 0188-7297



---

# **ANALISIS NORMATIVO Y ESTADISTICO DE CARGAS VIVAS EN PUENTES EN MEXICO**

**Instituto Mexicano del Transporte**  
**Secretaría de Comunicaciones y Transportes**

**Publicación Técnica No. 97**  
**Sanfandila, Qro. 1997**

---

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE  
SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

**Análisis Normativo y Estadístico de  
Cargas Vivas en Puentes en México**

Publicación Técnica No. 97  
Sanfandila, Qro. 1997

---



Este trabajo fue desarrollado en la Coordinación de Desarrollo Tecnológico del Instituto Mexicano del Transporte, por Octavio A. Rascón Chávez, Coordinador de Desarrollo Tecnológico, Miguel Barousse Moreno, Jefe de la División de Informática, y Gabriel Ventura Suárez, Investigador Titular.



# Indice

---

	Pág.
Resumen	I
Summary	II
Resumen Ejecutivo	i
1. Introducción	1
2. Reglamento Canadiense OHBDC	5
2.1 Introducción	5
2.2 Cargas vivas para diseño	6
2.3 Efectos dinámicos	10
2.4 Fuerza centrífuga	10
2.5 Fuerzas de frenado	11
2.6 Factores de carga	11
2.7 Análisis simplificado de la superestructura	13
2.8 Criterios de evaluación	16
2.9 Resumen de cláusulas remitidas del "OHBDC"	26
3. Reglamento AASHTO 1993 (no vigente)	27
3.1 Carga viva	27
3.2 Factor de impacto	31
3.3 Combinaciones de cargas	31
3.4 Análisis de la superestructura	34
4. Reglamento AASHTO 1994	37
4.1 Introducción	37
4.2 Lineamientos generales para revisión y prediseño	40
4.3 Factores de carga	42
4.4 Carga viva	45
4.5 Carga dinámica permisible IM	49
4.6 Otro tipo de cargas	50
4.7 Análisis de la superestructura	50

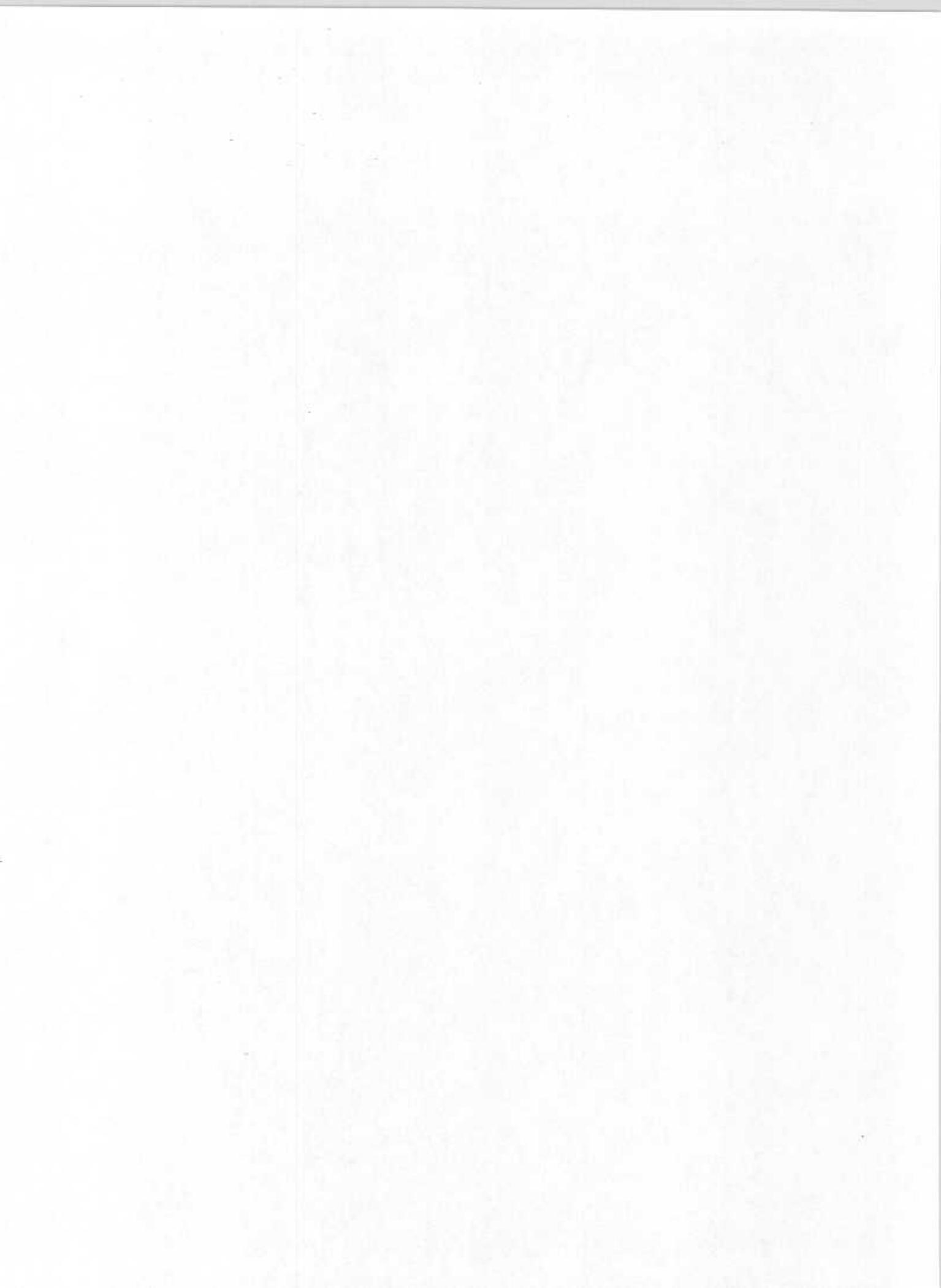
<b>5.</b>	<b>Reglamento Eurocódigo</b>	<b>55</b>
	5.1 Introducción	55
	5.2 Clasificación de acciones	55
	5.3 Valores característicos de las cargas verticales	57
	5.4 Modelo de carga 1	58
	5.5 Modelo de carga 2	61
<b>6.</b>	<b>Reglamento de pesos y dimensiones de México</b>	<b>63</b>
<b>7.</b>	<b>Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes</b>	<b>67</b>
	7.1 Introducción	67
	7.2 Número total de vehículos considerados	69
	7.3 Pesos brutos vehiculares	70
	7.4 Cargas por eje	75
	7.5 Longitud total entre ejes	89
	7.6 Longitud entre ejes	94
	7.7 Momentos y cortantes máximos	105
<b>8.</b>	<b>Análisis de elementos mecánicos</b>	<b>129</b>
	8.1 Elementos mecánicos calculados usando el reglamento de Ontario	129
	8.2 Elementos mecánicos calculados usando el reglamento AASHTO	130
	8.3 Elementos mecánicos calculados usando Pesos y Dimensiones reglamentarios de México	133
	8.4 Elementos mecánicos calculados usando el Eurocódigo	135
	8.5 Comparación de elementos mecánicos provocados por las cargas del OHBDC, AASHTO y Pesos y Dimensiones de México	136
<b>9.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>147</b>
	9.1 Conclusiones	147

9.2 Recomendaciones

149

10. Bibliografía

151



# **Resumen**

---

En este estudio se da el primer paso en el IMT para generar resultados y recomendaciones sobre cargas vivas, que sean útiles para elaborar, en el futuro, un reglamento mexicano para analizar y diseñar los puentes carreteros desde el punto de vista estructural.

Como parte del trabajo, se presenta un análisis de los capítulos de cargas vivas de diversos reglamentos que al respecto existen en el extranjero, así como de las normas mexicanas vigentes sobre pesos y dimensiones. Con fines comparativos, se calculan los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos que producen las cargas vivas o vehiculares indicadas en cada uno de estos códigos, en puentes de un solo claro, simplemente apoyados y con diversas longitudes.

Asimismo, se calculan los elementos mecánicos máximos antes señalados, que produce cada vehículo de carga que se tiene registrado en una muestra, constituida por los pesos y dimensiones captados en un proceso de pesaje y medición, que fue realizado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes durante 1993, en 15 puntos carreteros del país. Además, se hacen análisis estadísticos de los resultados obtenidos, así como de los datos básicos de pesos brutos, distancias entre ejes y pesos por eje de todos los vehículos de la muestra, ya que estas tres variables influyen directamente en los momentos flexionantes y en las fuerzas cortantes.

Finalmente, se realizan comparaciones entre todos los resultados obtenidos y se emite una serie de conclusiones y recomendaciones acerca de las carga vivas para puentes en México .



# *Summary*

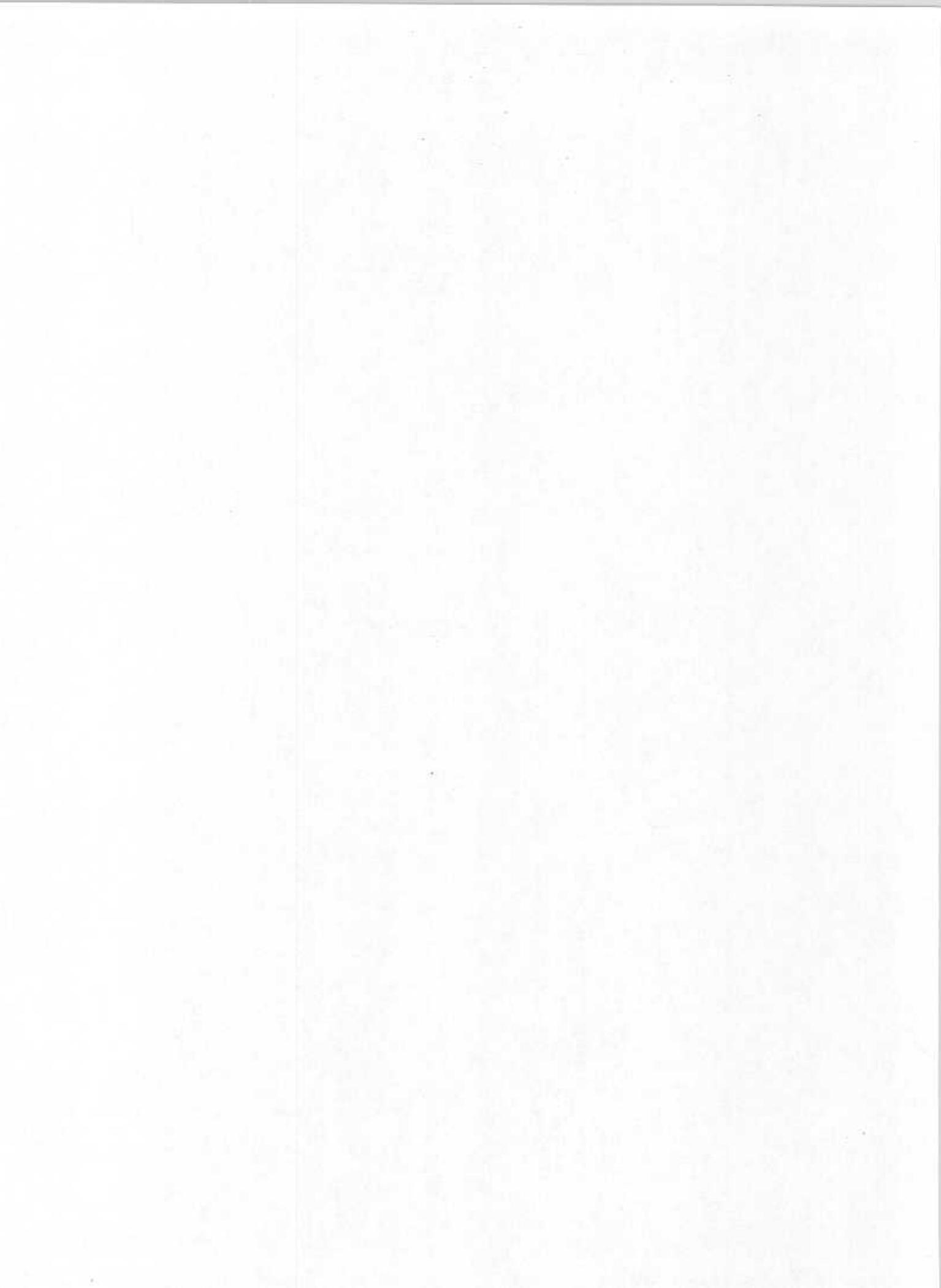
---

This study is the first step for the Mexican Transportation Institute to produce results and recommendations about live-loads at bridges, that will be useful for further establishment of Mexican regulations and policies for analysis and design of roadway bridges, from structural engineering point of view.

As part of this work, several analysis of the live loads specified in the existing codes and regulations in foreign countries are done, as well as in the one about weights and dimensions of vehicles in Mexico. For making comparisons, maximum bending moments and shear forces are computed, produced by the live-loads or vehicles established at the aforesaid different codes, at single-supported one-span-bridges with different total span.

Furthermore, we evaluate the aforesaid mechanical elements produced by each one of the heavy vehicles, with weights and lengths corresponding to a random sample obtained by the Ministry of Communications and Transportation, in 1993, in 15 road points in the country . Also, statistical analysis with the obtained results, as well as with the basic data on total vehicle weight, axes distances and weights per axis are done, because these three variables have great influence into the bending moments and shear forces.

Finally, comparisons between the obtained results are done and conclusions and recommendations about live-loads at bridges in Mexico are proposed.



# ***Resumen ejecutivo***

---

## **Resumen ejecutivo**

El presente trabajo constituye el primer paso que se da en el IMT, con el fin de generar resultados y recomendaciones sobre cargas vivas, útiles para que en el futuro se elabore un reglamento mexicano para análisis y diseño estructural de puentes.

Los objetivos generales del estudio son :

- 1.- Analizar las disposiciones que se dan, en materia de cargas vivas, en diversos reglamentos del extranjero, sobre análisis y diseño estructural de puentes, y calcular los efectos que éstas producen en puentes de un solo claro, simplemente apoyados y de diversas longitudes.
- 2.- Determinar los efectos que producen en dichos puentes, los vehículos con los pesos y dimensiones especificados en el respectivo reglamento mexicano, considerando a éstos como cargas vivas.
- 3.- Determinar los elementos mecánicos ( momentos flexionantes y fuerzas cortantes ) que producen en los mismos puentes, los 70,267 vehículos cargados, con los pesos y dimensiones obtenidos en los procesos de muestreo realizados por la SCT en 1993, en diversos puntos carreteros del país, para realizar análisis estadísticos, tanto de los resultados, como de los datos básicos utilizados sobre pesos brutos vehiculares, pesos por eje y separación entre cada dos ejes consecutivos, por ser éstas las variables fundamentales.
- 4.- Hacer estudios comparativos entre los resultados de los casos anteriores, y generar conclusiones útiles para el propósito de este trabajo.
- 5.- Generar una serie inicial de recomendaciones para enfocar los futuros estudios que se hagan al respecto.

Como parte de este estudio, se realiza el análisis de algunos reglamentos extranjeros sobre puentes, tales como el norteamericano AASHTO, el de la provincia canadiense de Ontario, OHBDC, y el proyecto de reglamento de la comunidad europea, llamado Eurocódigo. También se estudia el reglamento de pesos y dimensiones de México que, si bien es cierto, no es un reglamento para puentes, brinda información relativa a las cargas vivas que se autorizan en los vehículos que circulan por las carreteras del país.

El reglamento OHBDC es muy completo y de fácil lectura, y brinda criterios muy actuales de fatiga y de restructuración. Presenta diferentes modelos de cargas vivas, tanto como para diseño como para revisión.

Por muchos años, el reglamento AASHTO conservó su filosofía de diseño y análisis basado en esfuerzos permisibles, los cuales se consideraban como fracciones de la resistencia máxima o de la resistencia de fluencia; fue muy usado por los calculistas mexicanos durante los últimos treinta años, hasta 1994, cuando aparece la última versión con grandes cambios, entre los que destaca el método de "Diseño Basado en Factores de Carga y Resistencia", y la definición de estados límites, englobando la resistencia, fatiga, fractura y serviciabilidad.

También se estudian el antiguo reglamento AASHTO, debido a que por muchos años rigió el criterio de análisis y diseño, así como el que apareció en 1993 y estuvo vigente por un solo año.

El Eurocódigo todavía no es aplicado como reglamento oficial y, seguramente, por tenerse que usar en diferentes naciones, es muy conservador. Sus cargas vivas tienen valores grandes, pero son de fácil análisis.

El reglamento mexicano de "pesos y dimensiones" tiene por objeto regular el peso, dimensiones y capacidad a que se deben de sujetar los vehículos de autotransporte de pasajeros, de turismo y de carga que transiten en los caminos de jurisdicción federal. Apareció publicado en el Diario Oficial el 4 de septiembre de 1995.

En el trabajo se presentan resultados de simulaciones numéricas, en puentes tipo de un solo claro y libremente apoyados, para calcular los elementos mecánicos de fuerzas cortantes y momentos flexionantes máximos, que ocasionan las cargas vivas indicadas en los reglamentos analizados, así como por el paso de cada uno de los vehículos con los pesos y dimensiones registrados en la muestra de 1993.

Se hacen comparaciones de los elementos mecánicos máximos obtenidos al aplicar los reglamentos antes señalados, que sirven para dar una primera idea de cómo se podrían establecer las cargas vivas reglamentarias para la república mexicana, y extraer algunas conclusiones y recomendaciones, destacando las siguientes:

## Conclusiones

1. El concepto de vehículo virtual (nocional) que introducen los reglamentos del AASHTO94 y el Eurocódigo es importante, aunque no nuevo, ya que los vehículos propuestos por versiones anteriores de los reglamentos AASHTO, manejaban cargas puntuales y uniformes, no reales, para representar situaciones de tráfico. Sin embargo, este concepto, ahora más reforzado, pretende lograr un manejo más realista de las cargas vivas para cubrir situaciones de tráfico específicas.
2. Con respecto a los reglamentos de puentes analizados, el de Ontario es exhaustivo y de fácil uso, y contiene muchas figuras que aclaran el tema de análisis.

El reglamento unificado europeo es el más conservador y el más resumido.

El nuevo reglamento norteamericano es más conservador que el antiguo; aunque en puentes con claros cortos, menores de 25 m, los elementos mecánicos que producen se parecen mucho entre sí; además, es difícil de usar, debido a que algunos temas específicos se abordan en

varios capítulos y hay que remitirse a todos para no caer en alguna omisión.

En cuanto al desarrollo de temas, el de Ontario y el HL-93 pueden servir de base para un reglamento mexicano para análisis y diseño estructural de puentes.

3. Con relación al momento flexionante, en los reglamentos nuevos, en general se observan incrementos en la magnitud de los momentos que producen los modelos de cargas vivas propuestos. Por ejemplo, si comparamos el efecto de los reglamentos AASHTO94, OHBDC y el Eurocódigo, se observa que producen momentos flexionantes, con respecto al reglamento anterior del AASHTO, del orden de 1.24, 1.34 y 1.67 veces mayores, respectivamente. Situación similar ocurre respecto a los cortantes, en los que las relaciones son de 1.15, 1.03 y 1.51 veces, respectivamente.
4. Analizando los momentos obtenidos con el tráfico real de la muestra, se observa, en los valores de los elementos mecánicos, que los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4 son los que presentan porcentajes de excedencia mayores. Por ejemplo (tabla 7.4, pag. 112), para el T3-S3 y claro de 15 m, se tiene, con respecto al vehículo HS20-44, que la excedencia en los momentos flexionantes es del 171.0 %, con relación al reglamento de Ontario es de 68.0 %, y con respecto al vehículo HL-93 es 72.0 %. En estos porcentajes no se están considerando factores de carga.
5. Con relación a los cortantes obtenidos del tráfico real, y el mismo caso anterior, los porcentajes de excedencia son los siguientes: con respecto al HS20-44 es 184.0%, con el de Ontario, es 85.0%, y con el HL-93, es 85.0%.
6. Para hacer una comparación más real y detallada, es necesario involucrar a los factores de carga, de impacto y de resistencia, no sólo en los sistemas de carga reglamentarios como aquí se hizo, sino también en los vehículos reales para los cuales aún no se han definido valores.

7. En el análisis estadístico de los elementos mecánicos calculados con los pesos y dimensiones de la muestra del año 1993, se puede ver que para claros menores a 30 m, el vehículo que produce los efectos más desfavorables es el T3-S3, y para puentes con claros mayores es el T3-S2-R4.
8. Otro aspecto importante es el relacionado con los porcentajes de vehículos que exceden los pesos totales autorizados. El vehículo que va más excedido es el T3-S3, con un 51.91 % respecto al peso bruto vehicular autorizado; le sigue el T3-S2-R4, con 49.84 % de excedencia.

## Recomendaciones

- 1.- Es importante tener en cuenta, para fines de autorizar incrementos en los pesos y dimensiones de los vehículos, que se deben considerar tanto los daños a los pavimentos, como también a los puentes, ya que como se vio en algunos de los resultados de este trabajo, las cargas actuantes están induciendo momentos flexionantes y fuerzas cortantes que, una vez incluidos los factores de carga y de impacto, podrían estar por encima de los previstos en los diseños originales de los puentes.
- 2.- Se recomienda continuar realizando estudios y análisis utilizando información estadística, con el fin de conocer mejor las cargas y dimensiones vehiculares mexicanas, así como sus posibles efectos en puentes de diversos tipos y estructuraciones, con el fin de estar en posibilidades de hacer propuestas de modelos de cargas vivas realistas para México. Actualmente se cuenta con datos para los años 1994, 1995 y 1996, los cuales serán utilizados de inmediato para dichos fines. En estos nuevos estudios deberán considerarse puentes continuos y secuencias de vehículos.

- 3.- Se recomienda continuar obteniendo datos sobre pesos y dimensiones de vehículos, ya que éstos serán muy valiosos para mantener una línea de estudio sobre el efecto de las cargas vivas en los puentes. Es recomendable que se incorporen, para esto, pesadoras con tecnología más nueva y de mayor exactitud.
- 4.- Formular e implantar, en su momento, en el reglamento mexicano para análisis y diseño estructural de puentes, una carga uniformemente repartida, ya que, como se observó en la vieja versión del AASHTO, para claros mayores a los 35 m, prevalece esta carga sobre la del camión con "peso bruto vehicular" máximo. La condición de carga uniformemente repartida corresponde a secuencias de vehículos, uno después de otro, a lo largo del puente; para definir esto, se harán los estudios correspondientes. También es importante tomar en cuenta el énfasis del Eurocódigo y de la nueva versión del AASHTO, por usar el concepto de carga vehicular virtual.
- 5.- Realizar estudios de tipo probabilístico para generar, analizar y proponer modelos de cargas vivas para análisis y diseño estructural de puentes, con base en análisis de riesgos de excedencia.
- 6.- Realizar simulaciones del tipo Montecarlo, con el fin de estudiar, mediante métodos de procesos estocásticos, los efectos de la ocurrencia simultánea de vehículos, en diferentes carriles y en diferentes posiciones en cada carril.

# ***1. Introducción***

---

En las carreteras federales mexicanas, según último censo del SIPUMEX<sup>1</sup>, en 1995 se tenían 6,324 puentes, con una longitud total de 214,638 m, distribuidos de la siguiente manera: 150 con superestructura de acero, 4,843 de concreto reforzado, 518 puentes mixtos (concreto reforzado y acero), 654 de concreto presforzado, 60 puentes de estructura espacial (tridilosa) y 99 de mampostería. Además, en las carreteras concesionadas, hasta 1995 se tenían cerca de 2,000 puentes.

De todos éstos, buena parte fueron diseñados con las cargas correspondientes al vehículo H-15, definido por versiones ya no vigentes del reglamento AASHTO<sup>2</sup>, que consideraban un peso bruto vehicular de 13.7 ton (cargas de 2.7 ton para el eje delantero y 11.0 ton para el eje trasero), el que, como veremos en el desarrollo de este trabajo, ha sido superado por las cargas que producen algunos vehículos que circulan por nuestros puentes; por ejemplo, un camión T3-S3 tiene un peso bruto vehicular reglamentario de 48.5 ton (cargas por eje de 6.5 ton, 19.5 ton y 22.5 ton), agravándose la situación por el hecho de que muchos de los vehículos circulan sobrecargados.

Ante tales escenarios, es evidente la necesidad de diagnosticar el estado de los puentes, utilizando cargas actualizadas de revisión y diseño, implantar sistemas de inspección, mantenimiento y rehabilitación, y generar criterios de diseño para los que se construyan en el futuro en México.

Algunos reglamentos utilizan como vehículo de diseño, uno cuyo peso es el máximo característico del parque vehicular del país correspondiente. Para considerar la respuesta dinámica del vehículo y del puente, los efectos estáticos se multiplican por un factor de impacto, y la simultaneidad de cargas se toma en cuenta al poner varios vehículos o cargas uniformes actuando sobre el puente.

---

<sup>1</sup> SIPUMEX son las siglas de "Sistema de Puentes de México", sistema de administración de puentes instalado por la Dirección General de Conservación de la SCT.

<sup>2</sup> AASHTO son las siglas en inglés de la "American Association Standards Highway Transportation Officials".

Otros reglamentos más recientes ( refs. 1 y 2) introducen el concepto de "carga viva vehicular virtual"<sup>3</sup>, que no pretende representar un vehículo en particular, sino las cargas equivalentes a situaciones de tráfico reales con vehículos de todos los tipos, incluyendo sobrecargas y cargas especiales, las cuales se determinan con base en "espectros de carga".

En el caso de México aún no existe un reglamento propio para el diseño y revisión de puentes, por lo que, en este trabajo, se analizarán los efectos que producen, en puentes idealizados, algunos vehículos que se encuentran caracterizados en el Reglamento de Pesos y Dimensiones de México (ref. 4), y compararlos con los que resulten de utilizar los criterios estipulados en los reglamentos de EEUU, Ontario (Canadá) y Eurocódigo. Esto servirá después para proponer las sollicitaciones que se consideren adecuadas en el diseño de los puentes mexicanos.

Con base en este panorama, en la presente investigación se realiza un análisis estadístico de la información existente en las bases de datos del estudio de "pesos y dimensiones", para determinar cuáles son las distribuciones de frecuencias de las cargas y dimensiones entre ejes de los vehículos de carga y pasaje que circulan en México. Asimismo, se hace una comparación de diversos efectos que producen, en puentes tipo simplemente apoyados, las cargas reglamentarias de AASHTO, del OHBDC (ref. 5), del Eurocódigo y del Reglamento de Pesos y Dimensiones de México.

La metodología de trabajo es la siguiente: en la primera parte del trabajo, se analizan los diferentes tipos de vehículos y criterios para carga viva que están estipulados en los reglamentos de Estados Unidos, Ontario y Eurocódigo, así como los vehículos estipulados en el Reglamento de Pesos y Dimensiones de México. Posteriormente se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos de pesos y dimensiones captados en 1993, en diferentes carreteras federales de México.

---

<sup>3</sup> El término de "carga viva vehicular virtual" es equivalente al término en inglés de "notional load".

<sup>4</sup> Reglamento de Pesos y Dimensiones , norma mexicana publicada en el Diario Oficial de la Federación el 4 de septiembre de 1995.

<sup>5</sup> OHBDC son las siglas en inglés de "Ontario Highway Bridge Design Code".

En la última parte del trabajo se hace una comparación de los efectos que producen las diferentes cargas vivas estipuladas en los reglamentos, incluyendo los vehículos definidos en el de "pesos y dimensiones" de México. En estos análisis se utilizan puentes simplemente apoyados de un claro, para desacoplar el parámetro "EI" -módulo de Young por momento de inercia-, y un programa elaborado exprofeso para obtener los valores máximos, tanto de cortantes como de momentos flexionantes.

En resumen, los objetivos de este trabajo son:

- 1.- Analizar las disposiciones que se dan, en materia de cargas vivas, en diversos reglamentos del extranjero, sobre análisis y diseño estructural de puentes, y calcular los efectos que éstas producen en puentes de un solo claro, simplemente apoyados y de diversas longitudes.
- 2.- Determinar los efectos que producen en dichos puentes, los vehículos con los pesos y dimensiones especificados en el respectivo reglamento mexicano, considerando a éstos como cargas vivas.
- 3.- Determinar los elementos mecánicos ( momentos flexionantes y fuerzas cortantes ) que producen en los mismos puentes, los 70,267 vehículos cargados, con los pesos y dimensiones obtenidos en los procesos de muestreo realizados por la SCT en 1993, en diversos puntos carreteros del país, para realizar análisis estadísticos, tanto de los resultados, como de los datos básicos utilizados sobre pesos brutos vehiculares, pesos por eje y separación entre cada dos ejes consecutivos, por ser éstas las variables fundamentales.
- 4.- Hacer estudios comparativos entre los resultados de los casos anteriores, y generar conclusiones útiles para el propósito de este trabajo.
- 5.- Generar una serie inicial de recomendaciones para enfocar los futuros estudios que se hagan al respecto.



## 2. Reglamento canadiense OHBDC

### 2.1. Introducción

En esta parte se incluyen los aspectos de carga viva que están definidos en el reglamento OHBDC (ref. 5), el cual fue emitido en el año de 1991 y está basado en la teoría de diseño de estados límites, en la cual se manejan estados últimos de resistencia, factores de resistencia y factores de carga. Se incluyen estados límites de servicio y fatiga, además de los de resistencia. En este reglamento se incluye también una sección para puentes existentes, en la que se dan valores para el diseño de rehabilitaciones, considerando niveles de deterioro del puente.

Para definir las cargas vivas que actúan en el puente, este reglamento estipula diferentes valores, según sea la importancia del camino en el que se ubique el puente; dicha clasificación se muestra en la tabla 2.1, en la cual "ADT" es el volumen de tráfico total diario, y "ADTT" es el volumen de tráfico de camiones diario.

**Tabla 2.1. CLASIFICACIÓN DE CARRETERAS EN CANADÁ.**

ADT/carril	ADTT/carril	CLASE DE CAMINO
> 4000	> 1000	A
> 1000 ≤ 4000	> 250 ≤ 1000	B
> 100 ≤ 1000	> 50 ≤ 250	C1
≤ 100	≤ 50	C2

Fuente: Ontario Highway Bridge Design Code. Tercera edición, 1991.

El capítulo 2 del reglamento canadiense está dedicado a la definición de las cargas que actúan sobre el puente, se incluyen criterios para carga muerta, carga viva y otros factores como viento, sismo, presfuerzo y asentamientos diferenciales.

## 2.2. Cargas vivas para diseño

El reglamento OHBDC ofrece dos opciones para considerar las cargas vivas en el diseño; la primera consiste en aplicar las cargas (por eje) de un vehículo de cinco ejes, y la segunda, una carga uniformemente distribuida en un ancho de 3 metros, de 10 kN/m, más la primera carga reducida en un 30%; las figuras 2.1 y 2.2 muestran las cargas correspondientes a cada opción, respectivamente.

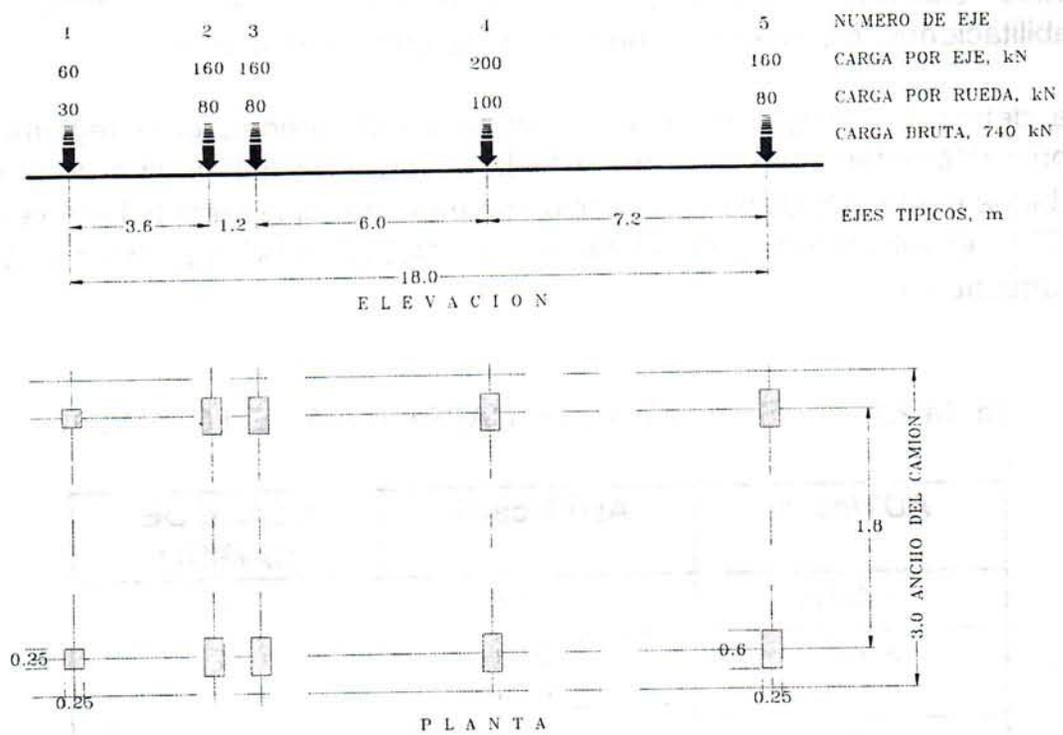


Figura. 2.1. Carga del vehículo idealizado correspondiente a la primera opción de carga

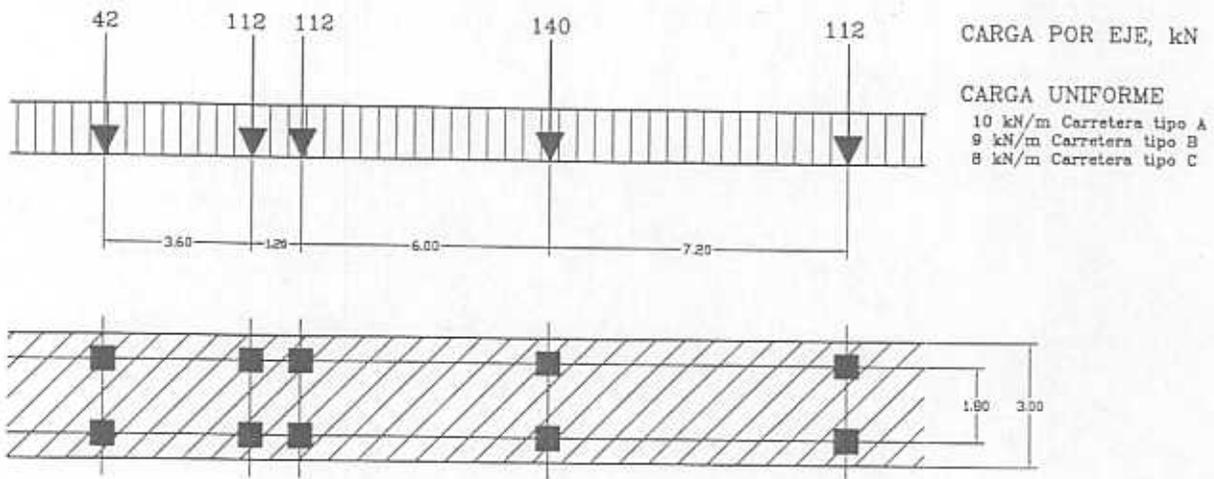


Figura 2.2. Carga uniforme correspondiente a la segunda opción de carga

El ancho para colocar la carga, es función del ancho de la superficie de rodamiento y del número de carriles, como se muestra en la ecuación 2.1:

$$W_e = \frac{W_c}{n} \quad (2.1)$$

donde:

$W_e$  = es el ancho de la carga.

$W_c$  = ancho de la superficie de rodamiento.

$n$  = número de carriles de carga; este valor se consigna en la tabla 2.2

**Tabla 2.2. NÚMERO DE CARRILES PARA EL DISEÑO DE PUENTE.**

Wc, ANCHO DE LA SUPERFICIE DE RODAMIENTO (m.)	NÚMERO DE CARRILES
6.0 o menos	1
de 6.0 a 10.0	2
de 10.0 a 13.5	3
de 13.5 a 17.0	4
de 17.0 a 20.5	5
de 20.5 a 24.0	6
de 24.0 a 27.5	7
mayor a 27.5	8

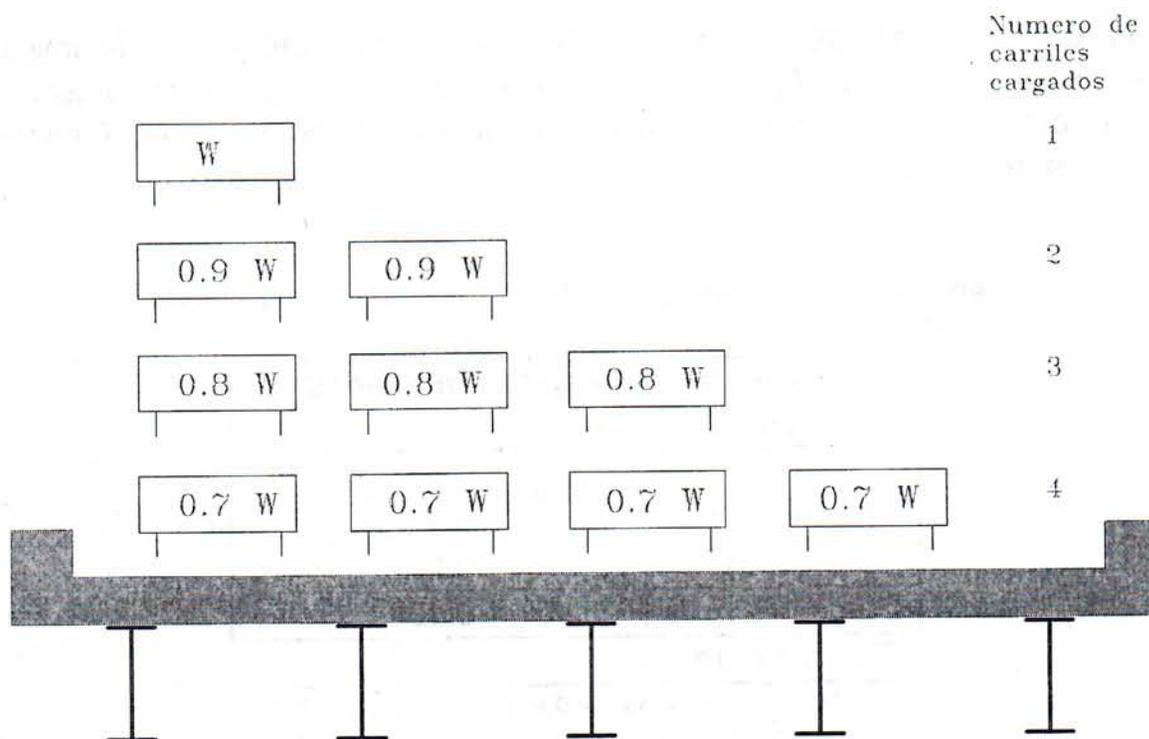
Fuente: Ontario Highway Bridge Design Code. Tercera edición. 1991.

En el cálculo de efectos máximos, se debe escoger el sistema de carga (camión de cinco ejes o carga uniformemente distribuida más 70% del camión de 5 ejes) que provoque los efectos más desfavorables. Cuando por el ancho de la superestructura se requiera utilizar más de un carril, se podrán realizar las reducciones que se muestran en la tabla 2.3 o en la figura 2.3.

**Tabla 2.3. FACTOR DE MODIFICACIÓN POR MULTIPLICIDAD DE CARRILES CARGADOS.**

NÚMERO DE CARRILES CARGADOS	FACTOR DE MODIFICACIÓN
1	1.00
2	0.90
3	0.80
4	0.70
5	0.60
6 o más	0.55

Fuente: Ontario Highway Bridge Design Code. Tercera edición. 1991.



**Figura 2.3.** Factores de reducción de carga viva por la existencia de más de un carril de circulación

Para la revisión por estados límites de fatiga, el reglamento indica que se debe utilizar un solo vehículo de diseño (no la carga uniforme), colocarlo al centro del carril de carga y aplicarlo a un solo carril.

Para efectos locales, el reglamento especifica una carga que se llama "carga de rueda", la cual se debe utilizar para elementos aislados, tomando la carga del segundo o tercer eje de la alternativa de cargas de diseño.

El reglamento maneja también cargas vivas para puentes peatonales y para puentes en obra negra o en rehabilitación; además, considera la fuerza de frenado y, para el caso de puentes curvos, la fuerza centrífuga.

## 2.3 Efectos dinámicos

Las cargas vivas deben incrementarse, por su naturaleza dinámica, multiplicándolas por un factor llamado de impacto. Este reglamento presenta los valores, para el factor de impacto, mostrados en la tabla 2.4, en términos del número de ejes.

Tabla 2.4. FACTOR DE IMPACTO O AMPLIFICACIÓN

Número de ejes	FACTOR DE IMPACTO
1	0.40
2	0.40
3 o más	0.25
Carga uniforme	0.10
Tierra armada	0.40

Fuente: Ontario Highway Bridge Design Code. Tercera edición. 1991.

## 2.4 Fuerza centrífuga

Para el caso de puentes curvos, la fuerza centrífuga horizontal, se calcula multiplicando la carga viva (vehículo con cargas puntuales) sin factor de impacto, por el valor dado en la expresión 2.2.

$$\frac{V^2}{127r} \quad (2.2)$$

donde:

V, es la velocidad del vehículo (km/hr)  
r, el radio de curvatura (m)

Esta fuerza es aplicada horizontalmente, en dirección perpendicular a la dirección de viaje considerada, y se sitúa a 2.0 m por encima de la superestructura.

## 2.5 Fuerzas de frenado

Las fuerzas de frenado se idealizan como una fuerza estática equivalente, aplicada longitudinalmente en la dirección del tráfico. Su valor será el mayor de 160 kN o el 10% del valor de la carga uniforme aplicada en el carril sin incluir factor de impacto. Esta fuerza se usará únicamente para la revisión de los estados límites últimos.

## 2.6. Factores de carga

Las combinaciones de cargas y los factores correspondientes que deben tomarse en cuenta en el diseño, se muestran en las tablas 2.5 y 2.6. Para cada combinación de carga, las cargas individuales se deben multiplicar por su factor de carga correspondiente, y posteriormente sumarse para obtener el efecto total de cargas factorizadas (cargas últimas), asociadas a esa combinación de carga.

Para la revisión de los estados últimos, se deben utilizar los factores máximo y mínimo dados en la tabla 2.6, según convenga para producir los efectos más desfavorables a la estructura.

Tabla 2.5. FACTORES DE CARGA PARA DIFERENTES COMBINACIONES

CARGAS	CARGAS PERMANENTES <sup>1</sup>			CARGAS TRANSITORIAS					CARGAS EXCEPCIONALES (Usar sólo una)			
	D	E	P	L	K	W	V	S	Q	F	A	H
<b>ESTADOS LÍMITES DE FATIGA (FLS)</b>												
Combinación 1 "FLS"	1.00	1.00	1.00	0.80	0.00	1.00 <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>ESTADOS LÍMITES DE SERVICIABILIDAD (SLS)</b>												
Combinación 1 "SLS"	1.00	1.00	1.00	0.75 <sup>3</sup>	0.80	0.70 <sup>2</sup>	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS (ULS)</b>												
Combinación 1 "ULS"	$\alpha_b$	$\alpha_E$	$\alpha_p$									
Combinación 2 "ULS"	$\alpha_b$	$\alpha_E$	$\alpha_p$	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Combinación 3 "ULS"	$\alpha_b$	$\alpha_E$	$\alpha_p$	1.25	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Combinación 4 "ULS"	$\alpha_b$	$\alpha_E$	$\alpha_p$	1.15	1.00	0.40	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Combinación 5 "ULS"	$\alpha_b$	$\alpha_E$	$\alpha_p$	0.00	1.25	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
				0.00	0.00	0.70 <sup>2</sup>	0.00	0.00	1.30	1.30	1.30	1.40

**Notas:** 1 Para los estados últimos, se usan los valores máximos y mínimos que se especifican en la cláusula 2-5.3.2 de este reglamento.

2 Incluye solamente las estructuras cubiertas en el Apéndice A2-2 de ese reglamento.

3 Por la cláusula 2-6.2.2.2 de este reglamento, use de manera individual esta carga y su factor correspondiente.

**Cargas:** A Carga debida al hielo

D Carga muerta

E Presión de la tierra y del agua

F Cargas debidas a flujo de agua

H Colisión

K Deformaciones y desplazamientos

Q Cargas sísmicas

S Asentamientos de la cimentación

V Cargas de viento sobre la carga viva

W Carga de viento sobre la superestructura

P Efectos secundarios del presfuerzo

L Carga viva

Tabla 2.6. FACTORES  $\alpha$  DE CARGA MÁXIMOS Y MÍNIMOS

CARGA MUERTA	$\alpha_D$ Máxima	$\alpha_D$ Mínima
Componentes producidos en taller, excluyendo madera	1.10	0.95
Concreto colado en obra, madera y componentes no estructurales	1.20	0.90
Superficies deterioradas	1.50	0.65
Relleno de tierra, fricción negativa en pilotes	1.25	0.80
Agua	1.10	0.90
PRESIÓN DE TIERRA Y AGUA	$\alpha_E$ Máxima	$\alpha_E$ Mínima
Presión de tierra pasiva*	1.25	0.50
Presión de tierra estática	1.25	0.80
Presión de tierra activa	1.25	0.80
Rellenos	1.25	0.80
Agua	1.10	0.90
PRESFORZADO	$\alpha_p$ Máxima	$\alpha_p$ Mínima
Efectos secundarios del presfuerzo	1.05	0.95

\* Sólo cuando es considerada como carga.

Fuente: Ontario Highway Bridge Design Code. Tercera edición. 1991.

## 2.7 Análisis simplificado de la superestructura

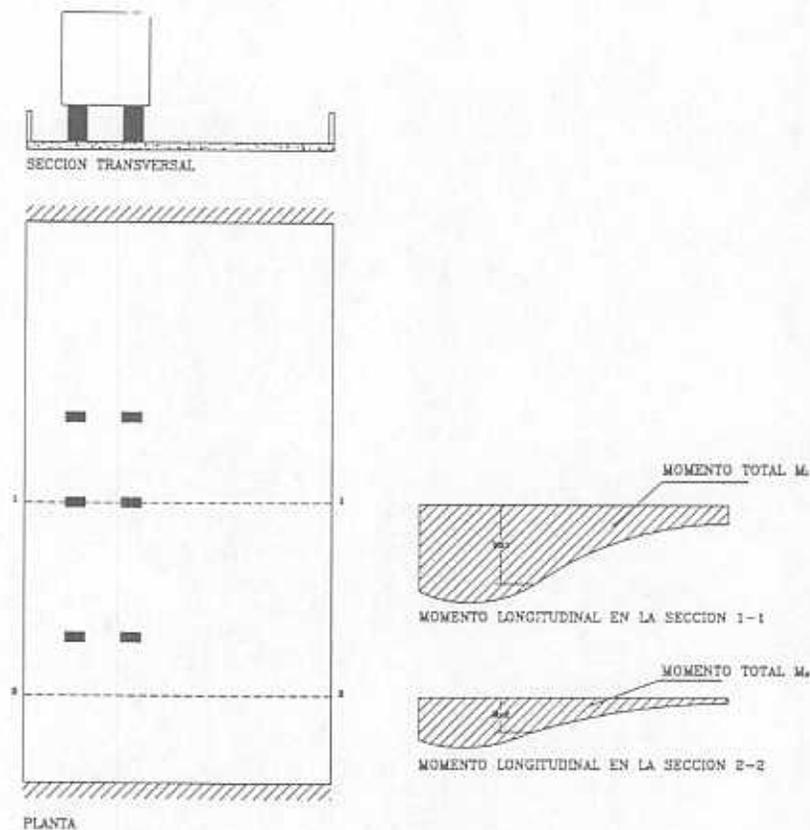
En esta parte se describirá el método simplificado para obtener los momentos de diseño, ocasionados por la carga viva, cuando ocurre la flexión longitudinal. Este método se limita a geometrías regulares puentes rectos, puentes no esviajados, secciones constantes tanto transversal como longitudinalmente, y volados menores a 2.50.m, entre otras limitantes. Para puentes complejos, se requerirán procedimientos más elaborados, como el método del elemento finito.

Este método idealiza el puente como una placa ortotrópica, con la premisa adicional de que la posición de la carga en la dirección longitudinal no afecta la "forma" de la repartición transversal al flexionarse longitudinalmente (fig 2.4). En esta figura se puede observar también que la distribución del momento longitudinal, en dos secciones transversales diferentes, es proporcional una de otra, lo cual constituye la base del método simplificado. Esta proporción se puede expresar mediante la ecuación 2.3.

$$\frac{M_{x1}}{M_1} \equiv \frac{M_{x2}}{M_2} \quad (2.3)$$

donde:

- $M_{x1}$ , es el momento longitudinal en cualquier punto de la sección 1
- $M_1$ , es el momento longitudinal en la sección 1
- $M_{x2}$ , es el momento longitudinal en cualquier punto de la sección 2
- $M_2$ , es el momento longitudinal en la sección 2



**Figura 2.4.** Forma de la distribución transversal del momento longitudinal  
 Para obtener el momento flexionante en una viga en particular, se utiliza la ecuación 2.4, en la cual el cociente S/D trata de representar la fracción de carga que influye en la viga.

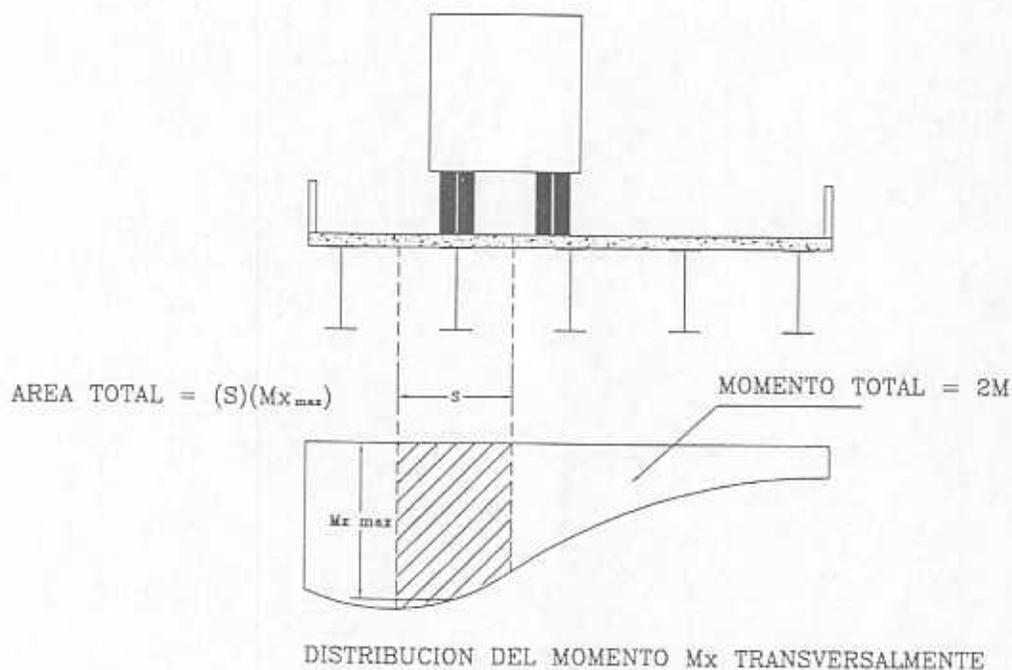
$$M_g = \frac{S}{D} M \quad (2.4)$$

donde:

- Mg, momento asociado a una viga en particular
- M, momento longitudinal en la sección considerada
- S, separación de vigas
- D, dado por el reglamento en unidades de longitud

El reglamento proporciona los valores "D" en función del tipo de puente, número de carriles, importancia de la carretera y del estado límite que se esté revisando.

En la figura 2.5 se muestra la distribución del momento  $M_x$  a lo largo de la sección transversal, idealizando la losa como una placa ortotrópica. El momento por carga viva en la segunda viga es igual al área bajo la curva asociada a la viga.



### **Figura 2.5.** Distribución transversal del momento longitudinal

Los factores principales que pueden afectar los resultados al utilizar el método simplificado son: rigidez, tanto a la flexión como a la torsión, del puente longitudinal y transversalmente, relación de aspecto, tipo de carga (si es uniforme o puntual), en dónde se aplica (tablero interior o exterior), espesor del puente, número de carriles cargados y distancia entre vehículos, en su caso.

## **2.8 Criterios de evaluación**

Cuando se trata de revisar o rediseñar un puente se cambia el procedimiento, teniéndose ahora tres cargas de diseño, las cuales se conocen como cargas de evaluación para un nivel dado (OHBEL). En las figuras 2.6, 2.7 y 2.8, se muestran el vehículo y la carga distribuida alternativa (con la intensidad según el tipo de camino).

La carga de "evaluación nivel uno", se usa para la determinación de la capacidad de un puente por el paso de un vehículo; la carga de "evaluación nivel 2", se usa para determinar la capacidad con la combinación de dos vehículos sencillos, o un tracto-camión; y la carga de "evaluación nivel 3" se usa para determinar la capacidad de un tracto-camión de cinco ejes.

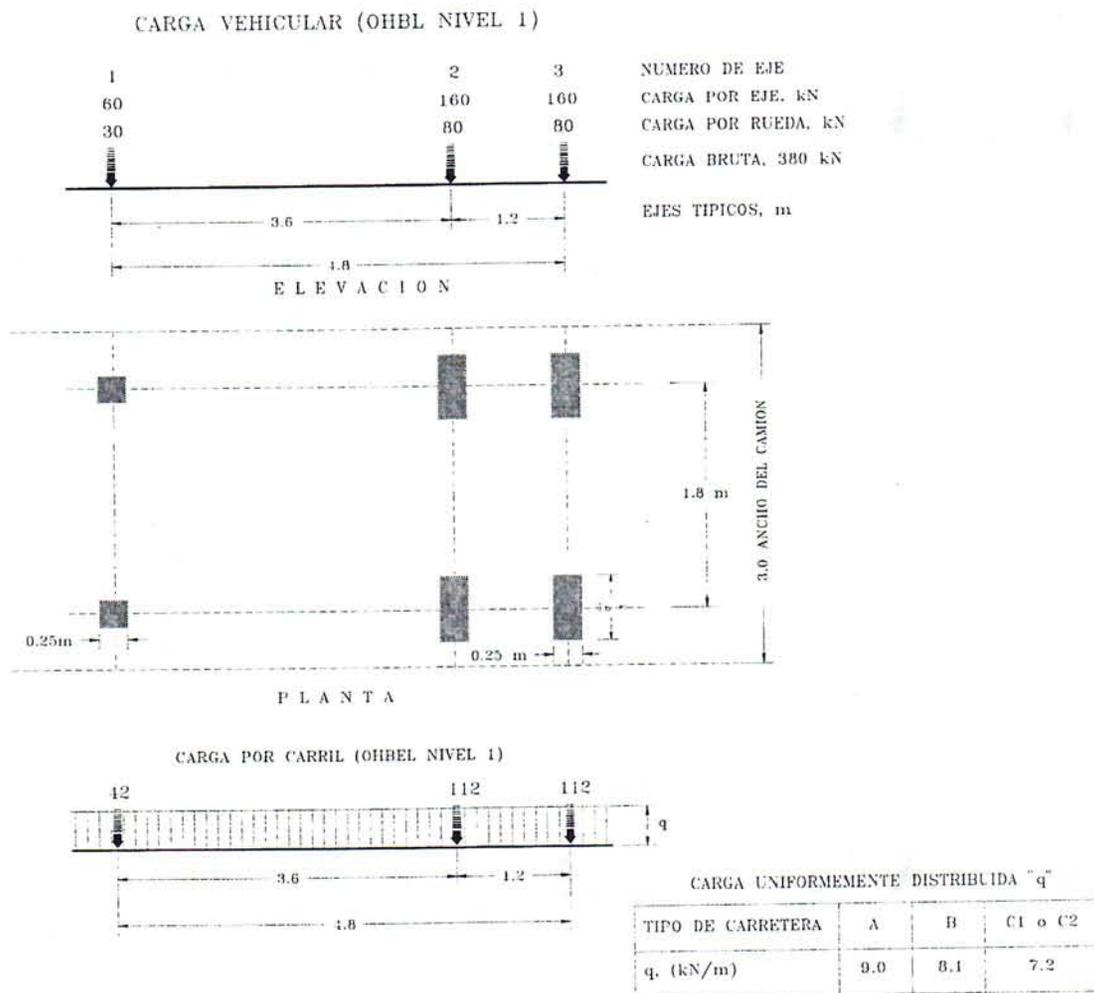


Figura 2.6. Carga de evaluación nivel 1

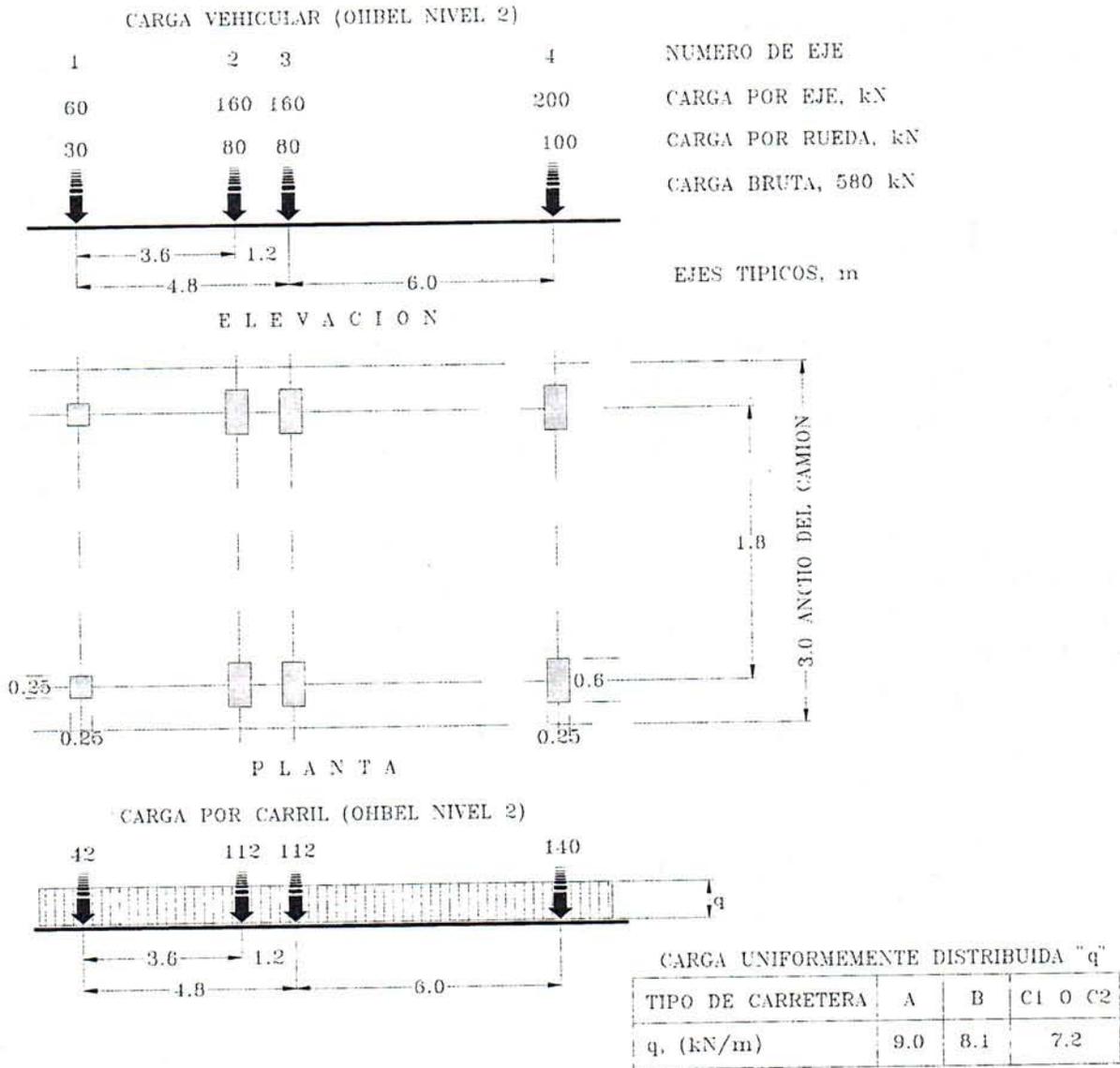
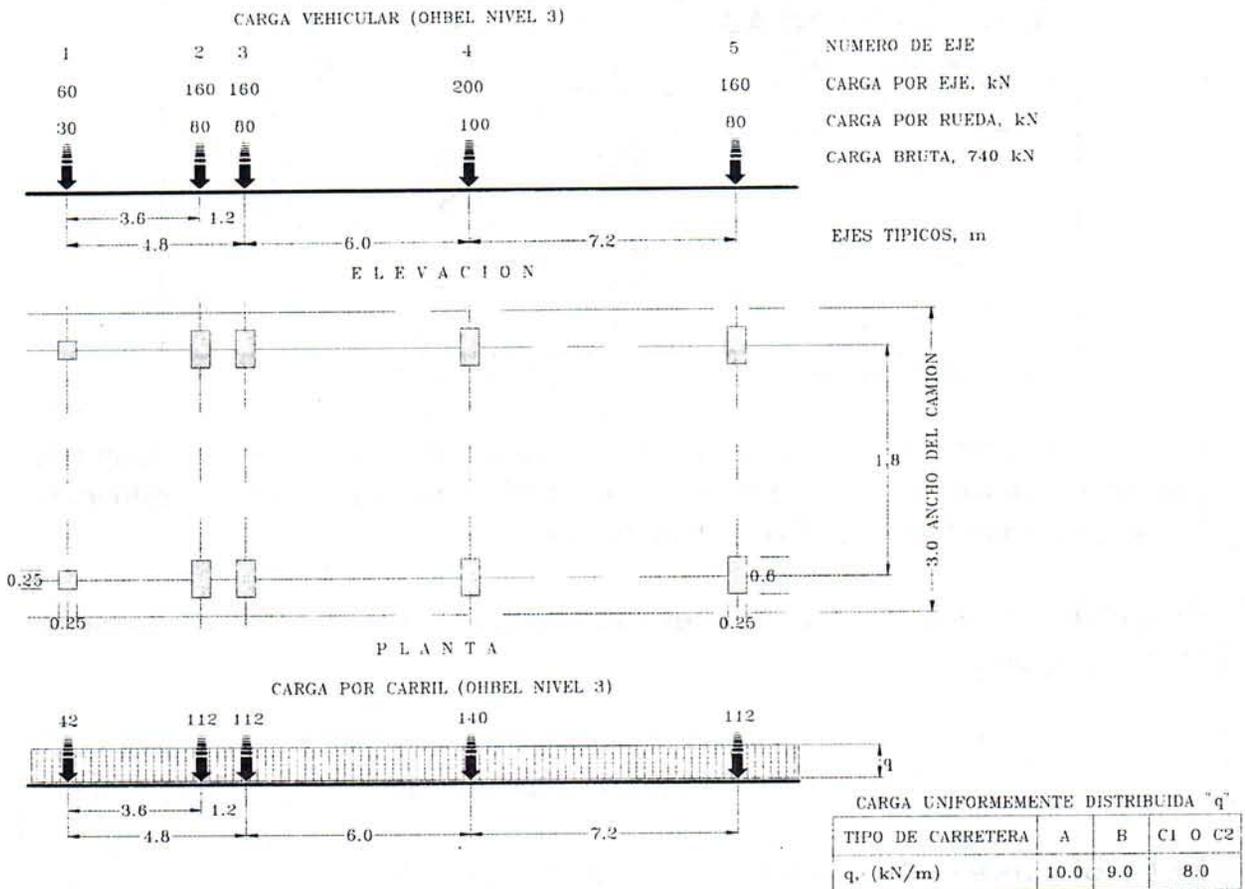


Figura 2.7. Carga de evaluación nivel 2



**Figura 2.8.** Carga de evaluación nivel 3

Este reglamento tiene valores de propiedades constitutivas típicas del acero cuando no se tienen planos originales del puente, clasificado por intervalos de años de construcción; también se provee dicha información para madera, presfuerzo y mampostería.

Se proporciona un criterio para revisión por estados últimos, fatiga y estados límites de serviciabilidad. Los factores de modificación de la carga viva por multiplicidad de carriles cargados se muestran en la tabla 2.7.

**TABLA 2.7. FACTOR DE MODIFICACIÓN DE LA CARGA VIVA  
POR VARIOS CARRILES CARGADOS**

NÚMERO DE LÍNEAS CARGADAS	TIPO DE CARRETERA		
	A	B	C1 y C2
1	1.00	1.0	1.00
2	0.90	0.9	0.85
3	0.80	0.8	0.70
4	0.70	0.7	-
5	0.60	-	-
6 o más	0.55	-	-

Fuente: Ontario Highway Bridge Design Code. Tercera edición. 1991.

El factor de amplificación dinámico se analiza diferente, si se encuentra el puente sobre-esforzado o dañado, introduciéndose un factor de reducción "F", el cual se calcula de la siguiente manera:

En OHBEL niveles 1, 2 y 3, para estructuras que no sean losas de concreto ni mampostería:

$$F = \frac{R_1 - \text{efectos de la carga permanente factorizada}}{\text{efectos de la carga viva factorizada}} \quad (2.6)$$

En OHBEL niveles 1,2 y 3 que sean losas de concreto:

$$F = \frac{R_1}{I_0} \quad (2.7)$$

donde  $R_1$  es la resistencia factorizada, determinándose por la siguiente ecuación:

$$R_1 = (f_{md}) (Rn) \quad (2.8)$$

donde:

$f_{md}$ , es igual a 0.5

$Rn$ , se obtiene de gráficas que da este reglamento

$I_0$ , es la carga de llanta factorizada que incluye el efecto dinámico.

Cuando se tiene que apuntalar, se sigue otro criterio que toma en cuenta la densidad del apuntalamiento, según el valor del factor "F".

Si se opta por hacerle a la estructura pruebas de carga, el factor será:

$$F = \frac{L_f}{\text{efectos de la carga debido a la carga viva factorizada}} \quad (2.9)$$

donde:

$L_f$ , es el efecto de la máxima carga de prueba aplicada.

Este factor de escala "F", en rehabilitación, se usa modificando los factores dinámicos y factores de carga, como se muestra en la tabla 2.8.

**Tabla 2.8. CRITERIO DE EVALUACIÓN, FACTORES DINÁMICOS.**

FACTOR F DE ESCALA		NIVEL DE EVALUACIÓN		
		1	2	3
Se aplica al factor dinámico de la tabla del reglamento OHBDC "2-4.3.2.3" (tabla 2.4. del presente trabajo), para 1 y 2 ejes.	$F > 0.95$	1.00	1.00	1.00
	$0.6 \leq F \leq 0.95$	1.10	1.10	1.10
	$F < 0.6$	1.25	1.25	1.25
Se aplica al factor dinámico de la tabla del reglamento OHBDC "2-4.3.2.3" (tabla 2.4. del presente trabajo), para 3 o más ejes.	$F > 0.95$	1.00	1.00	1.00
	$0.6 \leq F \leq 0.95$	1.25	1.10	1.10
	$F < 0.6$	1.60	1.25	1.25

Fuente: Ontario Highway Bridge Design Code. Tercera edición. 1991.

Cuando exista tráfico controlado y se permita transitar sólo por un carril, a los factores estipulados en este reglamento canadiense en sus cláusulas 2-4.3.2.3 a la 2-4.3.2.7 se les multiplicará por:

- 0.30 cuando las rapideces sean menores a los 10 km/h.
- 0.50 para rapideces controladas de 10 a 25 km/h.
- 0.75 para rapideces controladas entre 25 y 40 km/h.
- 1.00 para rapideces controladas mayores a los 40 km/h.

También la carga permanente presenta factores de modificación, como se muestran en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. FACTORES DE CARGA PARA EVALUACIÓN DE PUENTES EXISTENTES

	Componente primaria para puentes de un carril por sentido.		Componente primaria para puentes con varios carriles por sentido.		Componente secundaria.	
	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.
<b>CARGA MUERTA <math>a_0</math></b>						
Producido en taller excepto madera.	1.20	0.90	1.10	0.95	1.10	0.95
Concreto colado in situ, madera y componentes no estructurales.	1.25	0.85	1.20	0.90	1.15	0.90
Concreto asfáltico con mediciones de espesores.	1.30	0.80	1.30	0.80	1.30	0.80
Concreto asfáltico sin mediciones de espesores.	1.60	0.65	1.50	0.65	1.40	0.70
Terraplén, fricción negativa de pilotes.	1.25	0.80	1.25	0.80	1.25	0.80
Agua.	1.10	0.90	1.10	0.90	1.10	0.90
<b>PRESIÓN TIERRA O AGUA <math>a_1</math></b>	<b>máx.</b>	<b>mín.</b>	<b>máx.</b>	<b>mín.</b>	<b>máx.</b>	<b>mín.</b>
Pasiva de tierra.	1.25	0.50	1.25	0.50	1.25	0.50
Estática de tierra.	1.25	0.80	1.25	0.80	1.25	0.80
Activa de tierra.	1.25	0.80	1.25	0.80	1.25	0.80
Filtración.	1.25	0.80	1.25	0.80	1.25	0.80
Agua.	1.10	0.90	1.10	0.90	1.10	0.90
<b>PRESFUERZO <math>a_2</math></b>	<b>máx.</b>	<b>mín.</b>	<b>máx.</b>	<b>mín.</b>	<b>máx.</b>	<b>mín.</b>
Efecto secundario.	1.05	0.95	1.05	0.95	1.05	0.95

Fuente: Ontario Highway Bridge Design Code. Tercera edición. 1991.

Un capítulo especial es el de la rehabilitación, el cual se aplica:

- Cuando la capacidad de carga es deficiente en uno o más componentes, o cuando se necesita reforzarlos para la buena operación del puente.

- Cuando por accidente se averió la estructura.
- Cuando algún componente falta o se encuentra a bajo nivel estructural.
- Cuando se deteriora algún componente.
- Deficiencia en las características hidráulicas.
- Cualquier otra deficiencia funcional.

Las cargas de diseño de rehabilitación para tráfico normal restringido son:

- 0.5RL<sub>1</sub> representa el 50% de la carga OHBEL1
- 0.75RL<sub>1</sub> representa el 75% de la carga OHBEL1
- RL<sub>1</sub> es el 100% de la carga OHBEL1
- RL<sub>2</sub> es el 100% de la carga OHBEL2

También cambian los factores dinámicos de carga, donde la columna dos y tres siguientes son los factores que modifican a los factores de amplificación (DLA), que se dan en el reglamento "OHBDC", establecidos en su tabla 2-4.3.2.3:

**Tabla 2.10. MODIFICADORES DE LOS FACTORES DINÁMICOS EN REHABILITACIÓN.**

NIVEL DE REHABILITACIÓN	MODIFICADOR DEL "DLA" PARA 1 O 2 - EJES	MODIFICADOR DEL "DLA" PARA 3 O MÁS EJES
0.5RL <sub>1</sub>	1.25	1.60
0.75RL <sub>1</sub>	1.10	1.25
RL <sub>1</sub>	1.00	1.00
RL <sub>2</sub>	1.00	1.00

Fuente: Ontario Highway Bridge Design Code. Tercera edición. 1991.

Tabla 2.11. FACTORES DE CARGA PARA EL CASO DE REHABILITACIONES

CARGAS	CARGAS PERMANENTES					CARGAS TRANSITORIAS					CARGAS EXCEPCIONALES			
	D	E	P	L	K	W	V	S	Q	F	H			
ESTADOS LÍMITES DE FATIGA, FLS	1.00	1.00	1.00	0.80	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ESTADOS LÍMITES DE SERVICIABILIDAD, SLS	1.00	1.00	1.00	0.75	0.80	0.70	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS, ULS														
Combinación 1 "ULS"	$\alpha_b$	$\alpha_E$	$\alpha_p$	$\alpha_L \gamma_L$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Combinación 2 "ULS"	$\alpha_b$	$\alpha_E$	$\alpha_p$	$\alpha_L \gamma_L$	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Combinación 3 "ULS"	$\alpha_b$	$\alpha_E$	$\alpha_p$	$\alpha_L \gamma_L$	1.00	0.40	0.40	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Combinación 4 "ULS"	$\alpha_b$	$\alpha_E$	$\alpha_p$	0.00	1.25	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Combinación 5 "ULS"	$\alpha_b$	$\alpha_E$	$\alpha_p$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.30 $\gamma_o$	1.30 $\gamma_F$	1.40

**Cargas :**

- D Carga muerta
- E Presión de la tierra y del agua
- P Efectos secundarios del pretuerzo
- L Carga viva
- K Deformaciones y desplazamientos
- F Cargas debido a flujo de una corriente y a la presión del hielo
- V Cargas de viento sobre la carga viva
- W Carga de viento sobre la superestructura
- S Asentamientos de la cimentación
- Q Cargas sísmicas
- H Colisión

Fuente: Ontario Highway Bridge Design Code, Tercera edición, 1991.

Tabla 2.12. MODIFICADORES DEL FACTOR DE CARGA VIVA  $\gamma_x$

COMBINACIÓN DE CARGA	FACTOR DE CARGA	VIDA ÚTIL PLANEADA (en años)		
	MODIFICADOR	> 25	10 a 25	< 10
Combinación 1 ULS	$\gamma_1$	1.0	1.0	0.95
Combinación 2 ULS	$\gamma_1$	0.9	0.9	0.85
Combinación 3 ULS	$\gamma_1$	0.8	0.8	0.75
Combinación 4 ULS	$\gamma_D$	1.0	0.5	0
Combinación 5 ULS	$\gamma_E$	1.0	1.0	0

Fuente: Ontario Highway Bridge Design Code. Tercera edición. 1991.

## 2.9 Resumen de cláusulas remitidas del "OHBDC".

Cláusula 2-4.3 se refiere a la carga viva, que se idealiza como un vehículo o una carga uniformemente distribuida.

Cláusula 2-4.3.2.2 expresa que como alternativa se pueden usar valores de factores de amplificación dinámicos basados en mediciones.

Cláusulas 2-4.3.2.3 a 2-4.3.2.7 se refieren al factor de amplificación para casos de puentes de madera, de estribos cerrados y de tierra armada.

Cláusula 2-5.2.2 especifica que las distorsiones elásticas (o desplazamientos prescritos) se deben tomar en cuenta en el análisis.

Cláusula 2-5.3.2. aclara que se deben usar los factores de carga, de tal suerte que produzcan los mayores efectos de las presiones hidrostáticas, de tierras o de presfuerzo; la carga muerta tendrá un factor de carga mínimo de uno cuando no se esté seguro de la supervisión que tuvo el puente.

Cláusula 2-6.2.2.2 limita los desplazamientos máximos obtenidos con las cargas factorizadas, de tal suerte que no excedan las deflexiones máximas de los puentes peatonales, atendiendo a un uso adicional anticipado peatonal (revisándose en la zona donde pueden transitar los peatones).

Apéndice A2-2 se refiere a parapetos, postes y atezadores.

### **3. Reglamento AASHTO 1993 (no vigente)**

A la fecha del presente trabajo esta versión de 1993, no es vigente, ya que es la inmediata anterior al nuevo reglamento de puentes estadounidense. El objetivo de las especificaciones del reglamento AASHTO 1993 (ref. 2), es dar al calculista recursos para un diseño integral de puentes. Recomienda que se hagan estudios hidrológicos y topográficos para la buena localización de un puente. Los gálibos verticales y horizontales se definen en la sección 2 de este reglamento. A los miembros estructurales se les pueden aplicar cargas de servicio o cargas factorizadas. Los puentes esviajados se deben analizar en la dirección vertical, longitudinal y lateral (siguiendo el ángulo de esviajamiento). En el caso de cargas muertas, se dan recomendaciones de pesos volumétricos de algunos materiales. Además de las cargas permanentes y vivas, se definen cargas accidentales, como son las sísmicas y las de viento.

El reglamento está organizado de tal manera que permite el diseño de los diferentes componentes de un puente (cimentación, muros de retención, terraplenes de acceso, elementos de concreto reforzado o presforzado, elementos de acero, alcantarillas, etc.), utilizando, ya sea el método de diseño basado en esfuerzos permisibles (teoría elástica), o bien el método basado en factores de carga y esfuerzos últimos. En su última parte proporciona especificaciones para construcción.

#### **3.1 Carga Viva**

La carga viva estipulada por este reglamento consiste en dos vehículos, uno con dos ejes, denominado con la letra "H", y el otro del tipo de trailer y semirremolque con tres ejes, denominado "HS". Además de estos vehículos, el reglamento define cuatro cargas uniformemente repartidas; dos para representar trenes de vehículos de la serie "H", y las otras dos para los vehículos de la serie "HS". En las cargas uniformes se utiliza adicionalmente una carga concentrada, con valor diferente para el cálculo de momentos o cortantes. En las figuras 3.1 y 3.2 se muestran las cargas de los vehículos, y en la 3.3, las cargas uniformes.

Para el diseño del puente, se deberá utilizar la combinación de carga que produzca los esfuerzos más desfavorables. En términos generales, las cargas puntuales dadas por los vehículos, producen efectos más

3. Reglamento AASHTO 1993 (no vigente)

desfavorables en puentes con claros menores a 40 m, y las cargas uniformes en puentes continuos con claros mayores.

Las cargas de la serie "HS" se utilizan en el diseño de puentes de carreteras interestatales o principales. Además, como carga alternativa para los caminos principales, se especifica una carga de origen militar consistente en un vehículo con dos ejes separados 4 pies (1.22 m) y con 24,000 libras de peso bruto (10,896 kg).

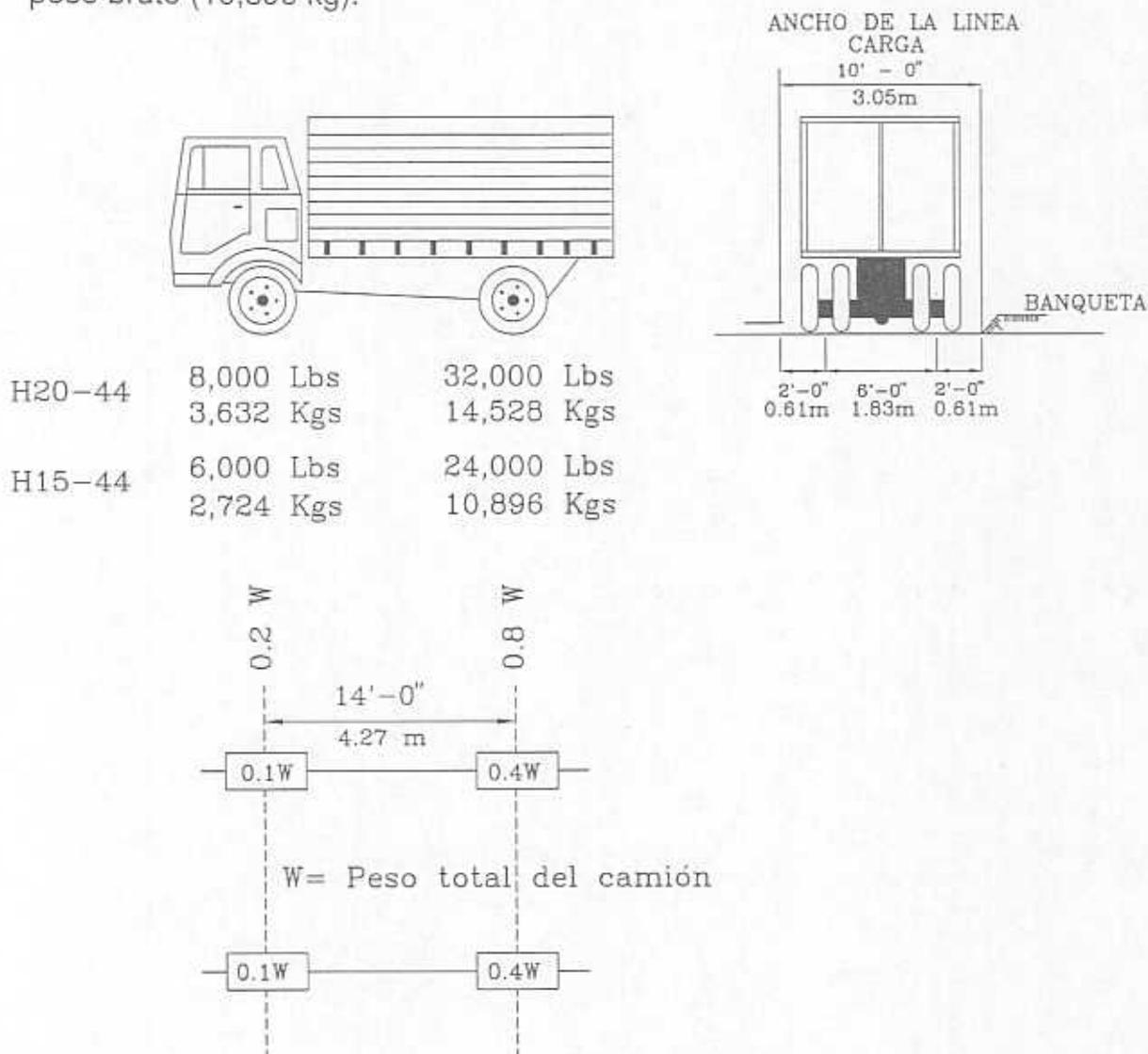


Figura 3.1. Vehículo denominado H15-44 y H20-44

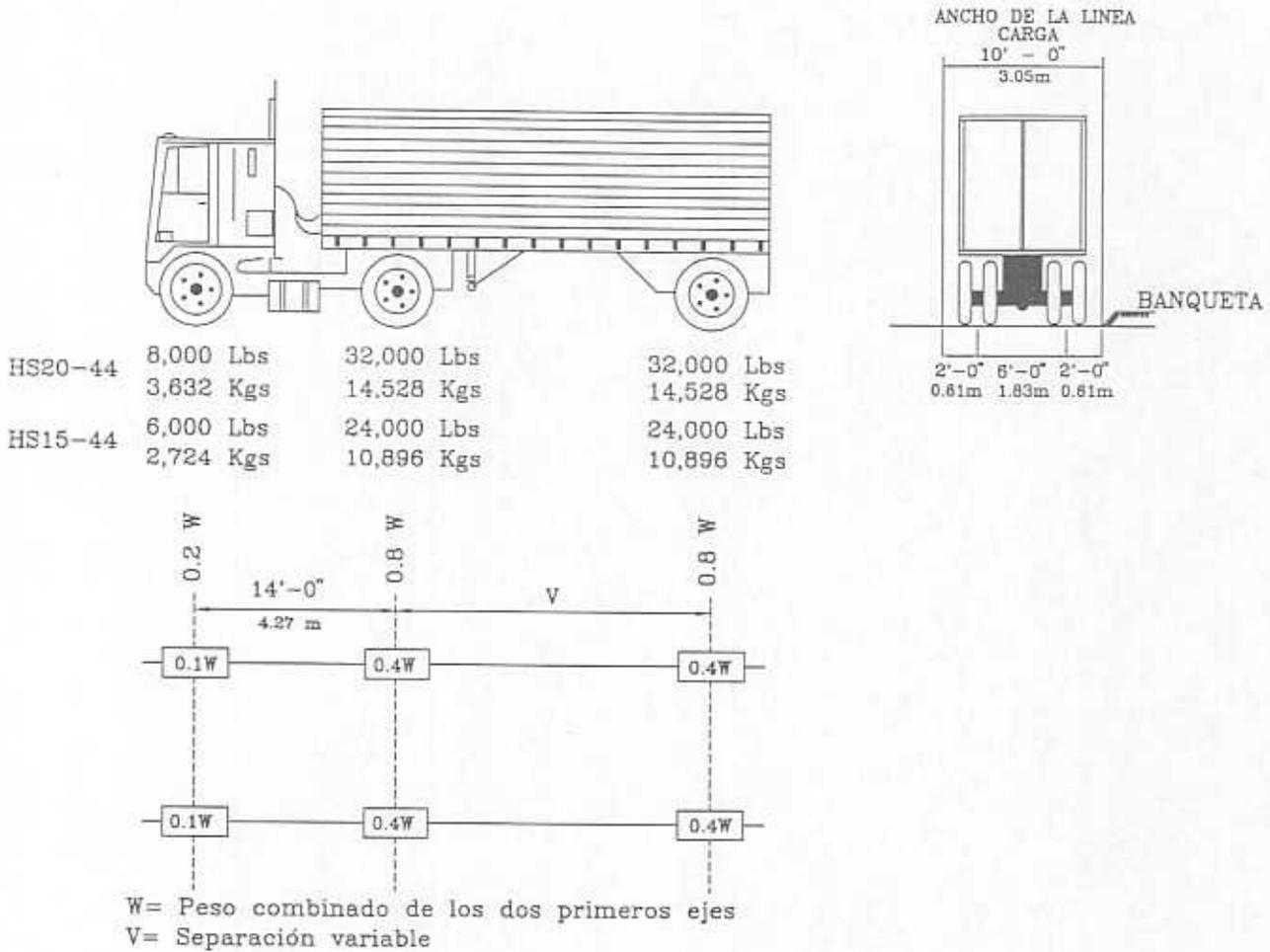


Figura 3.2. Vehículo denominado HS15-44 y HS20-44

Las cargas vivas se aplican en "carriles de carga de diseño", los cuales tienen un ancho de 12 pies (3.66 m); en ellos se coloca la carga viva, la cual tiene un ancho de 10 pies (3.05 m), de manera que produzcan los efectos más desfavorables para el elemento que se esté diseñando (figura 3.3).

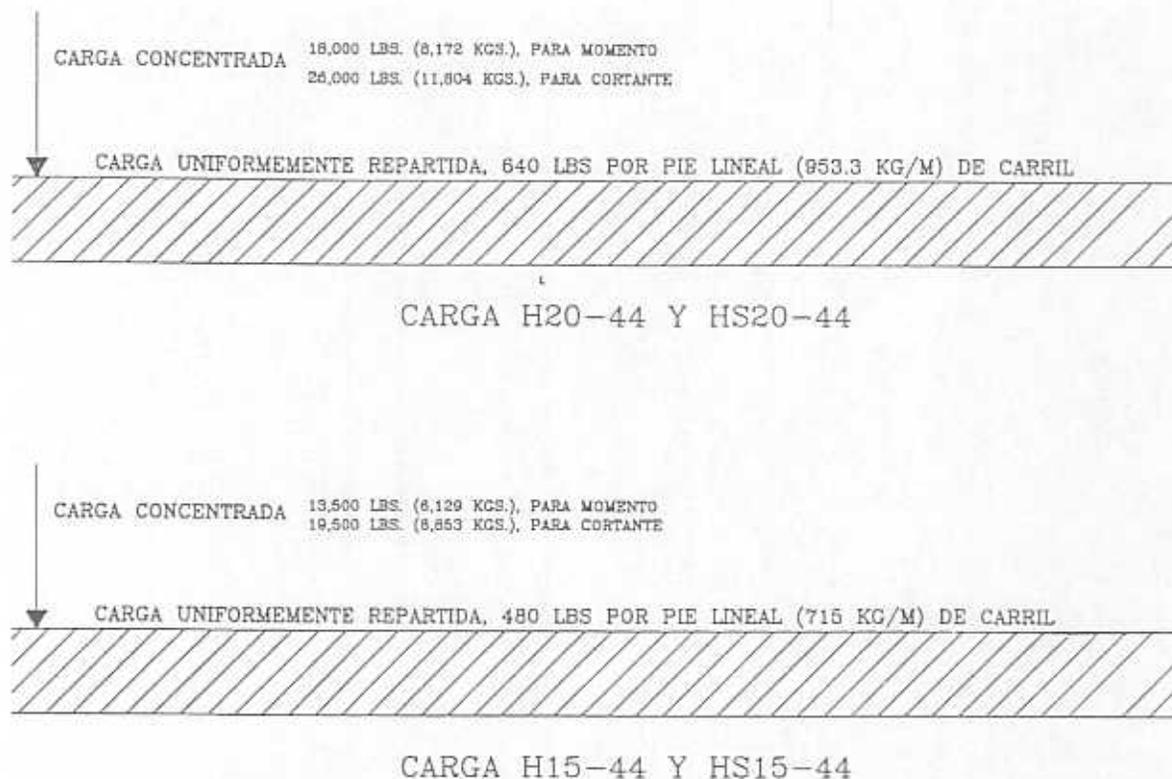


Figura 3.3. Carga uniforme más carga puntual

Cuando el ancho de la superficie de rodamiento se encuentra entre 20 pies (6.10 m) y 24 pies (7.32 m) se toman dos carriles de carga; esto significa, a manera de generalización, que no se permite tener carriles fraccionarios.

En un puente, por el ancho, pueden existir varios carriles de carga, para lo cual el reglamento permite la aplicación de factores de reducción de intensidad, los cuales se muestran en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1. FACTOR POR MULTIPLICIDAD DE CARRILES CARGADOS**

Carriles	Porcentaje
uno o dos	100
tres	90
cuatro o más	75

Fuente: Propia basada en datos de Standard Specifications for Highway Bridges. 1993.

### 3.2 Factor de Impacto

Las cargas vivas deben aumentarse multiplicándose por un factor (factor de impacto), para tomar en cuenta los efectos dinámicos producidos por los vehículos en movimiento.

El factor de impacto,  $I$ , es función de la longitud,  $L$ , y en unidades métricas se define como:

$$I = \frac{15.24}{L + 38} \quad (3.1)$$

Este valor no debe ser mayor de 0.30.

### 3.3 Combinaciones de cargas

Existe una serie de combinaciones de cargas, según se analicen cargas de servicio o factorizadas, a las cuales se les aplicarán los coeficientes que se consignan en la tabla 3.2. La ecuación general para la combinación de cargas es:

$$\text{Grupo (N)} = \gamma (\beta_D D + \beta_L (L + I) + \beta_C CF + \beta_E E + \beta_B B + \beta_S SF + \beta_W W + \beta_{VL} WL + \beta_L LF + \beta_R (R+S+T) + \beta_{EQ} EQ + \beta_{ICE} ICE) \quad (3.2)$$

**Tabla 3.2. FACTORES DE CARGA PARA DIFERENTES COMBINACIONES**

Columna No	1	2	3	3A	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Grupo	$\gamma$	Factor $\beta$														%
		D	(L+I) <sub>v</sub>	(L+I) <sub>h</sub>	CF	E	B	SF	W	WL	LF	R+S+T	EQ	ICE		
CARGAS DE SERVICIO	I	1.0	1	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0	0	0	0	0	0	100
	IA	1.0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
	IB	1.0	1	0	1	1	$\beta_E$	1	1	0	0	0	0	0	0	**
	II	1.0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	125
	III	1.0	1	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0.3	1	1	0	0	0	125
	IV	1.0	1	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0	0	0	1	0	0	125
	V	1.0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	140
	VI	1.0	1	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0.3	1	1	1	0	0	140
	VII	1.0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	133
	VIII	1.0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	140
	IX	1.0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	150
X	1.0	1	1	0	0	$\beta_E$	0	0	0	0	0	0	0	0	100	
FACTORES DE CARGA	I	1.3	$\beta_D$	1.67*	0	1	$\beta_E$	1	1	0	0	0	0	0	0	No aplica
	IA	1.3	$\beta_D$	2.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	IB	1.3	$\beta_D$	0	1	1	$\beta_E$	1	1	0	0	0	0	0	0	
	II	1.3	$\beta_D$	0	0	0	$\beta_E$	1	1	1	0	0	0	0	0	
	III	1.3	$\beta_D$	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0.3	1	1	0	0	0	
	IV	1.3	$\beta_D$	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0	0	0	1	0	0	
	V	1.25	$\beta_D$	0	0	0	$\beta_E$	1	1	1	0	0	1	0	0	
	VI	1.25	$\beta_D$	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0.3	1	1	1	0	0	
	VII	1.3	$\beta_D$	0	0	0	$\beta_E$	1	1	0	0	0	0	1	0	
	VIII	1.3	$\beta_D$	1	0	1	$\beta_E$	1	1	0	0	0	0	0	1	
	IX	1.2	$\beta_D$	0	0	0	$\beta_E$	1	1	1	0	0	0	0	1	
X	1.3	1	1.67	0	0	$\beta_E$	0	0	0	0	0	0	0	0		

\* 1.25 en partes voladas.

\*\* Porcentaje correspondiente al resultado de dividir el esfuerzo de operación entre el esfuerzo real del material.

Lo sombreado corresponde al caso de alcantarillas, por lo que los coeficientes  $\beta_E$  serán aplicados a las cargas horizontales y verticales.

Fuente: Standard Specifications for Highway Bridges, 1993

A continuación se describen las abreviaturas y símbolos incluidos en la tabla anterior:

- $(L+I)_n$  Es la carga viva + impacto, correspondiente a la carga "H" o "HS".
- $(L+I)_p$  Corresponde al análisis del sobre-esfuerzo, especificado en el AASHTO de mantenimiento de puentes.
- % Es el porcentaje del esfuerzo unitario básico.
- $\beta_E = 1$  para cargas verticales y laterales en las otras estructuras.

*Para alcantarillas.*

- $\beta_E = 1.0$  y  $0.5$  para cargas laterales y marcos rígidos.

*Factores de carga para diseño:*

- $\beta_E = 1.3$  en el caso de presión lateral para muros de contención y marcos rígidos (excluyendo el caso anterior de alcantarillas).
- $\beta_E = 0.5$  en las presiones laterales cuando se revisa el momento positivo en marcos rígidos.
- $\beta_E = 1.0$  presiones de suelo verticales.
- $\beta_D = 0.75$  en diseño de columnas.- carga axial mínima y momento máximo en excentricidad extrema.
- $\beta_D = 1.0$  también para columnas.- carga máxima axial y momentos mínimos.
- $\beta_D = 1.0$  flexión y tensión.
- $\beta_E = 1.0$  para alcantarillas rígidas.
- $\beta_E = 1.5$  para alcantarillas flexibles.

*Nomenclatura general de la tabla:*

- $\gamma$  = factor de carga.
- $\beta$  = coeficiente.
- D = carga muerta.
- L = carga viva.
- I = carga viva factorizada por impacto.
- E = carga por presión de tierra.
- B = bufamiento.

### 3. Reglamento AASHTO 1993 (no vigente)

---

- W = viento.
- WL = viento sobre la carga viva.
- LF = fuerza longitudinal que provoca la carga viva.
- CF = fuerza centrífuga.
- R = acortamientos de diferentes materiales que conforman el puente.
- S = contracciones.
- T = temperatura.
- EQ = sismo.
- SF = flujo de agua.
- ICE = hielo.

También se debe hacer una revisión local de miembros, principalmente en puentes con traveses tipo cajón, estipulándose el área de contacto de la llanta.

### 3.4 Análisis de la superestructura

En esta parte se describirá el método simplificado para obtener los momentos de diseño ocasionados por la carga viva cuando ocurre la flexión longitudinal. Este método se limita a geometrías regulares, puentes rectos, puentes no esviados, secciones constantes tanto transversalmente como longitudinalmente, volados menores a 2.50 m, entre otras limitantes; para puentes complejos se requerirán procedimientos más elaborados, como por ejemplo el método del elemento finito.

Este método idealiza el puente como una placa ortotrópica, con la premisa adicional de que la posición de la carga en la dirección longitudinal no afecta la "forma" de la repartición transversal al flexionarse longitudinalmente (fig. 3.4). También en la figura 3.4 se puede observar que la distribución del momento longitudinal en dos diferentes secciones transversales es proporcional una de otra, lo cual constituye la base del método simplificado.

Esta proporción se puede expresar mediante la ecuación 3.3.

$$\frac{M_{x1}}{M_1} \cong \frac{M_{x2}}{M_2} \quad (3.3)$$

donde:

$M_{x1}$ , es el momento longitudinal en cualquier punto de la sección 1

$M_1$ , es el momento longitudinal en la sección 1

$M_{x2}$ , es el momento longitudinal en cualquier punto de la sección 2

$M_2$ , es el momento longitudinal en la sección 2

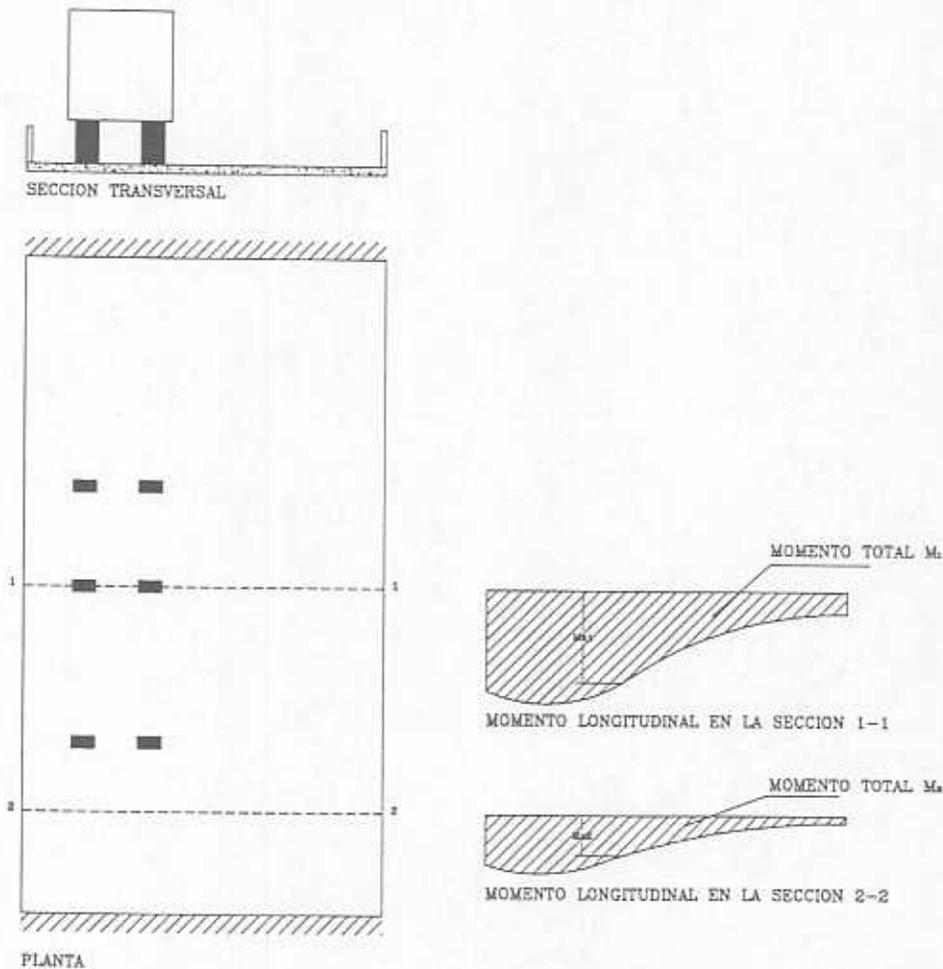


Figura 3.4. Forma de la distribución transversal del momento longitudinal

Para obtener el momento flexionante en una viga en particular, se utiliza la ecuación 3.4, en la cual el cociente S/D trata de representar la fracción de carga que influye en la viga.

$$M_g = \frac{S}{D} M \quad (3.4)$$

donde:

$M_g$ , momento asociado a una viga en particular

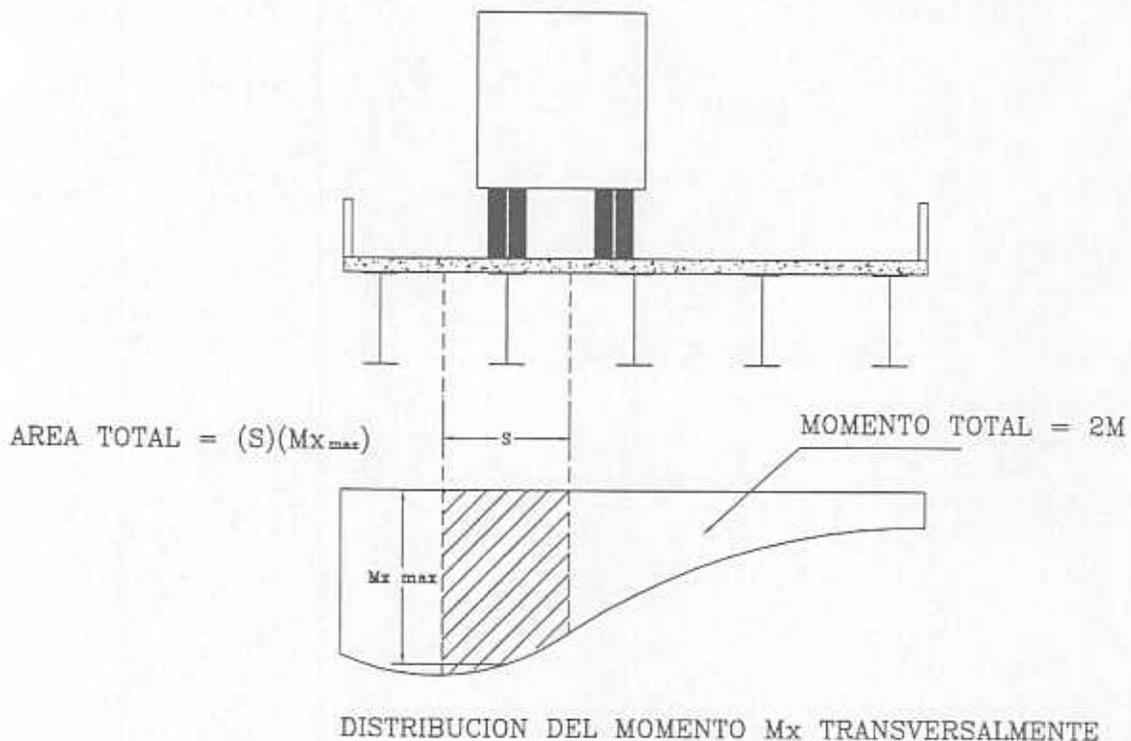
$M$ , momento longitudinal en la sección considerada

$S$ , separación de vigas

$D$ , dado por el reglamento en unidades de longitud

El reglamento proporciona los valores "D" en función del tipo de puente, número de carriles, importancia de la carretera y del estado límite que se esté revisando.

En la figura 3.5 se muestra la distribución del momento  $M_x$  a lo largo de la sección transversal, idealizando la losa como una placa ortotrópica. El momento por carga viva en la segunda viga es igual al área bajo la curva asociada a la viga.



**Figura 3.5.** Distribución transversal del momento longitudinal

Este método es semejante al OHBDC, pero el reglamento canadiense refina el cálculo dependiendo del puente analizado, lo cual el ASSHTO no realiza, terminando la distribución en esta etapa.

## 4. Reglamento AASHTO 1994

---

### 4.1 Introducción

En 1994 aparece la más reciente versión del reglamento de puentes estadounidense. Las especificaciones abarcan el diseño, la evaluación y la rehabilitación, aclarando que son los requerimientos mínimos para garantizar la seguridad pública. La seguridad se procura en este reglamento haciendo énfasis en la redundancia y la ductilidad, tanto de los elementos aislados, como del puente en su conjunto. Los puentes que considera este reglamento son los que tienen claros mayores de los 6 m.

El método de diseño empleado por el AASHTO nuevo se denomina "Método de Diseño Basado en Factores de Carga y Resistencia" (Load and Resistance Factor Design, LRFD), con la nueva filosofía de definir "estados límites". Por cerca de 100 años se ha usado la filosofía de diseño basada en esfuerzos permisibles, los cuales se consideran como fracciones fijas de la resistencia máxima o de la resistencia de fluencia; sin embargo, esta nueva versión del AASHTO evoluciona al método de "estados límites". Los "estados límites" incluyen la resistencia, la fatiga, la fractura, la serviciabilidad y la existencia de algún evento extremo, tomando en cuenta al puente en su totalidad (el suelo se incluye en la revisión).

Los puentes nuevos se diseñan bajo esta filosofía, de tal manera que deben cumplir con los estados límites para garantizar: seguridad, serviciabilidad y fácil construcción. Además, se busca que los puentes tengan accesibilidad para tareas de inspección y mantenimiento, así como que sean económicos y estéticos.

La ecuación de los estados límites (tanto de servicio como de resistencia), que se consideran en elementos y en conexiones, debe cumplir:

$$\eta \sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_t \quad (4.1)$$

en la cual:

$$\eta = \eta_D \eta_R \eta_I > 0.95$$

En esta ecuación:

$\gamma_i$  = factor de carga  $i$

$\phi$  = factor de resistencia

$\eta$  = factor relativo a la ductilidad, redundancia e importancia operacional

$\eta_D$  = factor relativo a la ductilidad

$\eta_R$  = factor relativo a la redundancia

$\eta_I$  = factor relativo a la importancia operacional

$Q_f$  = efecto de la fuerza

$R_n$  = resistencia nominal

$R_f$  = resistencia factorizada  $\phi R_n$

En esta metodología de diseño, la resistencia de componentes y conexiones estructurales se determina, en muchos casos, sobre la base del comportamiento inelástico, y los efectos de las fuerzas son determinados mediante el uso de análisis elásticos con cargas factorizadas (cargas últimas).

Los estados límites de servicio se refieren, en este reglamento, a restricciones dadas en los esfuerzos, deformaciones y agrietamiento para las condiciones regulares de servicio.

En los estados límites de fatiga se analizan los rangos de esfuerzos, que bajo condiciones de servicio normales, hacen a la estructura segura contra la variación de rangos de esfuerzos esperados (fatiga) y ciclos de carga.

Los estados límites de resistencia se verifican, tanto local como globalmente, para resistir las combinaciones de cargas posibles. Podrá incorporarse en este estado límite la aparición de algún "evento extremo", tal como es el caso de un gran sismo y flujo de hielo.

Con respecto a la *ductilidad*, también se deben tomar en cuenta los mecanismos para la disipación de energía, usándose en todos los casos los siguientes valores para los factores  $\eta$  :

Para el estado límite de resistencia:

$\eta_D = 1.05$ , cuando las conexiones y componentes no presentan ductilidad

$\eta_D = 0.95$ , cuando sí presentan ductilidad

Para los otros estados:

$\eta_D = 1.00$

Con relación a la *redundancia*, se definen los factores  $\eta$  de la siguiente manera:

$\eta_R = 1.05$ , cuando las conexiones y componentes no presentan ductilidad

$\eta_R = 0.95$ , cuando sí presentan ductilidad

Para los otros estados:

$\eta_R = 1.00$

Partiendo de que todos los puentes tienen algún grado de *importancia operacional*, se usará el siguiente rango para el factor  $\eta_I$ , operacional:

$$0.95 \leq \eta_I \leq 1.05,$$

adoptándose el valor al puente específico (más adelante se dará una clasificación relativa a la importancia del puente ).

En esta nueva versión, de nuevo se hace hincapié en los estudios hidrológicos, topográficos, geológicos y económicos para la ubicación óptima del puente.

## 4.2 Lineamientos generales para revisión y prediseño

Un criterio muy importante es el referente a los límites de deflexiones, dado en la tabla 4.1. Para el cálculo de deflexiones y su comparación con las deflexiones máximas estipuladas en la tabla 4.1, deberán utilizarse cargas dinámicas, es decir, las cargas vivas incrementadas por el factor de impacto correspondiente.

**Tabla 4.1. DEFLEXIONES MÁXIMAS PERMITIDAS**

TIPO DE CARGA	DEFLEXIÓN MÁXIMA
<b>Puentes de acero, aluminio y concreto</b>	
En general para la carga vehicular	Claro/800
Cargas vehiculares y/o peatonales	Claro/1000
Cargas vehiculares en zona cantiliver	Claro/300
Cargas vehiculares y/o peatonales en la zona cantiliver	Claro/375
<b>Puentes de madera</b>	
Cargas vehiculares y/o peatonales	Claro/425
Cargas vehiculares sobre tablonos y paneles: deflexión relativa extrema entre bordes adyacentes.	2.5 mm
<b>Puentes con sistema de piso ortotrópico</b>	
Carga vehicular sobre losa	Claro/300
Carga vehicular en nervadura del sistema de piso ortotrópico	Claro/1000
Carga vehicular en nervadura: deflexión relativa extrema entre nervaduras adyacentes	2.5 mm

Fuente: Propia con datos de AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.  
Primera edición, 1994.

Cuando el puente está sobre varias vigas, a la deflexión se le multiplica por un factor que resulta de dividir el número de carriles entre el número de vigas.

El reglamento presenta la tabla 4.2 donde se recomiendan peraltes mínimos para superestructuras ( aunque no invalida otro criterio para obtener dichos valores ), en donde "S" es la longitud de la losa y "L" es la longitud del claro , ambos en mm:

**Tabla 4.2. PERALTES MÍNIMOS PARA SUPERESTRUCTURAS**

SUPERESTRUCTURA		Espesor mínimo (incluyendo losa de piso). En estructuras con espesor variable, analizar dicho espesor de la misma forma como se toman en cuenta los cambios en la rigidez relativa en secciones con momentos positivos y negativos.	
Material	Tipo	Claro Sencillo	Claro Continuo
Concreto Reforzado	Losa	$1.2(S + 3,000)/30$	$(S + 3,000)/30 \geq 165 \text{ mm}$
	Viga-T	0.070L	0.065L
	Viga en cajón	0.060L	0.055L
	Peatonal	0.035 L	0.033 L
Concreto Presforzado	Losa	$0.30 L \geq 165 \text{ mm}$	$0.27 L \geq 165 \text{ mm}$
	Cajón	0.045 L	0.040L
	Viga I	0.045 L	0.040L
	Peatonal	0.033 L	0.030 L
	Viga adyacente	0.030 L	0.025
Acero	Toda la sección compuesta	0.040 L	0.025 L
	Vigas I	0.033 L	0.027 L
	Armaduras	0.100 L	0.100 L

Fuente: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Primera edición. 1994

### 4.3 Factores de Carga

La carga factorizada total, se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = \eta \sum \gamma_i q_i \quad (4.2)$$

donde:

$\gamma_i$  = factor de carga

$q_i$  = carga

$\eta$  = factor modificador

Los estados límites que se deben verificar son los siguientes:

- Resistencia I.- Combinación básica, con el **vehículo virtual** que se describe más adelante, sin incluir viento.
- Resistencia II.- Incluye vehículos especiales, sin viento.
- Resistencia III.- Se incluye al viento, con velocidades mayores a los 90 km/hr.
- Resistencia IV.- Rangos altos de relaciones de carga muerta con respecto a la carga viva.
- Resistencia V.- **Vehículo virtual básico** y vientos de cerca de 90 km/hr.
- Evento extremo I.- Combinación con sismo.
- Evento extremo II.- Combinación que incluye la nieve, hielo, colisiones, eventos hidráulicos (la carga viva se aplica con valor reducido).
- De Servicio I.- Combinación con operación normal y vientos cercanos a los 90 km/h; también se utiliza para revisión de grietas.
- De Servicio II.- Cuando no se sobrepasa el límite elástico en estructuras metálicas.

- Servicio III.- Sólo para tensión en concreto presforzado.
- Fatiga.- Para fatiga y fractura (relacionada con el paso cíclico de un solo vehículo).

Los factores de carga para varias combinaciones se tomarán de acuerdo a las tablas 4.3 y 4.4. Todas las combinaciones indicadas deben analizarse para obtener el evento máximo; cuando existan efectos de distorsión, se les aplicará adicionalmente el factor de redundancia correspondiente antes mencionado.

Tabla 4.3. COMBINACIONES DE CARGA Y FACTORES DE CARGA

Combinación de carga	DC DD DW EH EV ES	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU CR SH	TG	SE	Use éstas, una a la vez				
										EQ	IC	CT	CV	
<b>Estados límite</b>														
Resistencia - I	$\gamma_p$	1.75	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	-	-	-	-	-
Resistencia - II	$\gamma_p$	1.35	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	-	-	-	-	-
Resistencia - III	$\gamma_p$	-	1.00	1.40	-	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	-	-	-	-	-
Resistencia - IV EH, EV, ES, DW Sólo DC	$\gamma_p$ 1.5	-	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-	-
Resistencia - V	$\gamma_p$	1.35	1.00	0.40	0.40	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	-	-	-	-	-
Evento extremo - I	$\gamma_p$	$\gamma_{EQ}$	1.00	-	-	1.00	-			1.00	-	-	-	-
Evento extremo - II	$\gamma_p$	0.50	1.00	-	-	1.00	-			-	1.00	1.00	1.00	-
Servicio - I	1.00	1.00	1.00	0.30	0.30	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	-	-	-	-	-
Servicio - II	1.00	1.30	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20			-	-	-	-	-
Servicio - III	1.00	0.80	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	-	-	-	-	-
Fatiga, LL, IM y sólo CE	-	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Primera edición. 1994

Tabla 4.4. FACTORES DE CARGA PARA CARGAS PERMANENTES  $\gamma_P$ 

TIPO DE CARGA	FACTOR DE CARGA	
	Máximo	Mínimo
DC : Componentes estructurales y ligados	1.25	0.90
DD : "downdrag"	1.80	0.45
DW : Superficies de rodamiento y equipamiento	1.50	0.65
EH : Presión de tierra horizontal · Activa · Reposo	1.50	0.90
	1.35	0.90
EV : Presión de tierra vertical : · Estabilidad total · Estructuras de retención · Alcantarillas rígidas · Marcos rígidos · Alcantarillas flexibles · Alcantarillas flexibles de sección cajón metálicas	1.35	N/A
	1.35	1.00
	1.30	0.90
	1.35	0.90
	1.95	0.90
	1.50	0.90
ES : Terraplén	1.50	0.75

Fuente: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Primera edición. 1994

Las abreviaturas empleadas en las tablas anteriores se refieren a:

Para cargas permanentes

DC = carga muerta de componentes estructurales y uniones no estructurales

DD = "downdrag" (fuerzas hacia abajo inducidas por el movimiento relativo entre el suelo y la estructura)

DW = carga muerta de la superficie de rodamiento, banquetas y su

equipamiento

EH = Presión de tierra horizontal

EV = Carga muerta por presión vertical de terraplén de tierra

ES = Sobrecarga por rellenos de tierra

Para cargas transitorias

BR = Fuerzas de frenado vehicular

CE = Fuerza centrífuga vehicular

CR = Derrapamiento

CT = Fuerzas de colisiones vehiculares

CV = Fuerzas de colisiones de embarcaciones

EQ = Sismo

FR = Fricción

ICE = Hielo

IM = Carga dinámica permisible vehicular

LL = Carga viva vehicular

LS = Sobrepesos de la carga viva

PL = Carga viva peatonal

SE = Asentamientos

SH = Contracción y retracción

TG = Gradiente de temperatura

TU = Temperatura uniforme

WA = Presión por avenidas y cargas de agua

WL = Viento sobre carga viva

WS = Viento sobre la estructura

## 4.4 Carga Viva

El número de carriles de diseño se toma como la parte entera que resulta de dividir el ancho del puente entre 3,600. Cuando el ancho del carril sea menor de 3,600 mm, se tomarán como carriles de diseño, el número y ancho de los carriles de tráfico correspondientes. Cuando el ancho esté entre 6,000 mm y 7,200 mm, se tomarán dos carriles de diseño, con un ancho igual a vez y media el ancho de la superficie de rodamiento.

Aquí desaparece la denominación de las cargas "HS" y surge la de **vehículo virtual "HL-93"**. Esta carga se llama "virtual" porque no representa algún vehículo en particular, y no intenta relacionar la carga permitida, pesos ilegales ni cargas de corta duración.

Cuando se analizan varios carriles cargados, se aplica alguno de los factores por presencia múltiple mostrados en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5. FACTOR POR MULTIPLICIDAD DE CARRILES CARGADOS**

<b>Carriles</b>	<b>Porcentaje</b>
uno	120
dos	100
tres	85
cuatro o más	65

Fuente: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.  
Primera edición, 1994

El modelo básico de cargas vivas que propone este reglamento, consiste en tres cargas virtuales: carga de camión de tres ejes, carga de tándem (dos ejes) y carga uniforme.

Para el caso de la carga de camión de tres ejes (figura 4.1), el espaciamiento entre los ejes traseros debe variar entre 4.3 m y 9.0 m y, en su caso, producir los mayores elementos mecánicos. Además, esta carga se debe de afectar por un factor de impacto.

La carga de tándem está formada por un par de ejes de 110 kN, espaciados longitudinalmente a 1,200 mm y, transversalmente, a 1,800 mm. Adicionalmente, a esta carga se le afecta por un factor de impacto.

La carga uniformemente repartida tiene una intensidad de 9.3 N/mm y abarca un ancho de 3,000 mm. A esta carga uniforme no se le afecta por un factor de impacto.

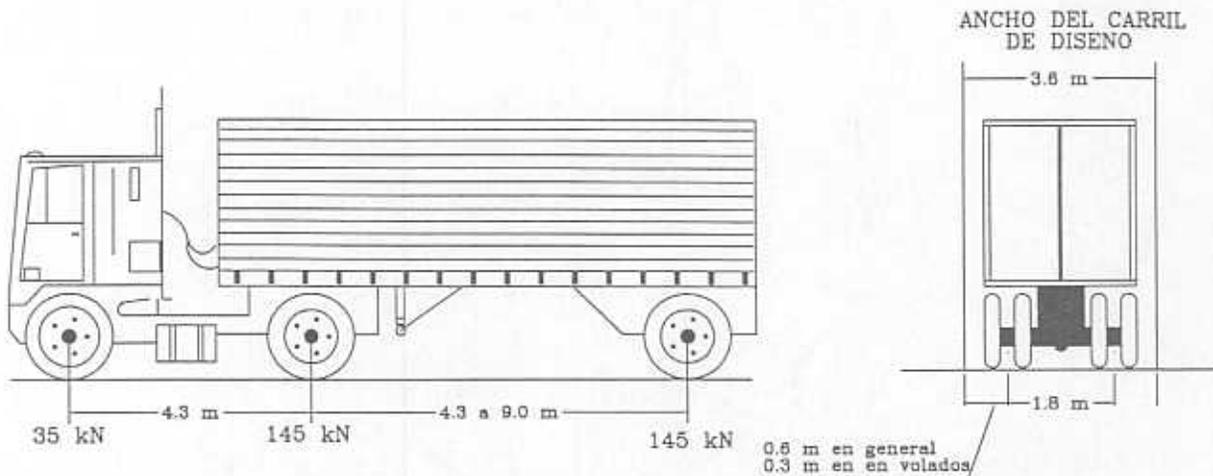
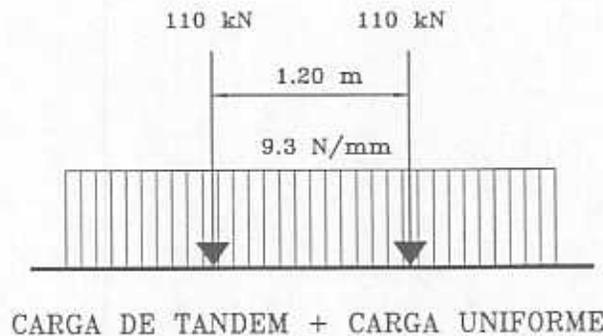


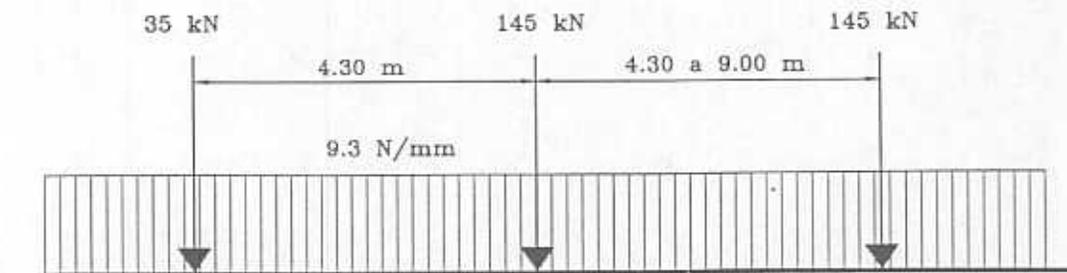
Figura 4.1. Vehículo virtual de tres ejes

Las cargas vivas para el diseño y revisión resultan de dos combinaciones de las cargas básicas anteriores (ver figura 4.2):

- vehículo de tres ejes con una carga uniforme.
- vehículo con dos ejes (tándem) con una carga uniforme.



CARGA DE TANDEM + CARGA UNIFORME



CARGA DE CAMION CON TRES EJES + CARGA UNIFORME

Figura 4.2. Combinaciones de cargas básicas para diseño y revisión

Para la evaluación de efectos locales, el reglamento define un área de contacto, para la distribución de la presión de la llanta y la evaluación de efectos locales. El ancho del área de contacto es 510 mm y su longitud en mm, se obtiene mediante la ecuación 4.3:

$$l = 2.28\gamma \left( 1 + \frac{IM}{100} \right) P \quad (4.3)$$

donde :

$\gamma$  = factor de carga

IM = carga dinámica permisible, %

P = 72.5 kN para el camión de tres ejes y 55 kN para la carga de tándem

Para obtener los momentos negativos máximos en los apoyos interiores, se usa la combinación al 90% de dos vehículos de tres ejes espaciados 15,000 mm, medido del eje delantero de uno al eje trasero del otro, junto con el 90% de la carga uniformemente distribuida (el eje con espaciamiento variable se deja a su mínimo valor de 4,300 mm). Cuando el claro es pequeño no se incluyen los ejes excedentes.

Cuando se desea encontrar las deflexiones bajo condiciones de servicio, sólo se debe usar el vehículo de tres ejes, o al 25% la combinación vehículo de tres ejes con carga uniformemente distribuida .

La carga viva para fatiga es la del vehículo de tres ejes, pero en lugar del espaciamiento variable, en los ejes traseros, se usa uno constante de 9,000 mm, y se incluye el concepto de frecuencia de la carga de fatiga.

La frecuencia de la carga por fatiga debe ser tomada como el valor del tráfico promedio diario correspondiente a un carril,  $ADTT_{sl}$  . Esta frecuencia se aplica a todos los componentes del puente. Si no se tiene información mejor, el tráfico promedio diario correspondiente a un carril se calcula como:

$$ADTT_{SL} = p \times ADTT \quad (4.4)$$

donde :

ADTT = Corresponde al número de camiones por día en una dirección, promediados en el tiempo de la vida útil de diseño.

ADTT<sub>SL</sub> = El número de camiones por día asociados a un solo carril, promediados en el tiempo de la vida útil de diseño.

p = Se obtiene de la tabla 4.6.

**Tabla 4.6. FRACCION DEL TRAFICO TOTAL DE CAMIONES ASOCIADO A UN CARRIL**

Número de carriles disponibles para camiones	p
uno	1.00
dos	0.85
tres o más	0.80

Fuente: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.  
Primera edición. 1994

## 4.5 Carga dinámica permisible IM

El concepto de factor de impacto, manejado por versiones anteriores del reglamento desaparece (el cual era función de la longitud); para esta versión, su equivalente es independiente del claro. La carga dinámica se obtiene al multiplicar la carga viva virtual, por el factor  $(1 + IM/100)$ , para el cual el valor de IM se obtiene de la tabla 4.7; este factor no debe aplicarse a los puentes peatonales ni a la carga uniformemente distribuida.

Tabla 4.7. FACTOR DE CARGA DINAMICA PERMISIBLE

COMPONENTE	IM
Losas con juntas, en todos los estados límites	75%
Otros componentes:	
• Para estado límite de fatiga y fractura	15%
• Otros estados límites	33%

Fuente: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Primera edición. 1994

#### 4.6 Otro tipo de cargas

La fuerza centrífuga  $C$  es función de la velocidad,  $v$ , la gravedad,  $g$ , y el radio de giro,  $R$ :

$$C = \frac{4 v^2}{3 g R} \quad (4.5)$$

La fuerza de frenado será el 25% del peso del eje del vehículo de tres ejes, colocada encima del pavimento a 1,800 mm. Cuando se analicen varios carriles, es válido usar el factor por multiplicidad de carriles.

#### 4.7 Análisis de la superestructura

En esta parte se describe el método simplificado para obtener los momentos de diseño ocasionados por la carga viva, cuando ocurre la flexión longitudinal. Este método se limita a geometrías regulares, puentes rectos, puentes no esviajados, secciones constantes tanto transversalmente como longitudinalmente, volados menores a 2.50 m, entre otras limitantes; para puentes complejos, se requerirán procedimientos más elaborados, como por ejemplo el método del elemento finito.

Este método idealiza el puente como una placa ortotrópica, con la premisa adicional de que la posición de la carga en la dirección longitudinal no afecta la "forma" de la repartición transversal al flexionarse longitudinalmente (fig 4.3). En la figura 4.3 se puede observar también que la distribución del

momento longitudinal en dos diferentes secciones transversales es proporcional una de otra, lo cual constituye la base del método simplificado.

Esta proporción se puede expresar mediante la ecuación 4.6.

$$\frac{M_{x1}}{M_1} \cong \frac{M_{x2}}{M_2} \quad (4.6)$$

donde:

$M_{x1}$ , es el momento longitudinal en cualquier punto de la sección 1

$M_1$ , es el momento longitudinal en la sección 1

$M_{x2}$ , es el momento longitudinal en cualquier punto de la sección 2

$M_2$ , es el momento longitudinal en la sección 2

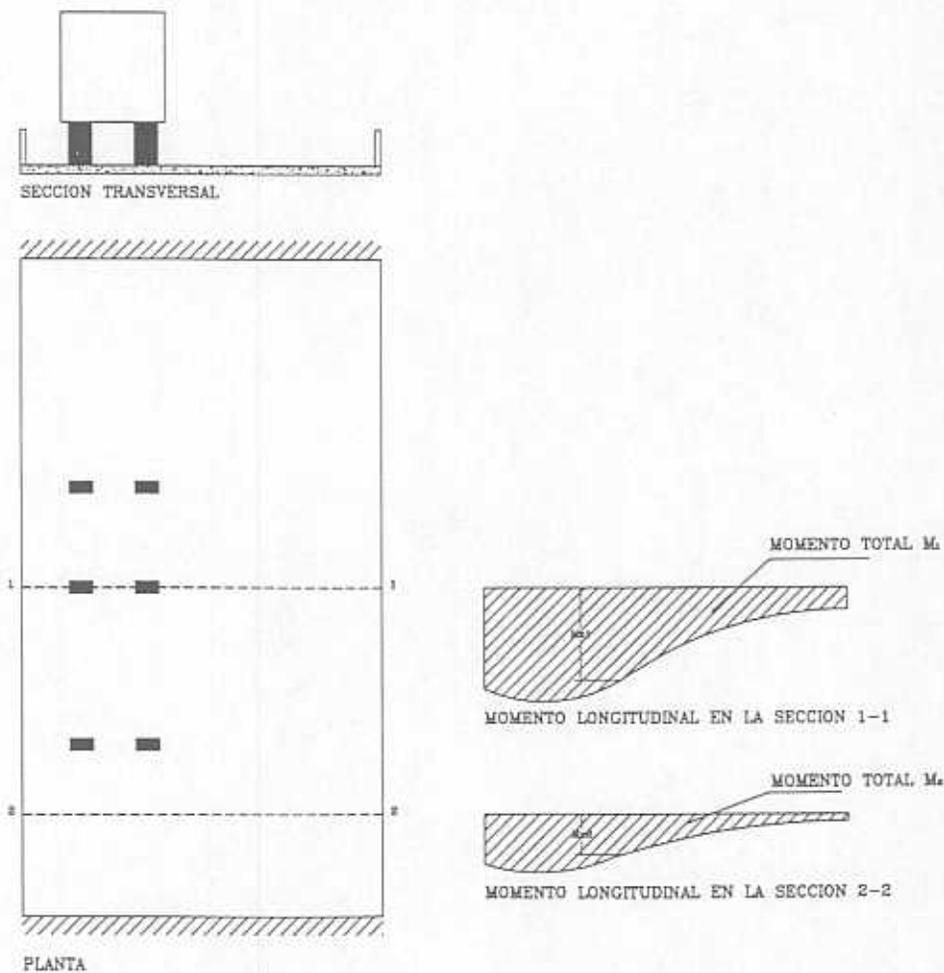


Figura 4.3. Forma de la distribución transversal del momento longitudinal

Para obtener el momento flexionante en una viga en particular, se utiliza la ecuación 4.7, en la cual el cociente S/D trata de representar la fracción de carga que influye en la viga.

$$M_g = \frac{S}{D} M \quad (4.7)$$

donde:

- Mg, momento asociado a una viga en particular
- M, momento longitudinal en la sección considerada
- S, separación de vigas
- D, dado por el reglamento en unidades de longitud

El reglamento proporciona los valores "D" en función del tipo de puente, número de carriles, importancia de la carretera y del estado límite que se esté revisando.

En la figura 4.4 se muestra la distribución del momento Mx a lo largo de la sección transversal, idealizando la losa como una placa ortotrópica. El momento por carga viva en la segunda viga es igual al área bajo la curva asociada a la viga.

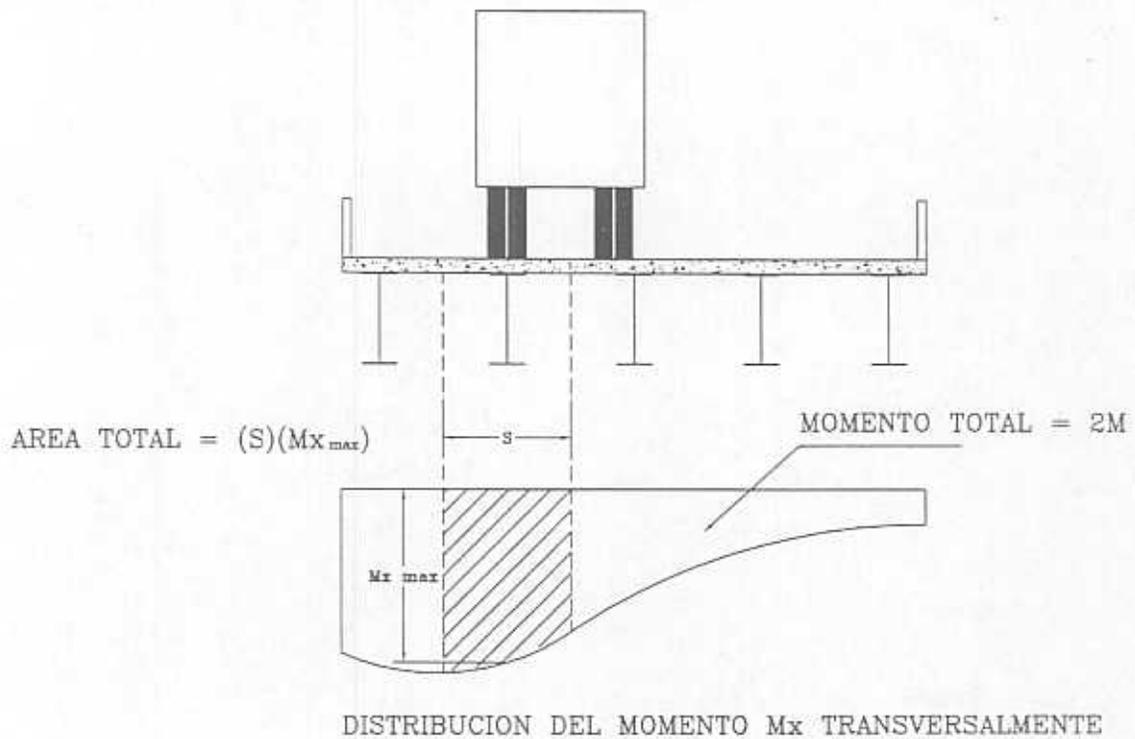


Figura 4.4. Distribución transversal del momento longitudinal

Este método es semejante al de versiones anteriores; sin embargo, esta nueva versión de reglamento refina el cálculo dependiendo del puente analizado, y proporciona valores "D" para muchos tipos de superestructuras.



## **5. Reglamento EUROCODIGO**

### **5.1 Introducción**

El Eurocódigo (ref. 2), es una propuesta de reglamento que trata de unificar criterios, para la construcción y proyecto de la infraestructura de los países pertenecientes a la Comunidad Económica Europea.

Este reglamento maneja el concepto de **carga virtual** en la definición de las cargas vivas para el diseño de puentes. Como ya se mencionó, el concepto de carga virtual sirve para representar condiciones de tráfico y no a un vehículo en particular.

### **5.2 Clasificación de acciones**

Las acciones debidas al tráfico se clasifican en: variables y accidentales; las cuales son representadas a través de varios modelos que más adelante se detallarán.

El tráfico de vehículos, incluyendo su efecto dinámico, es considerado por este reglamento como una *acción variable*. Los valores que da el reglamento para los diferentes tipos de acciones, se clasifican en los siguientes grupos:

- **Valores característicos.-** Son valores estadísticos, definidos para limitar la probabilidad de que sean excedidos durante la vida útil del puente, o bien, son valores nominales.
- **Valores no frecuentes.-** Son valores correspondientes a un período de retorno de un año.
- **Valores frecuentes.-** Son valores correspondientes a un período de retorno de una semana.
- **Valores quasi-permanentes.-** Valores que tienen muy poca variación a lo largo del tiempo.

Las *acciones accidentales* corresponden a colisiones de vehículos con elementos estructurales. Estos valores se utilizan para el diseño de los elementos de protección.

Las cargas debidas al tráfico son producidas por automóviles, camiones y vehículos especiales para transportar cargas no usuales, generalmente excedidos en peso y dimensiones. En la definición del modelo de cargas se utiliza el concepto de cargas virtuales o nocionales, las cuales se definen para representar diferentes efectos de tráfico sobre los puentes.

Para un cierto ancho de calzada, el número de carriles de carga "virtuales", se definen de acuerdo a lo especificado en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1. NÚMERO Y ANCHO DE LOS CARRILES DE CARGA**

Ancho de calzada "W"	Número de carriles de carga virtuales	Ancho del carril de carga virtual	Ancho del área remanente "W <sub>r</sub> "
$W < 5.4 \text{ m}$	$n = 1$	3 m	$W - 3$
$5.4 \text{ m} \leq W < 9 \text{ m}$	$n = 2$	$W/2$	0
$6 \leq W$	$n = \text{int}(W/3)$	3 m	$W - 3n$

Fuente: EUROCODE 1 Basis of design and actions on structures. Part 3 :Traffic loads on bridges.

En la figura 5.1, se presenta un ejemplo de la forma en que se manejan los carriles de carga virtuales. En la misma figura se puede observar que existe una franja sin carga (remanente) entre cada carril de carga.

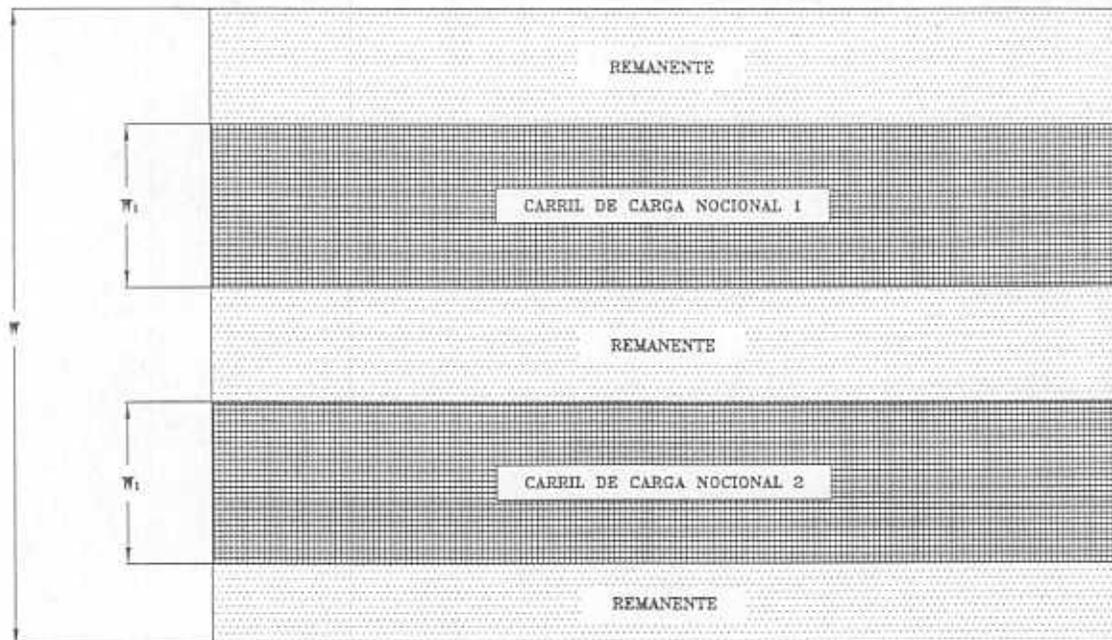


Figura 5.1. Arreglo típico para el manejo de los carriles de carga virtuales

### 5.3 Valores característicos de las cargas verticales

Las cargas características dadas por el reglamento, están de acuerdo con las teorías de diseño basadas en la verificación de estados últimos y condiciones de servicio (LRFD).

Los modelos de carga propuestos representan los siguientes efectos de tráfico:

**Modelo de carga 1.-** Carga concentrada más una carga uniforme, las cuales tratan de representar el efecto del tráfico de camiones y automóviles. Este modelo puede ser usado para verificaciones globales y locales.

**Modelo de carga 2.-** Carga con un eje longitudinal sobre un área de contacto de la llanta. Este modelo cubre el efecto dinámico del tráfico normal en elementos estructurales de longitud corta. Este modelo se emplea para verificaciones locales.

**Modelo de carga 3.-** Es un conjunto de cargas por ejes para representar cargas especiales. Este modelo se utiliza para verificaciones generales y locales.

**Modelo de carga 4.-** Carga de congestionamiento. Este modelo se utiliza para verificaciones generales.

A continuación se describen con más detalle los modelos de carga 1 y 2, los cuales son los más utilizados en el diseño.

## 5.4 Modelo de carga 1

Este sistema de cargas está formado por dos sistemas parciales:

- a) Carga concentrada en dos ejes (tándem), en el que cada eje tiene un peso dado por

$$\alpha_0 Q_k \quad (5.1)$$

donde  $\alpha_0$  es un factor de ajuste.

No se debe utilizar más de un tándem por carril de carga.

- b) Carga uniformemente distribuida, con un valor por metro cuadrado dado por:

$$\alpha_q q_k \quad (5.2)$$

donde  $\alpha_q$  es un factor de ajuste.

Esta carga se utiliza de manera que produzca los efectos más desfavorables tanto longitudinal como transversalmente.

En la tabla 5.2 se dan los valores básicos de las cargas  $Q_k$  y  $q_k$ , en los cuales se incluye la amplificación por el efecto dinámico (factor de impacto).

Tabla 5.2 VALORES BASICOS DE LAS CARGAS

Localización	Sistema de Tándem Cargas por eje $Q_{jk}$ (kN)	Sistema carga uniforme $q_{ik}$ o $q_{rk}$ (kN/m <sup>2</sup> )
Carril número 1	300	9
Carril número 2	200	2.5
Carril número 3	100	2.5
Otro carriles	0	2.5
Area remanente ( $q_{rk}$ )	0	2.5

Fuente: EUROCODE 1 Basis of design and actions on structures. Part 3 :Traffic loads on bridges.

En la figura 5.2 se muestra gráficamente la utilización de este modelo de cargas.

Los valores de los factores  $\alpha_{ci}$  y  $\alpha_{qi}$  pueden ser ajustados para diferentes situaciones de tráfico. En ausencia de estudios, se pueden utilizar estos factores iguales a uno.

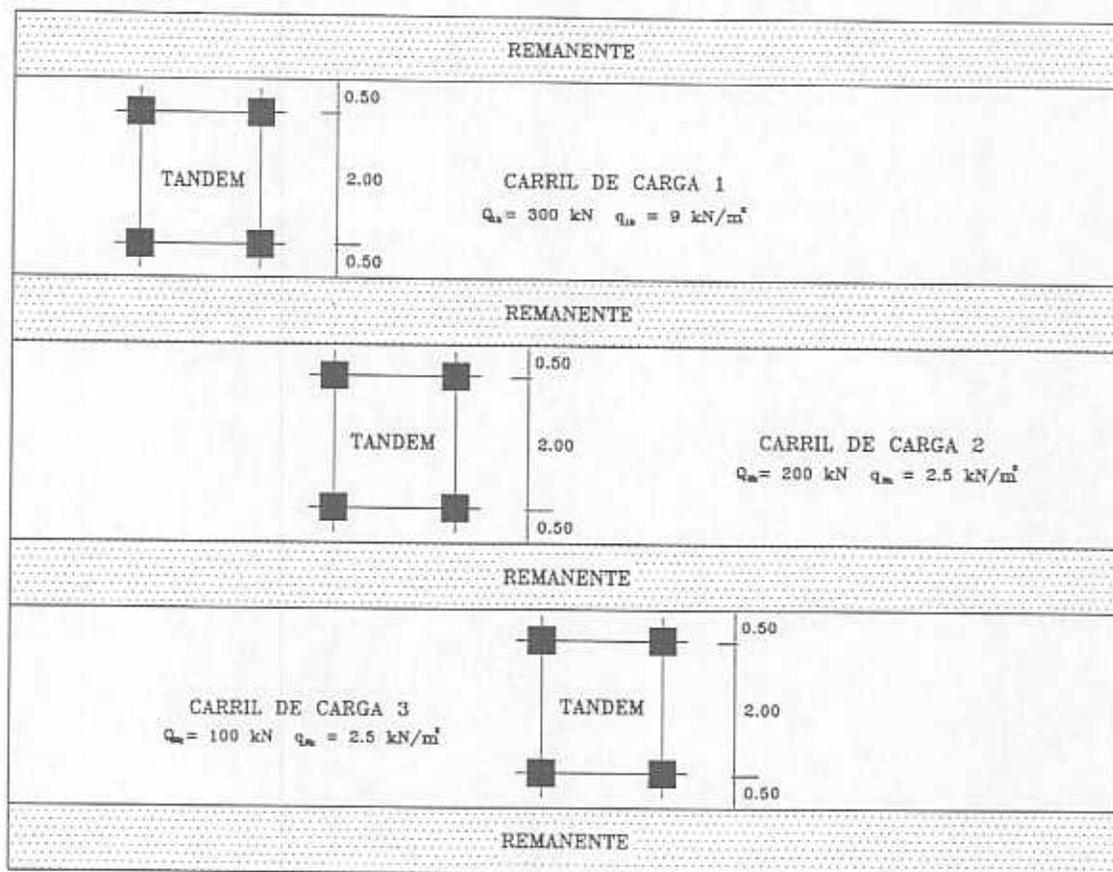
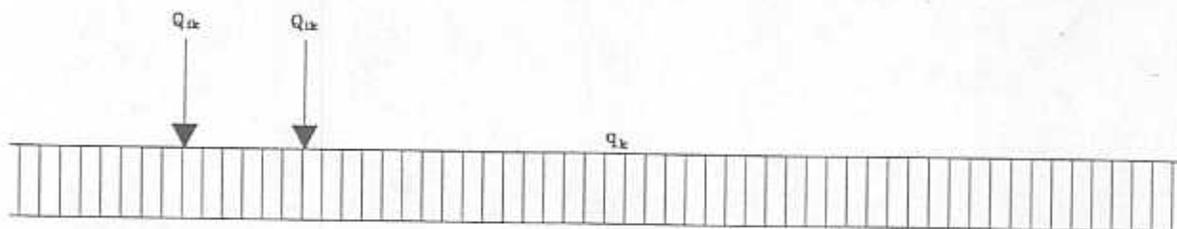


Figura 5.2. Modelo de carga 1

En la figura 5.2 se muestra el caso de un puente, con un ancho de calzada de tres carriles de carga, y se puede ver la manera en que este modelo de carga utiliza la carga uniforme y las cargas concentradas dadas por el tándem. Se puede apreciar también la disminución de los valores, a medida de que se aumentan el número de carriles cargados.

## 5.5 Modelo de carga 2

Este modelo da una carga por eje de:

$$\beta_Q Q_{ak} \quad (5.3)$$

donde:

$$Q_{ak} = 400 \text{ kN (con el factor de amplificación dinámica incluido)}$$

Cuando se requiera utilizar sólo una rueda, se empleará  $Q_{ak} = 200 \text{ kN}$ .

Si no se tienen mejores valores de  $\beta_Q$ , se tomará igual a  $\alpha_{Q1}$ . La figura 5.3 muestra gráficamente este modelo de carga.

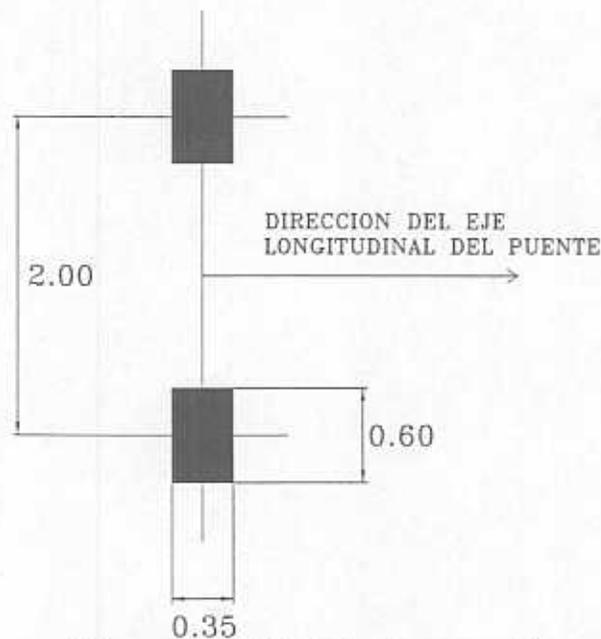


Figura 5.3. Modelo de carga 2



## **6. Reglamento de pesos y dimensiones de México**

---

La norma oficial sobre "pesos y dimensiones" (ref. 4) tiene por objeto regular el peso, dimensiones y capacidad a la cual se deben sujetar los vehículos de autotransporte de pasajeros, de turismo y de carga que transiten en los caminos de jurisdicción federal. Esta norma apareció publicada en el Diario Oficial, el 4 de septiembre de 1995.

Los diferentes vehículos que aparecen en dicha norma son:

- Autobuses "B",
- Camión unitario "C",
- Camiones con remolque "CR",
- Tractocamiones articulados "TS"
- Tractocamiones doblemente articulados "TSR"

A cada sigla se le adiciona el número correspondiente al número de ejes, por ejemplo T3-S3, corresponde a un tractocamión de tres ejes con un semirremolque de tres ejes.

En la tabla 6.1 se muestran las cargas máximas autorizadas por eje.

En esta norma vienen definidos los pesos brutos vehiculares (PBV), para todas las configuraciones de vehículos autorizados y para diferentes clases de caminos. En la tabla 6.2 se presentan los pesos autorizados para caminos tipo A4 y A2.

La norma permite un incremento en los pesos brutos vehiculares, si el vehículo está equipado con suspensión neumática o equivalente en todos sus ejes, con excepción en el eje direccional.

**Tabla 6.1. PESOS MÁXIMOS AUTORIZADOS, POR EJE Y TIPO DE CAMINO**

CONFIGURACIÓN DE EJES	TIPO DE CAMINO			
	A4 Y A2	B4 Y B2	C	D
Sencillo, con dos llantas	6.50	6.50	5.50	5.00
Motriz sencillo, con dos llantas	7.00	7.00	6.00	5.50
Sencillo, con cuatro llantas	10.00	10.00	9.00	8.00
Motriz, con cuatro llantas	11.00	11.00	10.00	9.00
Doble o tándem, con cuatro llantas	11.00	11.00	10.00	9.00
Motriz doble o tándem, con cuatro llantas	12.50	12.50	11.00	10.00
Doble o tándem, con seis llantas	14.50	14.50	13.00	11.50
Motriz doble o tándem, con seis llantas	15.50	15.50	14.00	12.50
Doble o tándem, con ocho llantas	18.00	18.00	16.00	14.00
Motriz doble o tándem, con ocho llantas	19.50	19.50	17.50	15.50
Triple o tridem, con seis llantas	14.00	14.00	12.50	11.50
Motriz triple o tridem, con seis llantas	15.50	15.50	14.00	12.50
Triple o tridem, con doce llantas	22.50	22.50	20.00	18.00
Motriz triple o tridem, con doce llantas	24.50	24.50	22.00	19.50

Fuente: Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-1995, publicada en Diario Oficial el 4 de septiembre de 1995

**Tabla 6.2. PESOS BRUTOS VEHICULARES (PBV) Y LONGITUDES MÁXIMOS AUTORIZADOS, PARA LOS CAMINOS A4 Y A2**

CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO	NUMERO DE LLANTAS	PBV (ton)	LONGITUD DEL VEHÍCULO (m)
B2	4	13.5	14.0
	6	17.5	14.0
B3	6	19.0	14.0
	8	22.0	14.0
	10	26.0	14.0
B4	10	26.5	14.0
	12	30.5	14
C2	4	13.5	14.0
	6	17.5	14.0
C3	6	19.0	14.0
	10	26.0	14.0
C2-R2	8	26.5	28.5
	14	37.5	28.5
	10	32.0	28.5
	18	46.0	28.5
C3-R3	12	36.5	28.5
	22	54.0	28.5
T2-S1	8	24.0	20.8
	10	27.5	20.8
T2-S2	10	28.5	20.8
	14	35.5	20.8
	18	44.0	20.8
T3-S2	18	44.0	20.8
T3-S3	16	40.0	20.8
	22	48.5	20.8
T2-S1-R2	12	37.0	28.5
	18	47.5	28.5
T3-S1-R2	16	45.5	28.5
	22	56.0	28.5
T3-S2-R2	18	50.0	28.5
	26	60.5	28.5
T3-S2-R4	22	59.0	28.5
	34	66.5	28.5

Fuente: Propia con datos de "Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-1995", publicada en Diario Oficial el 4 de septiembre de 1995



## ***7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes***

---

### **7.1 Introducción**

El Instituto Mexicano del Transporte y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, a través de la Dirección General de Servicios Técnicos, realizan desde el año de 1991, un estudio denominado "de pesos y dimensiones", con el objetivo de conocer el comportamiento del transporte carretero en México.

La información se recaba en estaciones ubicadas en diferentes puntos de la República Mexicana, en las cuales se levanta una encuesta con la que se obtiene información sobre el origen y destino de la carga, tipo de carga, tipo de servicio, forma de empaque y tipo del vehículo. Además de la encuesta, el vehículo es pesado y medido con pesadoras del tipo dinámico, las cuales proporcionan: peso total del vehículo, peso por eje, longitud total y la longitud de cada entre eje.

La precisión de estas pesadoras es del orden de "más-menos" 15 %. Esta precisión depende del lugar donde se coloque la pesadora, y la manera en que los vehículos pasen por los tapetes pesadores. La SCT y el IMT han realizado pruebas para determinar la exactitud de las pesadoras dinámicas, y las condiciones que deben cumplir para mejorar los resultados. Estas pruebas han consistido, fundamentalmente, en que para un vehículo, el cual se pesa en una pesadora estática, se le pasa por una pesadora dinámica con diferentes velocidades, y con condiciones diversas del pavimento.

Por esta razón, en la elección del punto de pesaje, se busca que las pesadoras se coloquen en una superficie horizontal y que el pavimento se encuentre en buen estado, para mejorar la calidad de los resultados. En la estación de pesaje, las pesadoras se colocan a una distancia de 100 m del sitio de la encuesta, y se guía a los vehículos para que pasen por las pesadoras con una velocidad constante.

Para los análisis de este trabajo, se utilizó la información recabada en 1993, la cual se obtuvo de 15 estaciones distribuidas como se muestra en el mapa

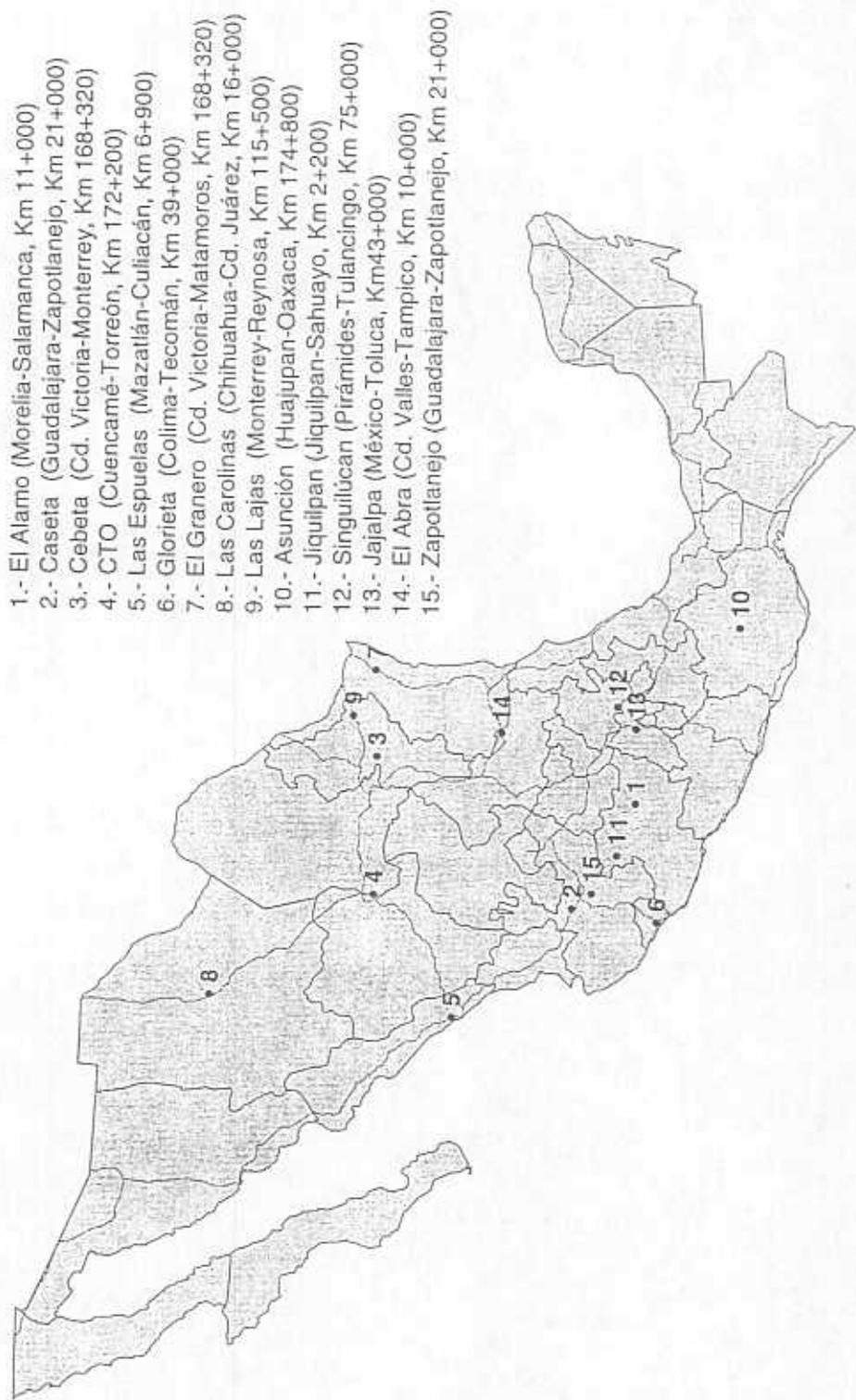


Figura 7.1 Ubicación geográfica de las estaciones de pesos y dimensiones de 1993

de la figura 7.1.

Para el cálculo de los elementos mecánicos que las cargas vivas producen en los puentes, no es la carga bruta vehicular la variable más importante, sino las cargas que se transmiten por cada eje del vehículo y las separaciones o distancias que se tienen entre cada dos ejes consecutivos. Debido a esto, en este capítulo se analizan estadísticamente todas estas variables, así como los elementos mecánicos (momentos flexionantes y fuerzas cortantes) que éstos ocasionan en puentes tipo de un solo claro, simplemente apoyados.

## **7.2 Número total de vehículos considerados**

Para este análisis se consideraron los vehículos C-2, C-3, T3-S2, T3-S3 y T3-S2-R4, ya que son los que aparecen con mayor frecuencia en las muestras. En la figura 7.2 se presenta una gráfica con la muestra de los vehículos utilizados para este estudio. Uno de los problemas que se tuvieron fue la de clasificar a los vehículos de acuerdo con la clasificación que maneja la SCT, ya que las pesadoras clasifican a los vehículos de acuerdo con el sistema utilizado en Inglaterra. Para realizar esta clasificación se hizo un programa de cómputo, el cual, para cada uno de los registros de las bases de datos, revisa el número de ejes cargados y las distancias entre ejes, y los compara con una tabla que contiene los rangos de valores típicos para los vehículos de acuerdo con el sistema de la SCT.

Otro problema que se tuvo fue el de determinar cuales vehículos de la muestra estaban cargados. Para resolver este problema, se utilizaron los valores promedio de los pesos de vehículos vacíos que se reportan en la referencia 7. A estos valores se les incrementó un 15% para tomar en cuenta el coeficiente de variación de los promedios.

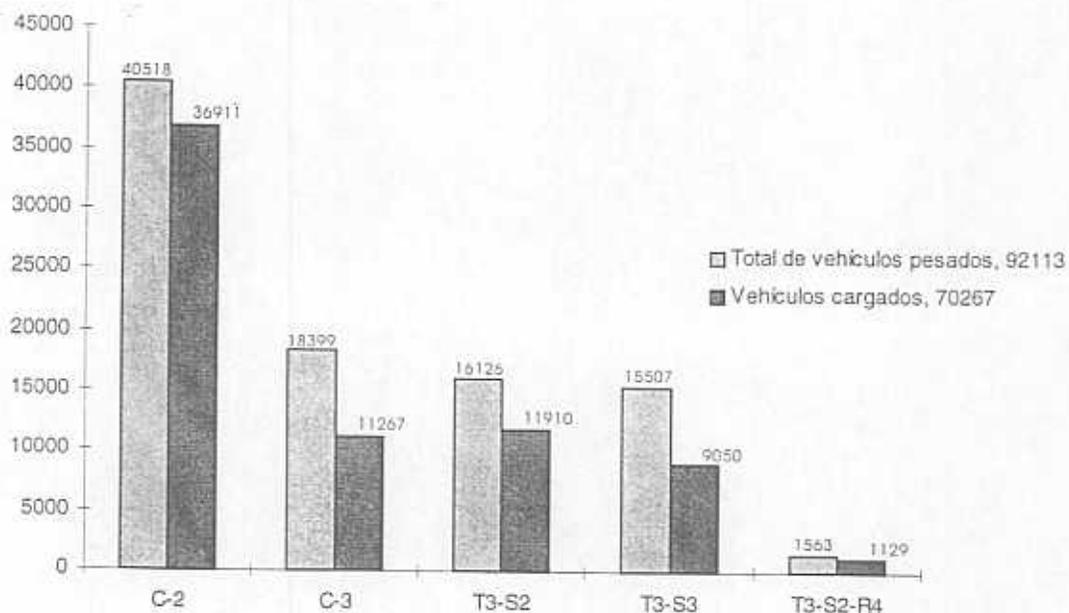


Figura 7.2 Número de vehículos incluidos en el análisis

### 7.3 Pesos brutos vehiculares

En las figuras 7.3 a 7.7 se muestran los histogramas correspondientes al peso bruto vehicular de los vehículos cargados, incluyendo el total de las estaciones de pesaje. En ellas se han anotado la media, desviación estándar, el coeficiente de variación, los valores mínimo y máximo y el tamaño de la muestra de cada caso.

Para el caso del vehículo C-2, figura 7.3, se observan dos poblaciones; esto debido a que no existe uniformidad en las dimensiones de los vehículos y en la capacidad de carga. En los catálogos de vehículos consultados, se encontraron vehículos C-2, con distancias entre ejes que van desde 3.4 m hasta casi 7.0 m, y con capacidades de carga muy diversas. También se puede observar que un 4.96 % de vehículos exceden el peso máximo autorizado de 17,500 kg (tabla 7.1).

Con relación al vehículo C-3, figura 7.4, la situación en cuanto a dimensiones y tipos es muy parecida a la del vehículo C-2, encontrándose para este caso un 21.56 % de vehículos excedidos, con respecto al peso autorizado de 26,000 kg.

Para los vehículos T3-S2, figura 7.5, también se identifican varias poblaciones en cuanto al peso bruto vehicular se refiere; se puede observar una cantidad de vehículos importante agrupada alrededor de los 22,000 kg y otra por los 40,000 kg. Esto podría deberse a que la tara de los vehículos es mayor a la que se consideró. Por otro lado, se encontró un 18.04 % de excedidos con respecto al peso máximo autorizado de 44,000 kg.

En la figura 7.6 se puede observar el caso de los vehículos T3-S3, uno de los vehículos de carga pesada más comunes en México. En este caso, existe una mayor uniformidad en lo que al peso bruto vehicular se refiere, aunque también se puede ver un comportamiento extraño para pesos bajos, debido también al valor del peso del vehículo vacío. Para este caso, se encontró que un 46.75 % de los vehículos van excedidos, con un valor promedio por encima del autorizado de 48,500 kg y un peso máximo observado de 102,160 kg.

Por último, en los vehículos T3-S2-R4 (figura 7.7), se encontraron también dos poblaciones de pesos, aunque no tan bien definidas como los otros casos; una se agrupa por los 36,000 kg y la otra por los 76,000 kg. Con relación al porcentaje de excedidos, se encontró un 43.44 % con respecto al peso autorizado de 66,500 kg.

Tabla 7.1. VALORES PROMEDIO DE LOS PESOS BRUTOS VEHICULARES Y PORCENTAJE DE VEHÍCULOS EXCEDIDOS

Vehículo	PBV prom. (kg)	PBV autorizado <sup>2</sup> (kg)	% de vehículos excedidos <sup>3</sup>
C-2	11,268 (0.356) <sup>1</sup>	13,500 (4 llantas)	28.16 (4 llantas)
		17,500 (6 llantas)	4.96 (6 llantas)
C-3	22,825 (0.339)	19,000 (6 llantas)	37.86 (6 llantas)
		26,000 (10 llantas)	21.56 (10 llantas)
T3-S2	35,557 (0.337)	44,000 (18 llantas)	18.04 (18 llantas)
T3-S3	58,894 (0.216)	40,000 (16 llantas)	51.91 (16 llantas)
		48,500 (22 llantas)	46.75 (22 llantas)
T3-S2-R4	71,150 (0.319)	59,000 (22 llantas)	49.84 (22 llantas)
		66,500 (34 llantas)	43.44 (34 llantas)

<sup>1</sup> Los valores dentro de los paréntesis son los coeficientes de variación

<sup>2</sup> Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-1995, publicada en el Diario Oficial el 4 de septiembre de 1995

<sup>3</sup> Estos porcentajes fueron calculados con respecto al total de los vehículos pesados

Fuente: Propia, con los datos de los histogramas generados a partir de las bases de datos de pesos y dimensiones del año 1993

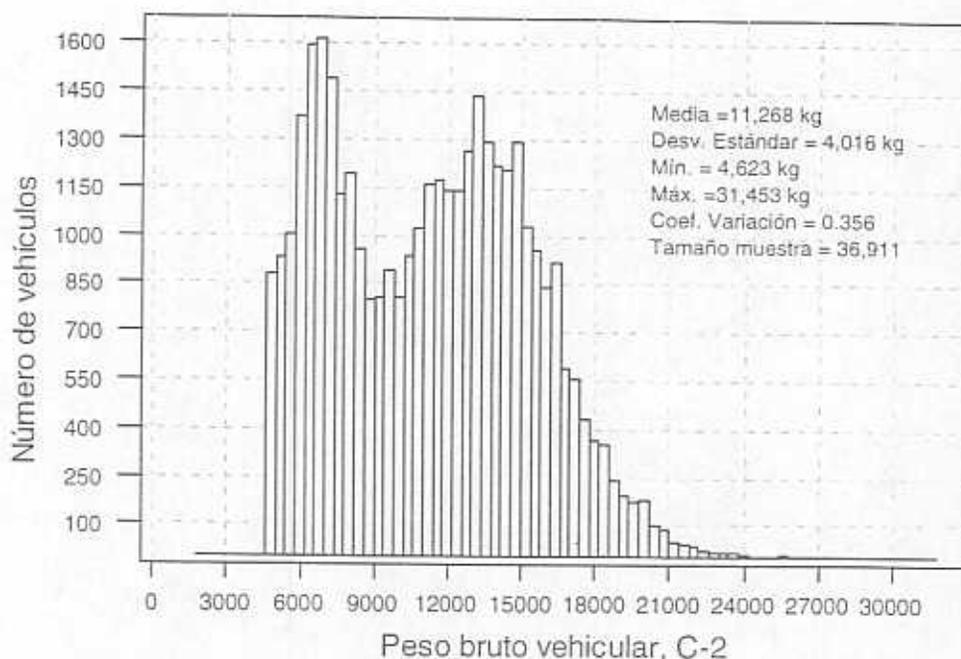


Figura 7.3 Peso bruto vehicular de vehículos cargados C-2, en kg

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

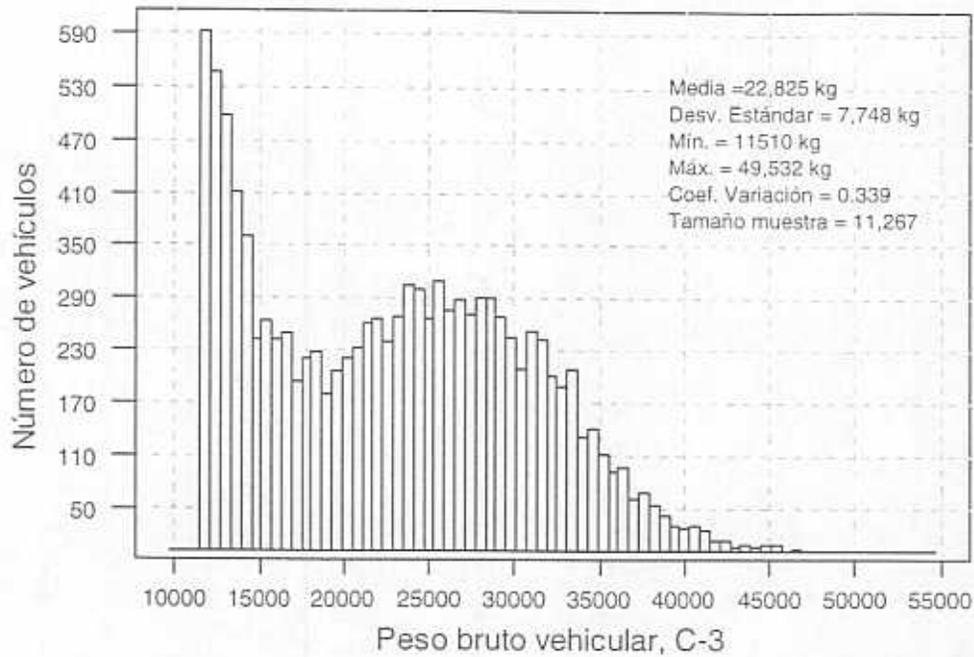


Figura 7.4 Peso bruto vehicular de vehículos cargados C-3, en kg

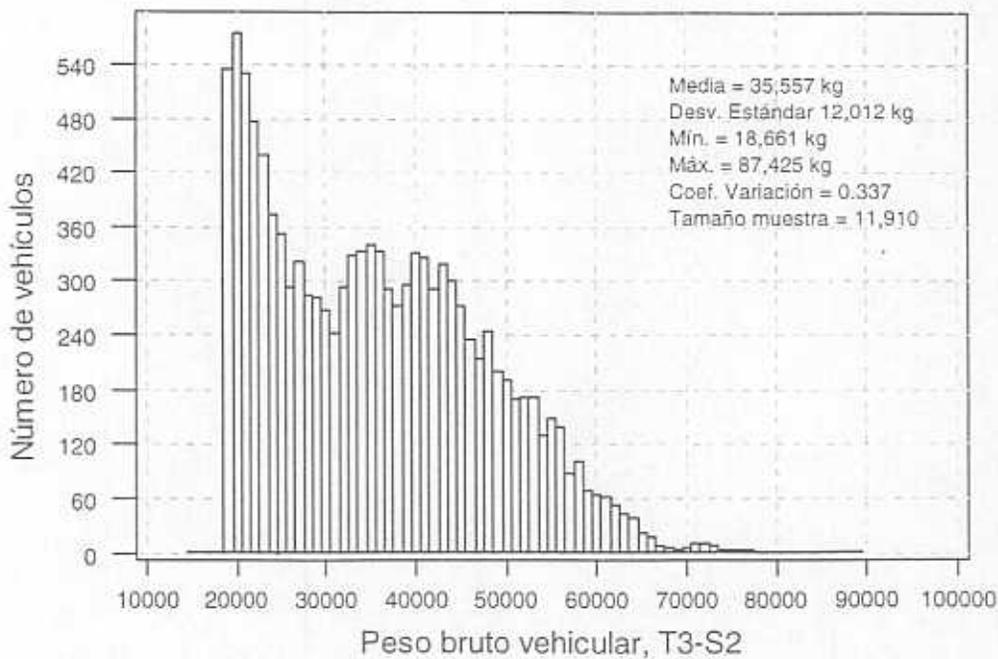


Figura 7.5 Peso bruto vehicular de vehículos cargados T3-S2, en kg

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

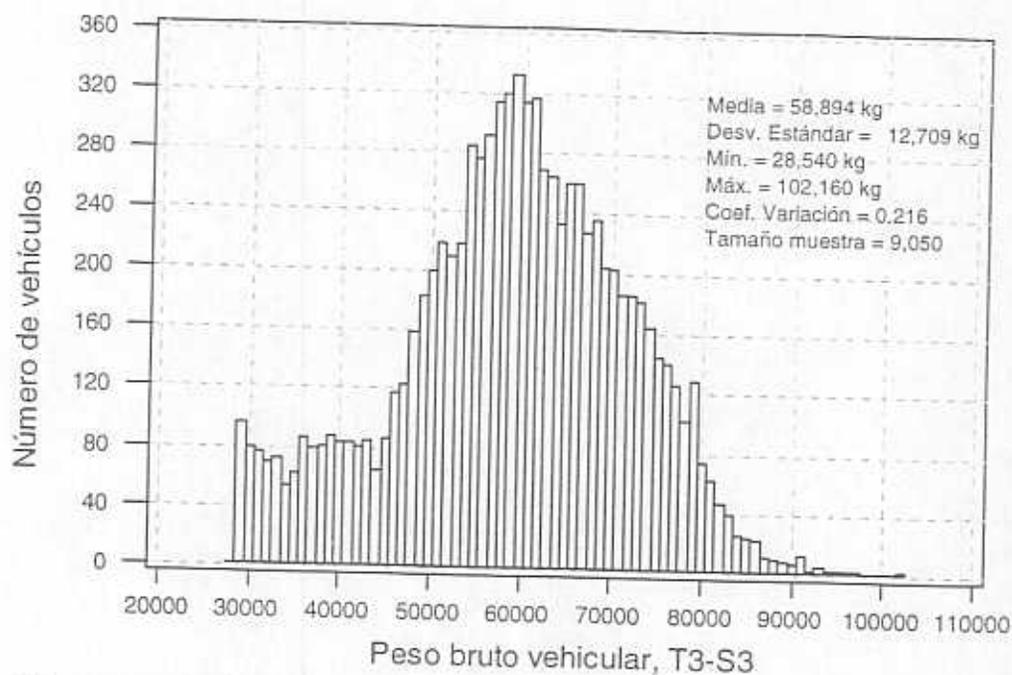


Figura 7.6 Peso bruto vehicular de vehículos cargados T3-S3, en kg

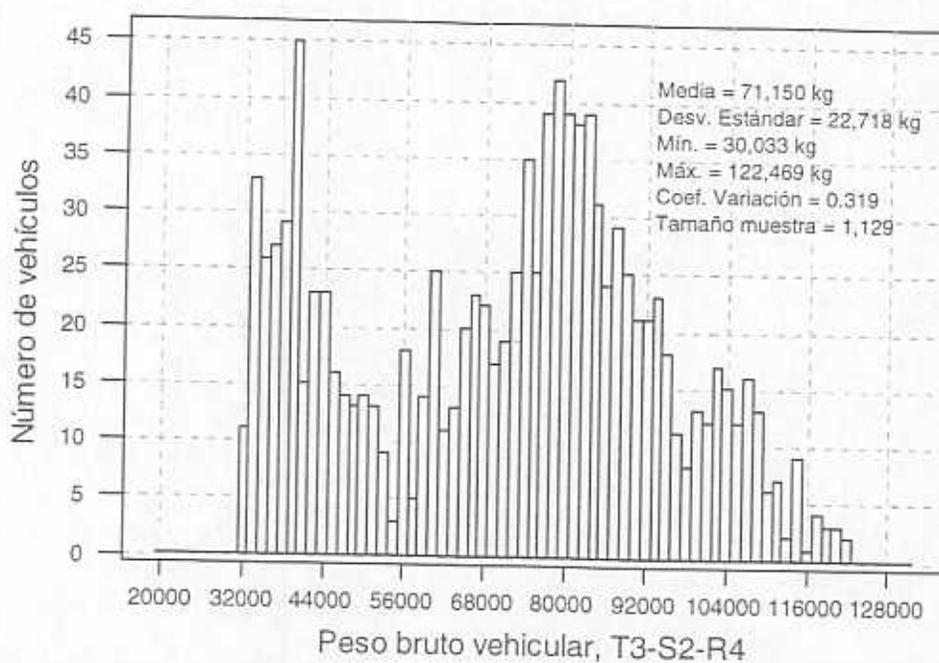


Figura 7.7 Peso bruto vehicular de vehículos cargados T3-S2-R4, en kg

## 7.4 Cargas por eje

Una de las variables más importantes para analizar los efectos que provocan los vehículos a los puentes, son las cargas por eje, ya que los momentos y cortantes dependen directamente de la magnitud y separación de éstas. En las figuras 7.8 a 7.32, se muestran los histogramas correspondientes a cada tipo de vehículo, en cada una de ellas se tienen los valores de la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación, los valores mínimo y máximo, y el tamaño de la muestra. En la tabla 7.2 se presenta un resumen con los valores promedio.

Tabla 7.2. VALORES PROMEDIO DE LAS CARGAS POR EJE EN KG

Vehículo	Eje 1	Eje2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6	Eje 7	Eje 8	Eje 9
C-2	3,295 (0.348) <sup>1</sup>	7,970.3 (0.411)							
C-3	4,301 (0.263)	9,347.1 (0.386)	9,177.2 (0.426)						
T3-S2	4,104.5 (0.195)	7,791.7 (0.344)	7,757.2 (0.352)	7,737.6 (0.449)	8,166.4 (0.449)				
T3-S3	4,179.4 (0.189)	11,288 (0.226)	11,330 (0.229)	10,458 (0.289)	10,582 (0.272)	11,057 (0.286)			
T3-S2-R4	4,298 (0.186)	8,771.3 (0.305)	8,553.8 (0.317)	9,150 (0.358)	9,191 (0.376)	7,562.8 (0.384)	6,877.5 (0.396)	8,845 (0.403)	8,481 (0.420)

<sup>1</sup> Los valores dentro de los paréntesis son los coeficientes de variación

Fuente: Propia, con los datos de los histogramas generados a partir de las bases de datos de pesos y dimensiones del año 1993

El vehículo C-2 tiene una carga promedio en el eje trasero de 7,970.3 kg, lo cual, comparándolo con el autorizado para ejes de dos llantas, está 22.6 % excedido. Si se compara con el peso autorizado por eje, considerando ejes con cuatro llantas, se puede ver que los valores promedio están dentro de los permitidos por el reglamento.

En el caso del vehículo C-3, los dos ejes traseros forman lo que se llama un tándem doble. La carga total asociada al tándem doble se obtiene sumando

## *7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes*

---

los dos últimos ejes, lo cual, para el vehículo C-3, da 18,524.3 kg. El valor autorizado para un tándem doble con cuatro llantas es de 11,000 kg, con lo cual se observa que los vehículos C-3, en promedio, para el tándem trasero, están excedidos en un 68.4 %.

Los dos últimos ejes del vehículo T3-S2 forman un tándem doble con ocho llantas, con un peso autorizado de 18,000 kg. Si se suman los dos ejes traseros, da 15,904 kg, con lo cual se puede ver que este valor promedio está por debajo del autorizado.

Con respecto al vehículo T3-S3, los tres ejes traseros forman lo que se llama un tándem triple, con peso autorizado de 22,000 kg para el caso de 12 llantas. Si sumamos los promedios de los últimos tres ejes, se obtiene 32,097 kg, lo que representa una exceso en el valor autorizado del 45.9 %.

Por último, para el vehículo T3-S2-R4, se tienen cuatro tándems dobles de ocho llantas, con peso autorizado de 18,000 kg por tándem. Los cuatro tándems dobles que se forman tienen los siguientes pesos, comenzando con el eje delantero: 17,325.1, 18,341, 14,440 y 16,826 kg. Comparándolos con el autorizado de 18,000 kg, se observa que en términos generales la norma se cumple.

De este análisis, se puede ver que los mayores sobrepesos se encuentran en los vehículos T3-S3, los cuales, comúnmente, se refuerzan en su suspensión y chasis para poder manejar mayores volúmenes de carga.

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

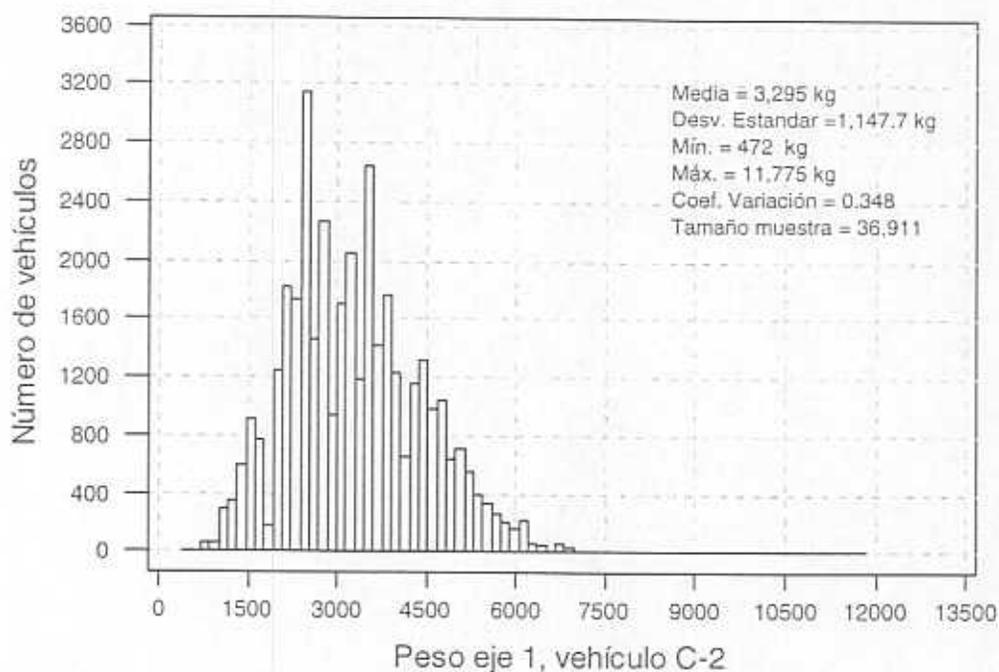


Figura 7.8 Peso primer eje vehículo C-2, en kg

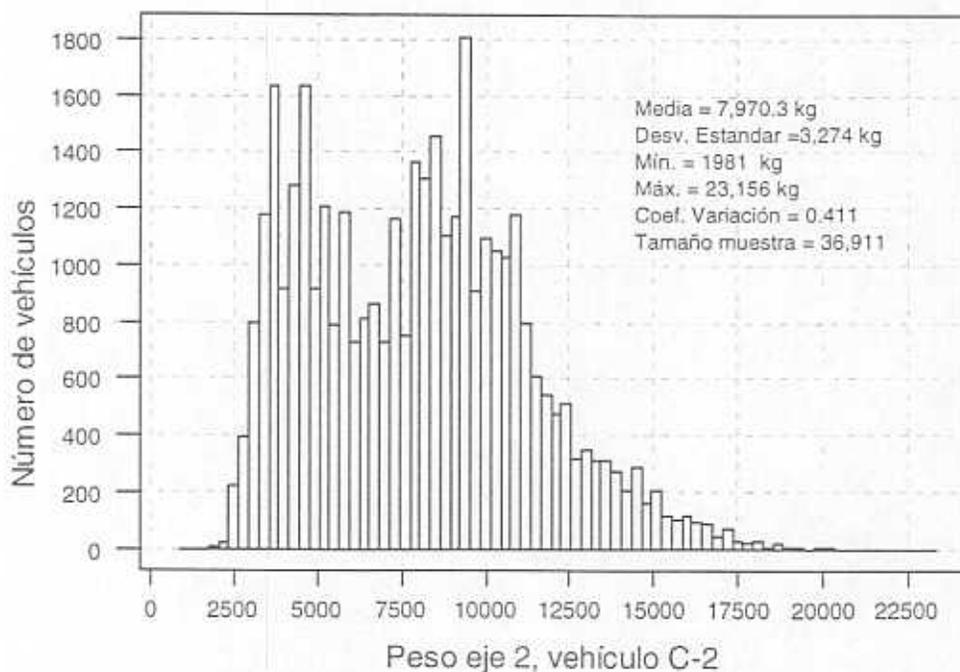


Figura 7.9 Peso segundo eje vehículo C-2, en kg

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

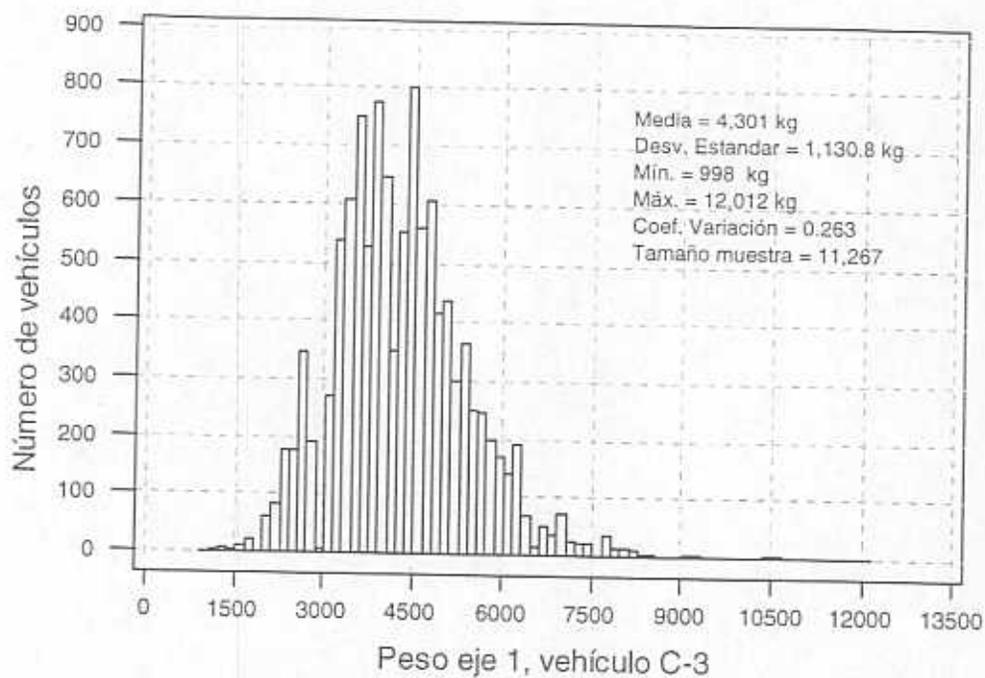


Figura 7.10 Peso primer eje vehículo C-3, en kg

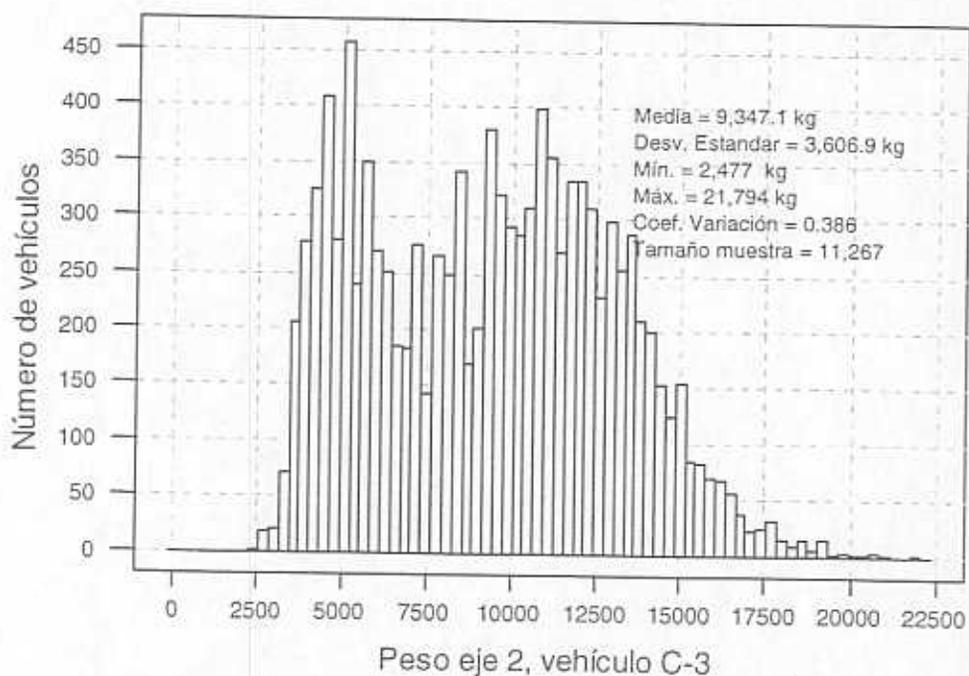


Figura 7.11 Peso segundo eje vehículo C-3, en kg

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

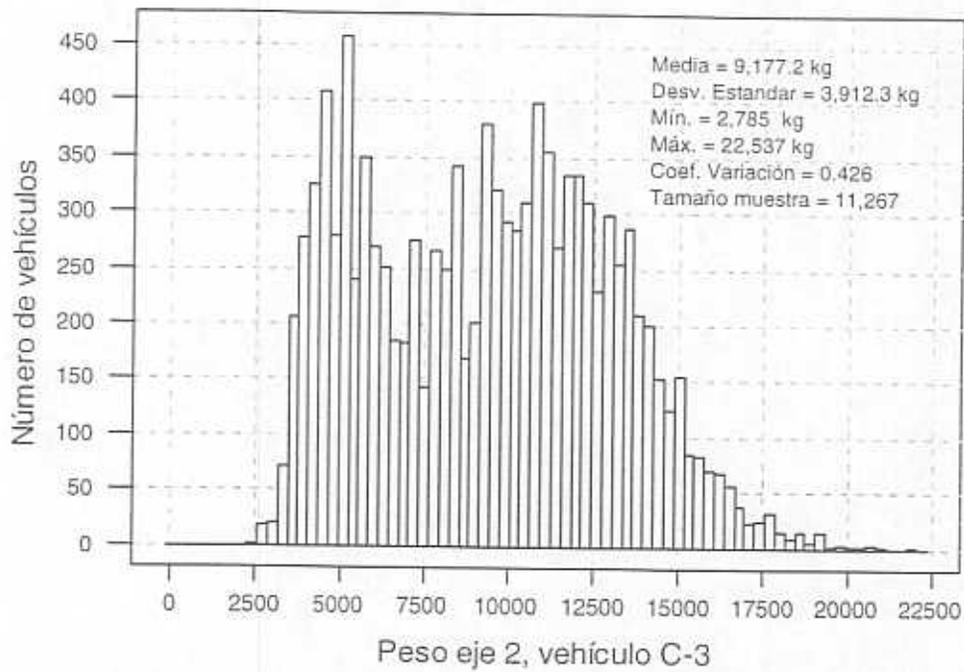


Figura 7.12 Peso tercer eje vehículo C-3, en kg

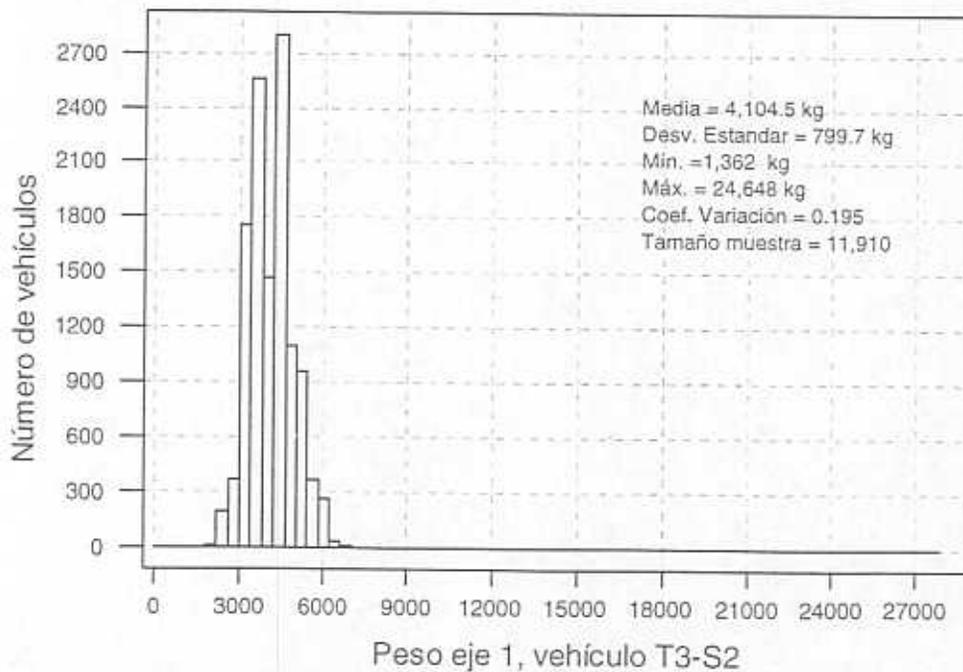


Figura 7.13 Peso primer eje vehículo T3-S2, en kg

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

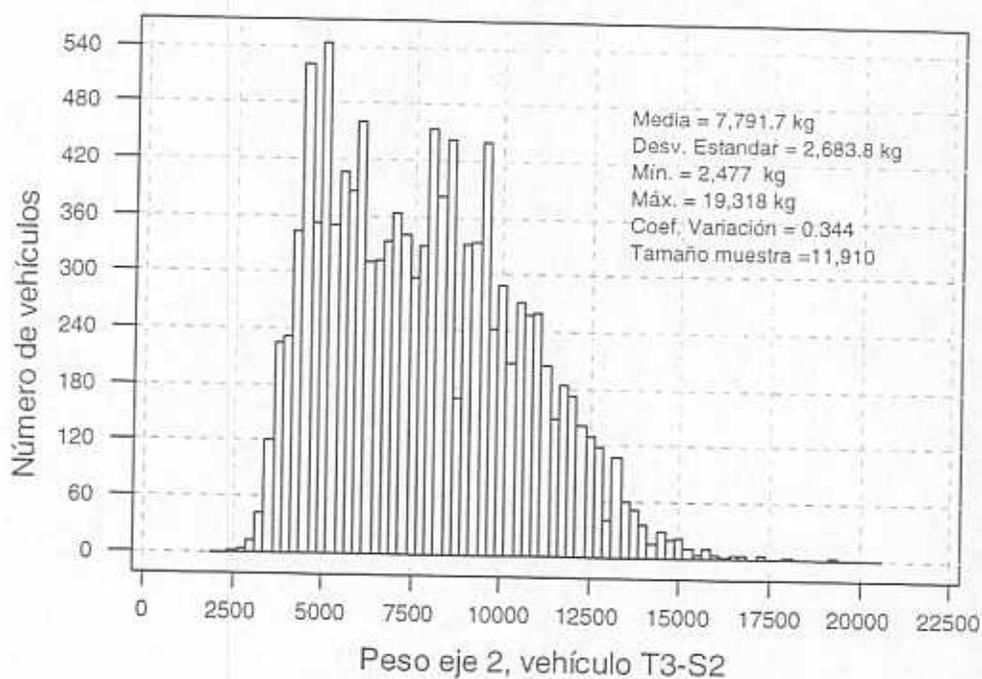


Figura 7.14 Peso segundo eje vehículo T3-S2, en kg

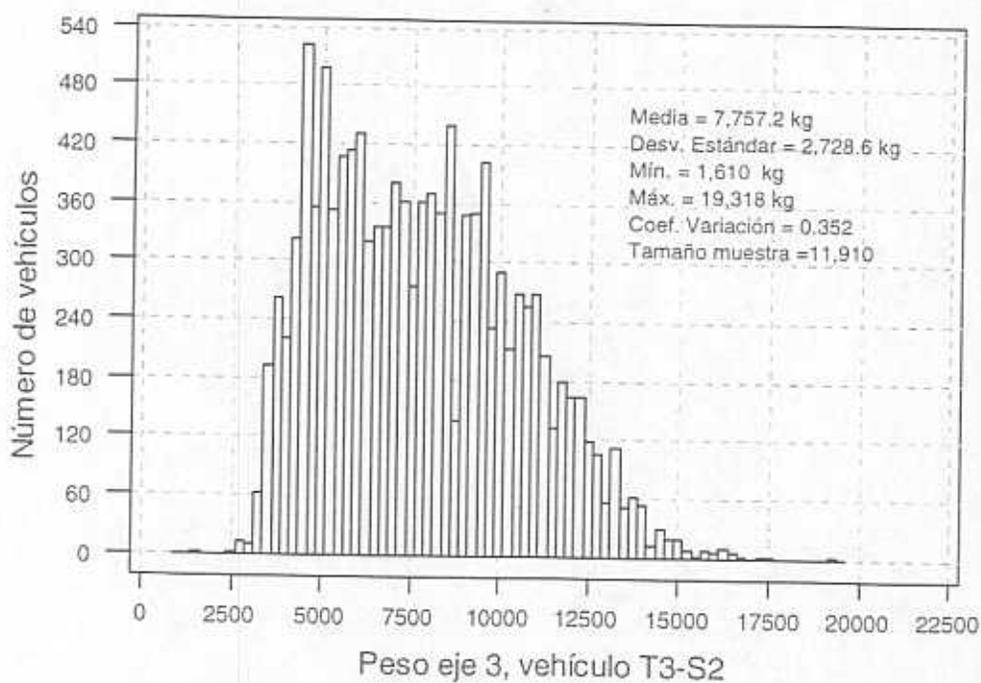


Figura 7.15 Peso tercer eje vehículo T3-S2, en kg

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

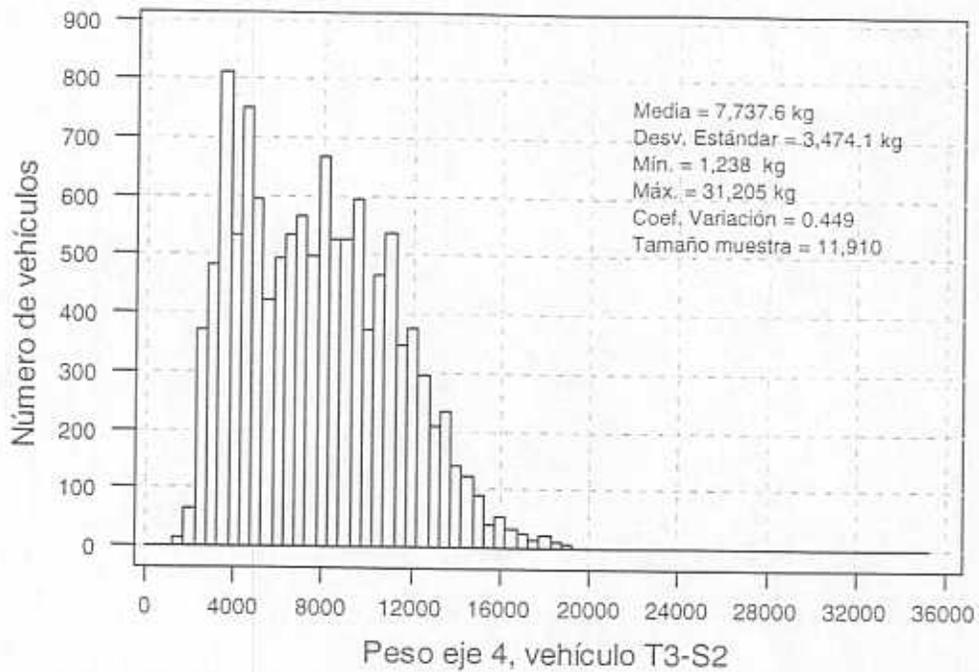


Figura 7.16 Peso cuarto eje vehículo T3-S2, en kg

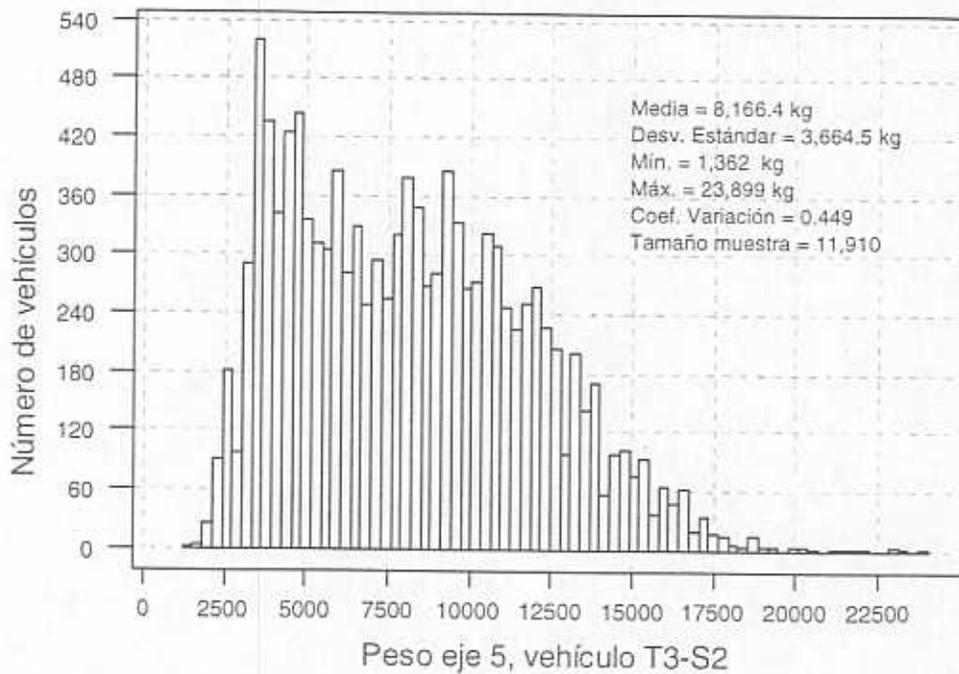


Figura 7.17 Peso quinto eje vehículo T3-S2, en kg

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

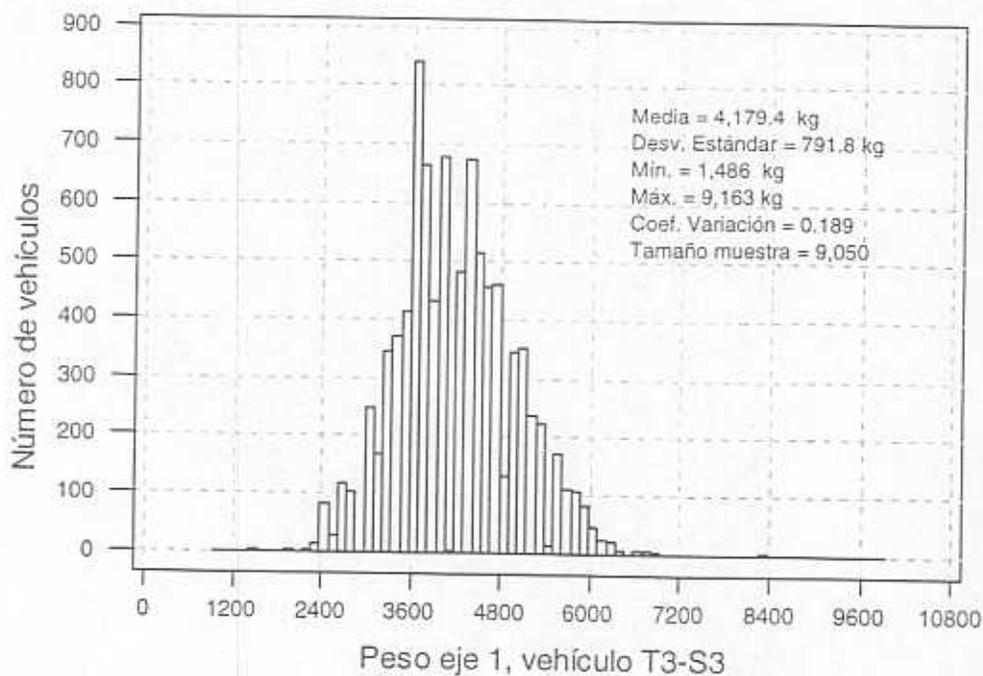


Figura 7.18 Peso primer eje vehículo T3-S3, en kg

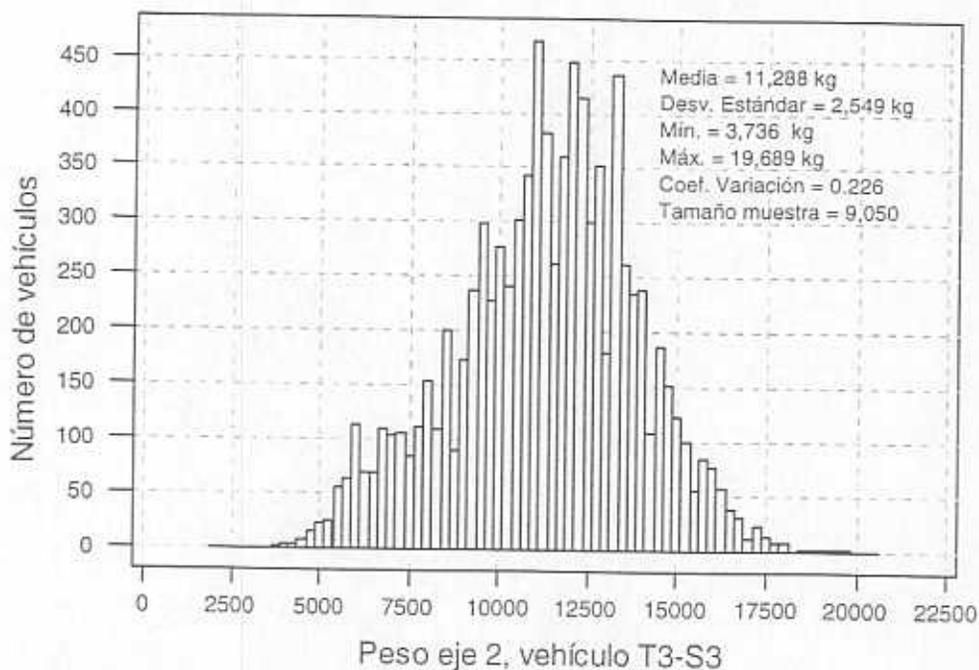


Figura 7.19 Peso segundo eje vehículo T3-S3, en kg

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

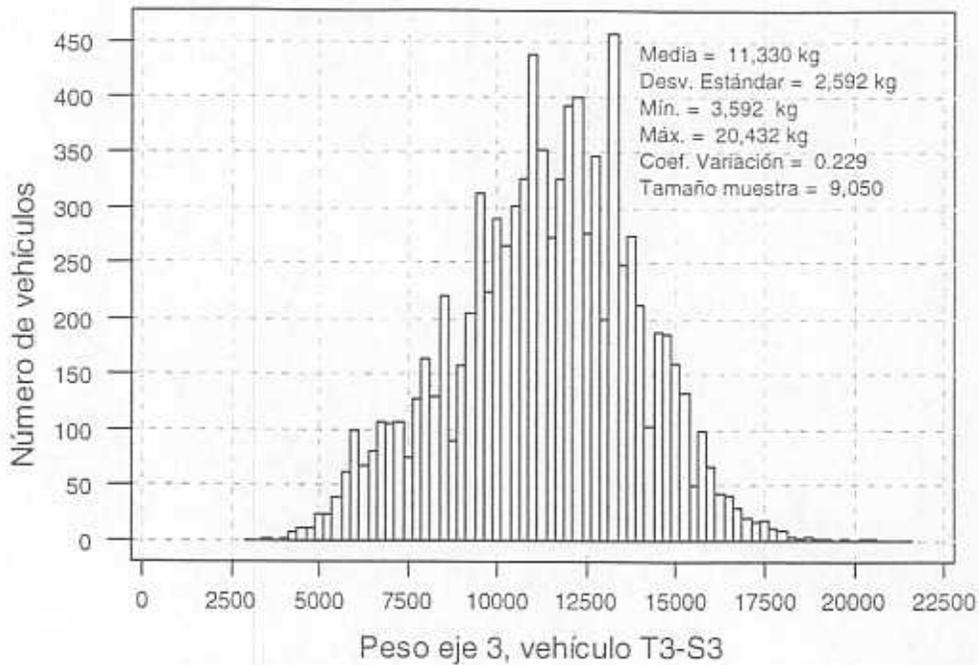


Figura 7.20 Peso tercer eje vehículo T3-S3, en kg

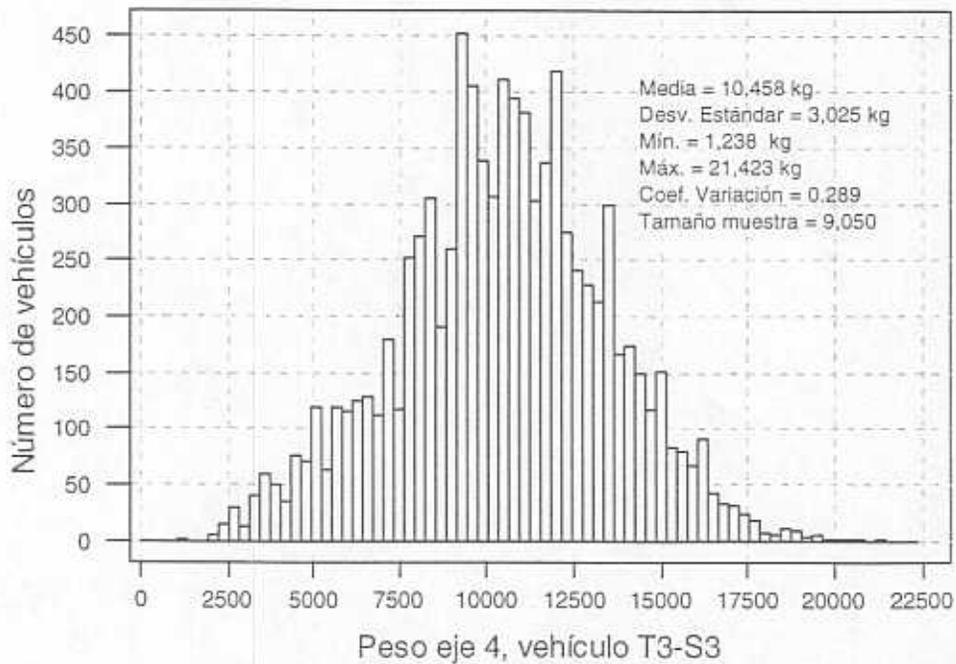


Figura 7.21 Peso cuarto eje vehículo T3-S3, en kg

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

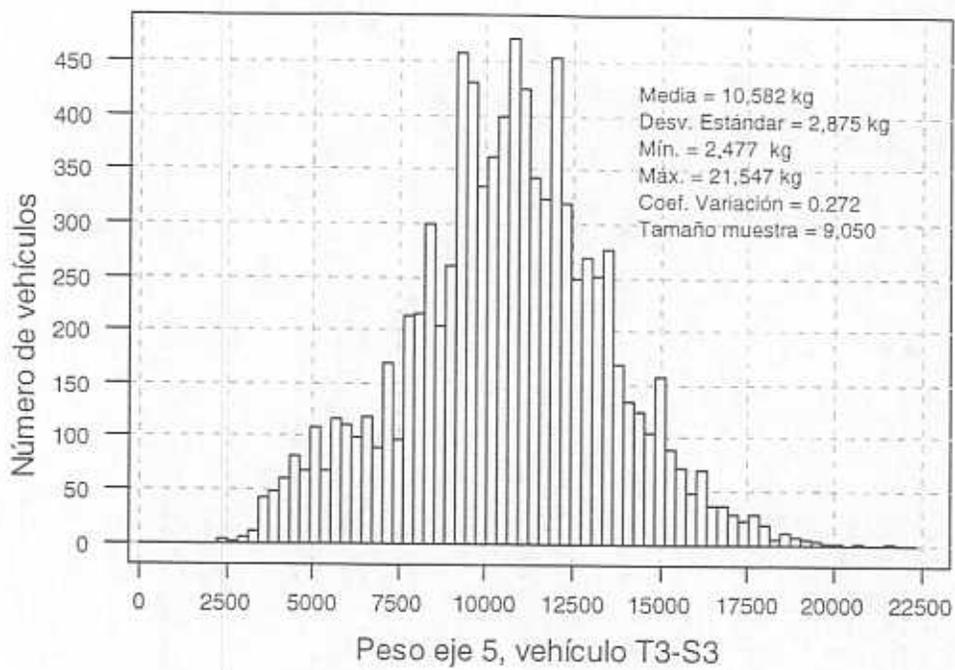


Figura 7.22 Peso quinto eje vehículo T3-S3, en kg

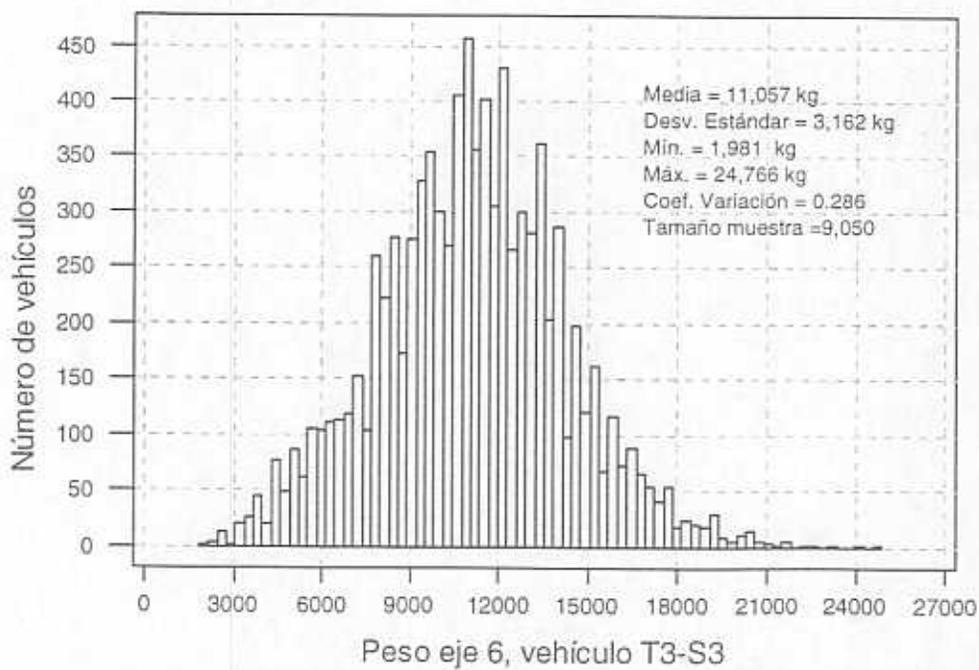


Figura 7.23 Peso sexto eje vehículo T3-S3, en kg

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

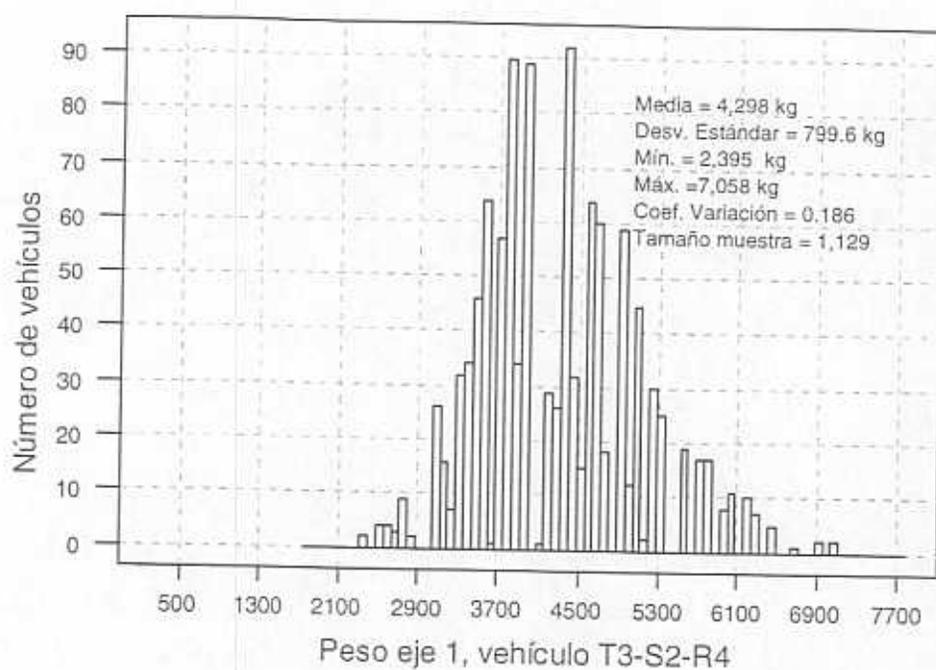


Figura 7.24 Peso primer eje vehículo T3-S2-R4, en kg

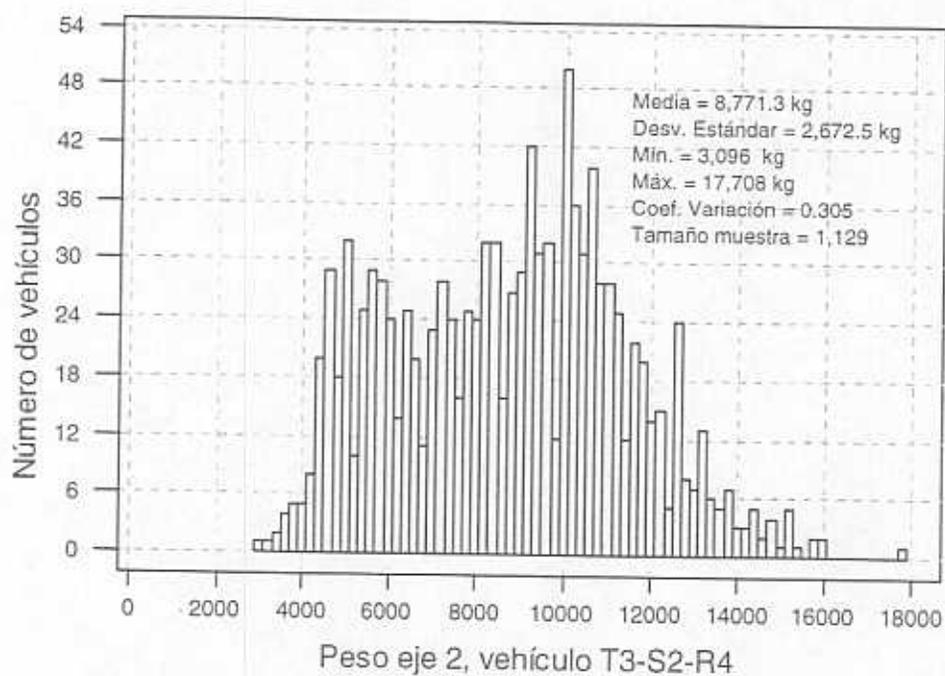


Figura 7.25 Peso segundo eje vehículo T3-S2-R4, en kg

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

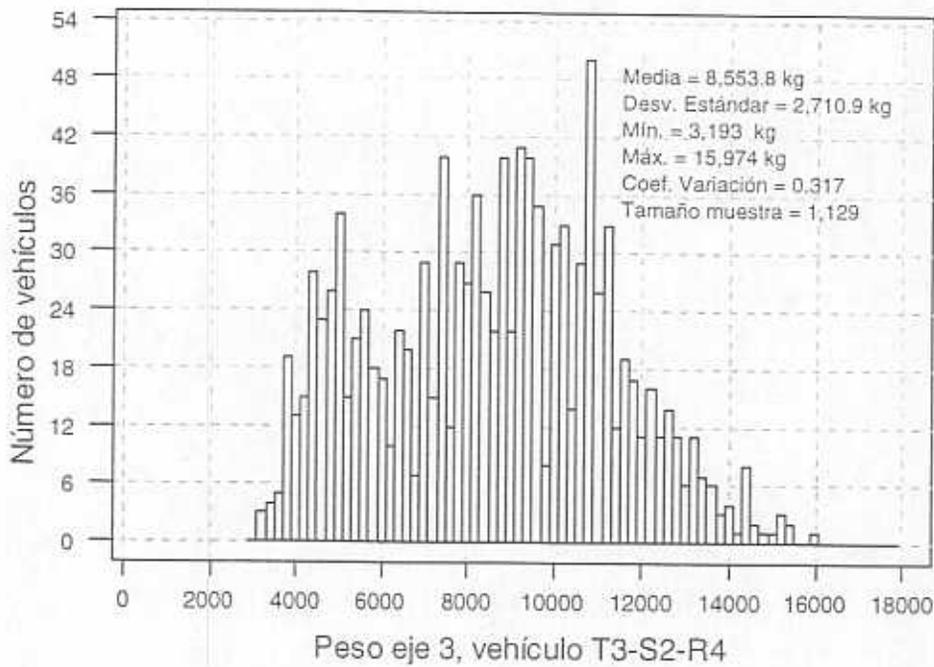


Figura 7.26 Peso tercer eje vehículo T3-S2-R4, en kg

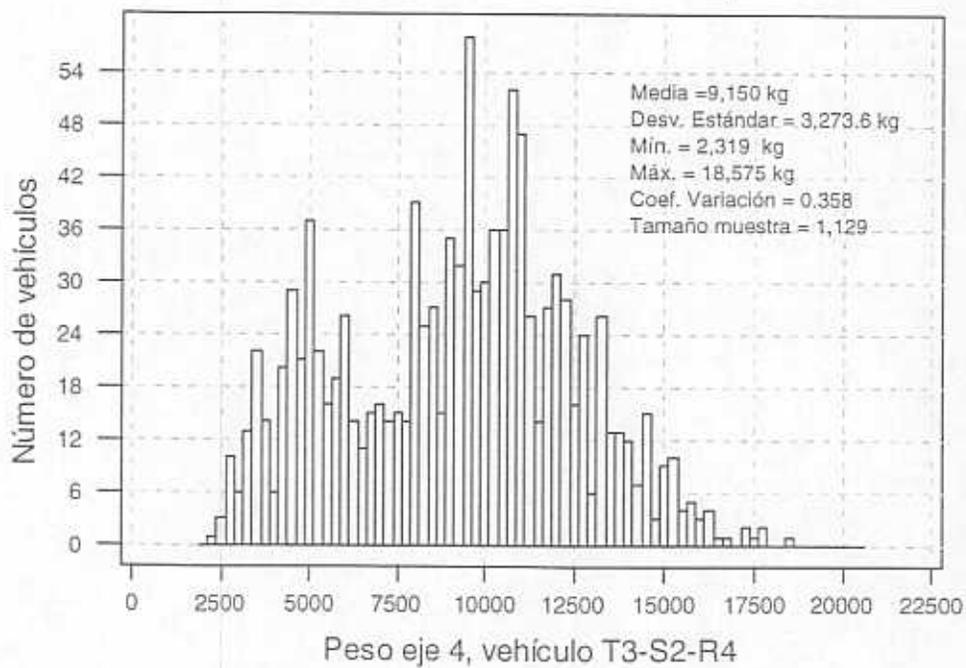


Figura 7.27 Peso cuarto eje vehículo T3-S2-R4, en kg

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

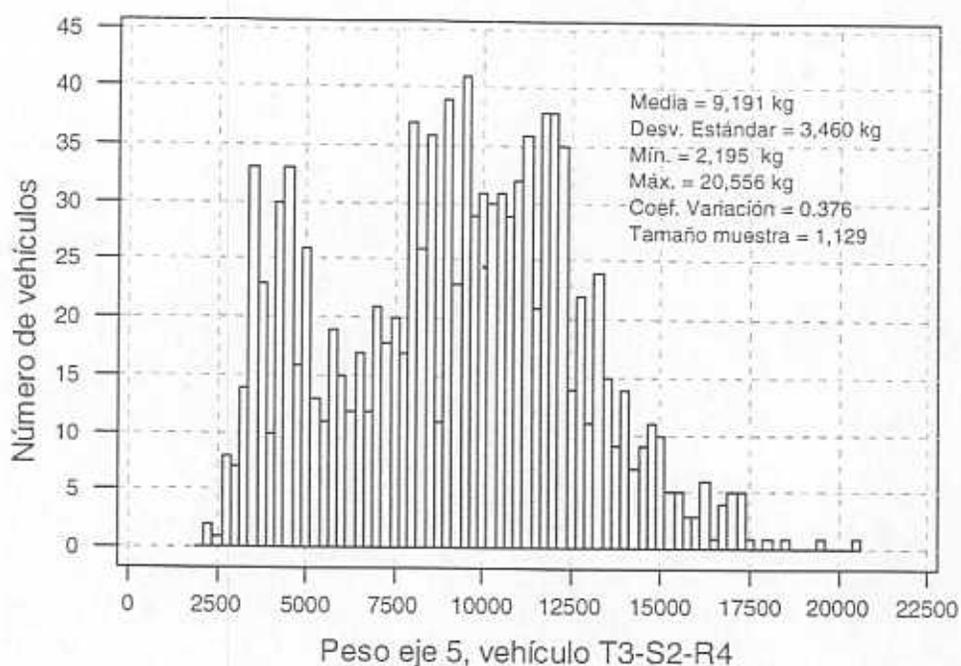


Figura 7.28 Peso quinto eje vehículo T3-S2-R4, en kg

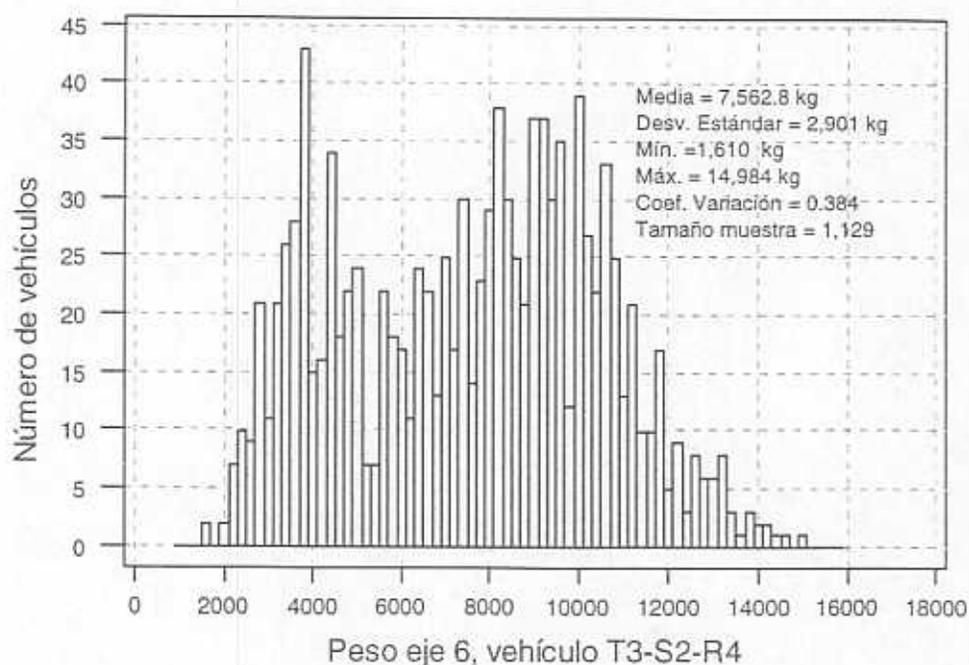


Figura 7.29 Peso sexto eje vehículo T3-S2-R4, en kg

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

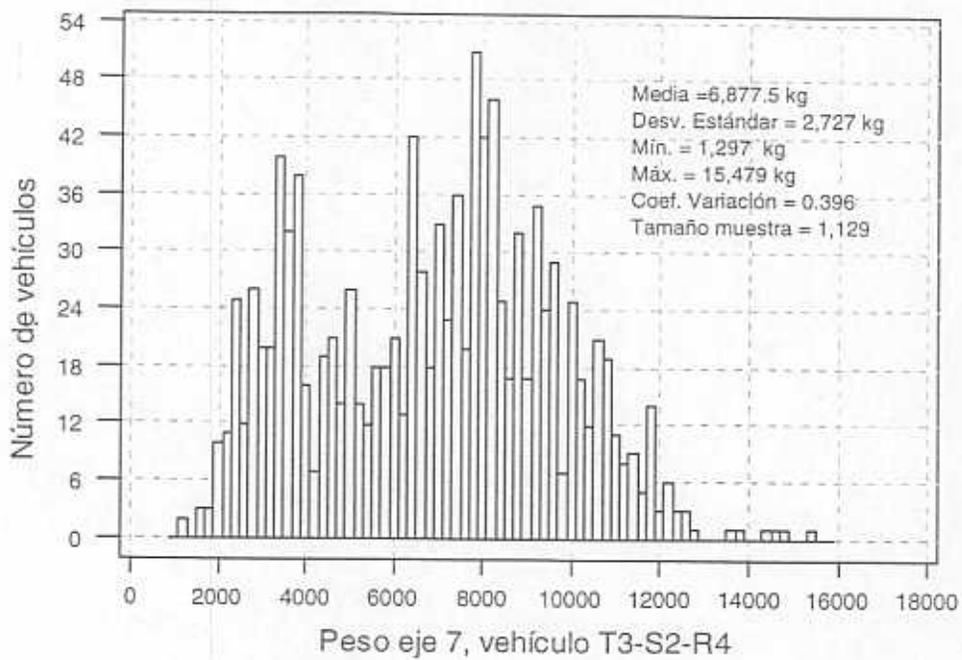


Figura 7.30 Peso séptimo eje vehículo T3-S2-R4, en kg

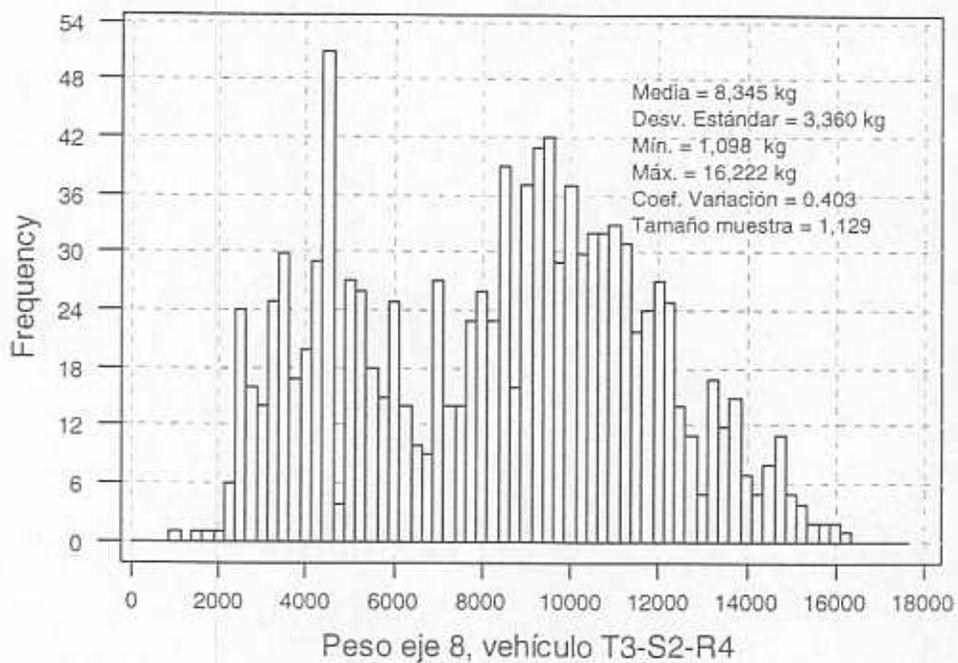


Figura 7.31 Peso octavo eje vehículo T3-S2-R4, en kg

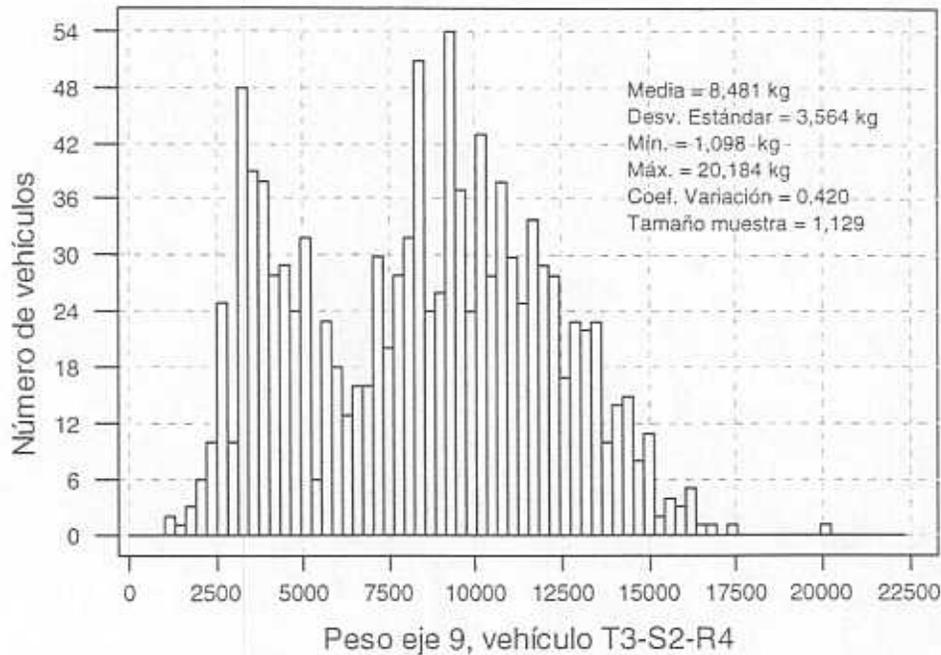


Figura 7.32 Peso noveno eje vehículo T3-S2-R4, en kg

## 7.5 Longitud total entre ejes

Otra variable que resulta significativa en la respuesta de los puentes, son las distancias entre ejes. Para encontrar el peso bruto vehicular PBV, que produce daño a puentes, se puede utilizar la fórmula puente, la cual viene estipulada en el reglamento de pesos y dimensiones de la SCT (ref.4), y que en este trabajo se reproduce en la ecuación 7.1 para carreteras del tipo A. Esta ecuación depende principalmente de la distancia total entre ejes.

$$PBV = 841 \left[ \frac{(DE)(N)}{N-1} + 3.66N + 11 \right] \quad (7.1)$$

donde:

- PBV, es el peso bruto vehicular en kg que produce daño en puentes
- DE, es la distancia total entre ejes en m
- N, es el número de ejes

**7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes**

En la tabla 7.3 se muestran los valores promedio de las longitudes entre ejes, el PBV máximo para evitar daño en puentes, aplicando la ecuación 7.1, y el PBV promedio obtenido anteriormente en el inciso 7.3 de este trabajo.

Comparando los PBV obtenidos con la fórmula puente, con los valores promedio, se puede ver que para los vehículos C-2, C-3 y T3-S2, los PBV promedio son inferiores a los dados por la fórmula puente; en cambio, para los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4, el valor promedio del PBV es muy superior al que da la mencionada fórmula puente. Esto da claros indicios de que los criterios de limitación de cargas deben considerar los posibles daños a los puentes y a los pavimentos.

En la figura 7.33, se muestra el histograma correspondiente al vehículo C-2, en él se pueden apreciar tres tipos de poblaciones de vehículos; una alrededor de los 3.60 m, otra alrededor de los 5.00 m y la otra alrededor de los 6.00 m. Esto se debe a que esta clasificación abarca camiones de volteo con longitud entre eje corta (longitud entre eje de catálogo de 3.40 m), y vehículos con diversas distancias entre eje, según sea el tipo de carga que se maneja.

**Tabla 7.3. LONGITUDES TOTALES PROMEDIO ENTRE EJES, EN CM**

Tipo de vehículo	Longitud total entre eje en cm.	PBV en kg obtenido con la fórmula puente	PBV promedio en kgs
C-2	528.12 (0.172) <sup>1</sup>	24,290	11,268
C-3	629.67 (0.083)	26,428	22,825
T3-S2	1,521 (0.109)	40,631	35,557
T3-S3	1,486 (0.086)	42,716	58,894
T3-S2-R4	2,478.6 (0.106)	60,404	71,150

<sup>1</sup> Los valores dentro del paréntesis son los coeficientes de variación

Fuente: Propia, con los datos de los histogramas generados a partir de las bases de datos de pesos y dimensiones del año 1993

Con relación a los otros vehículos, en las longitudes entre ejes, se ven distribuciones más uniformes, con excepción del T3-S2-R4, donde se nota una gran variedad de longitudes, debido también a la gran diversidad de arreglos que existen para este tipo de vehículo.

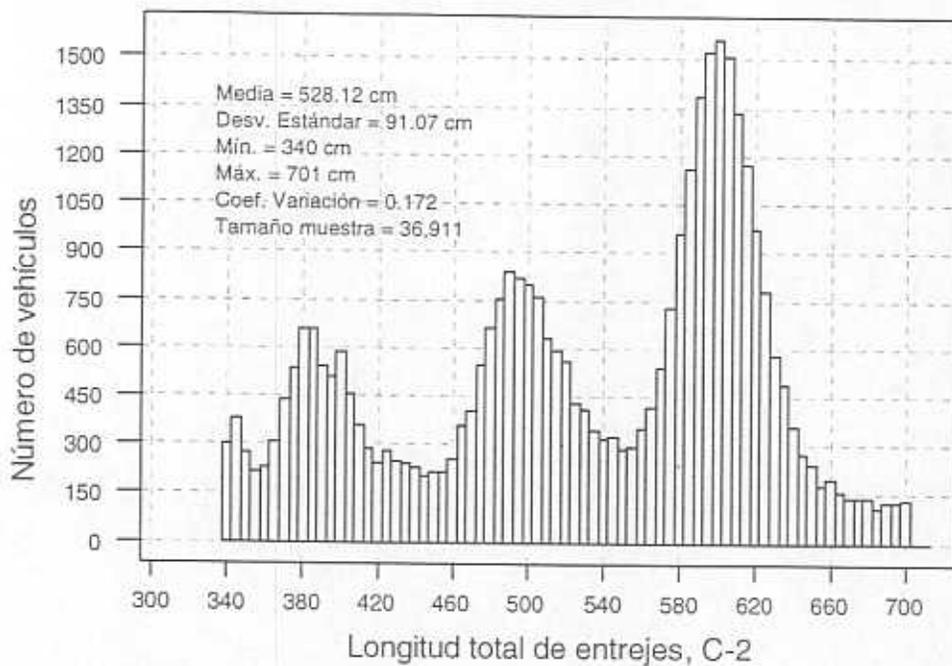


Figura 7.33 Longitud total entre ejes en cm, vehículo C-2

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

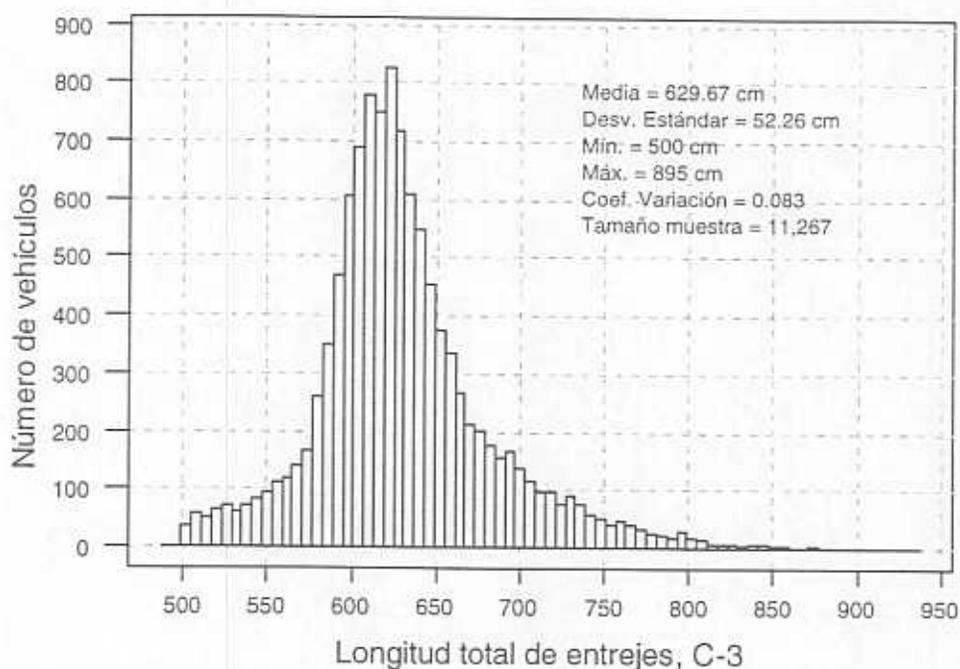


Figura 7.34 Longitud total entre ejes en cm, vehículo C-3

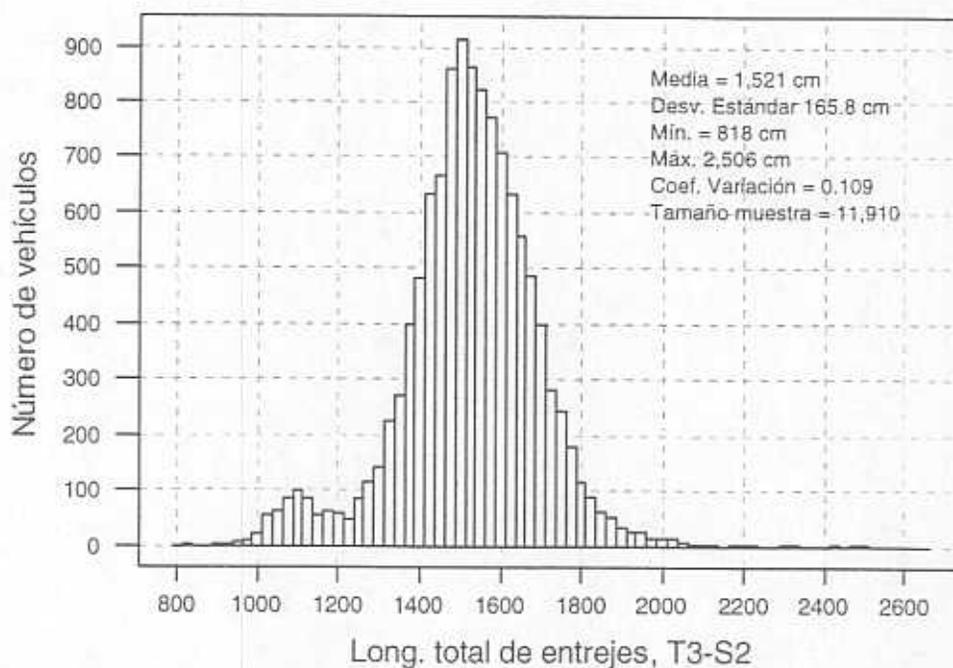


Figura 7.35 Longitud total entre ejes en cm, vehículo T3-S2

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

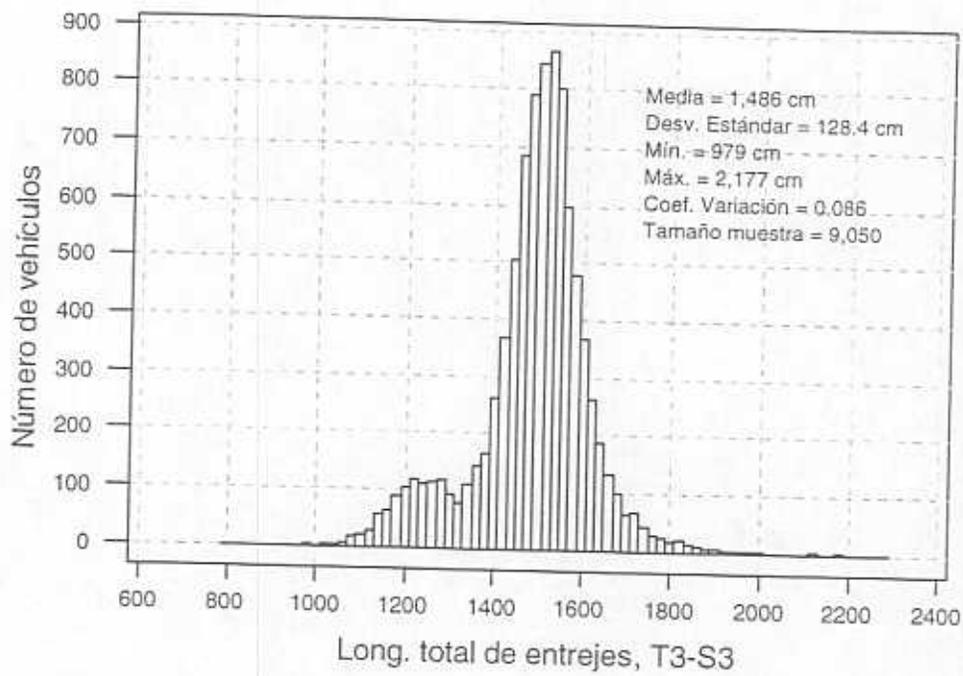


Figura 7.36 Longitud total entre ejes en cm, vehículo T3-S3

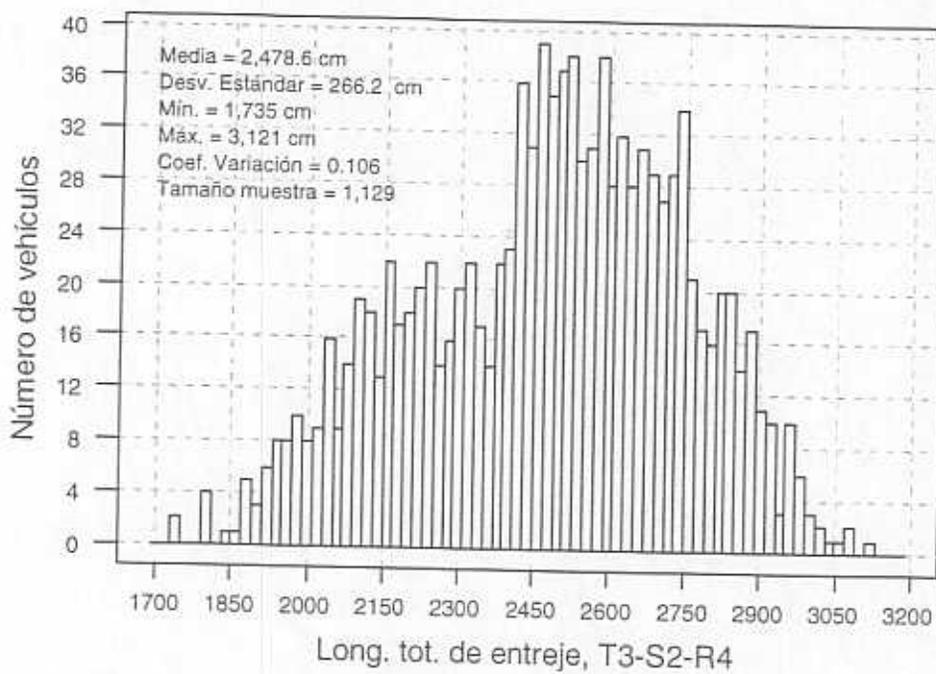


Figura 7.37 Longitud total entre ejes en cm, vehículo T3-S2-R4

## 7.6 Longitud entre ejes

En esta parte se presentan los datos referentes a la longitud de cada entre eje, para cada tipo de vehículo; en la tabla 7.4 se muestra un resumen de los valores promedio para cada uno.

Tabla 7.4. LONGITUDES PROMEDIO DE ENTRE EJES, EN CMS

Tipo de Vehículo	E n t r e j e s							
	1	2	3	4	5	6	7	8
C-2	528.12 (.172) <sup>1</sup>							
C-3	502.42 (0.100)	127.22 (0.064)						
T3-S2	452.39 (0.122)	135.99 (0.072)	818.04 (0.174)	115.11 (0.088)				
T3-S3	454.81 (0.093)	136.74 (0.070)	657.99 (0.158)	119.01 (0.078)	117.43 (0.080)			
T3-S2-R4	481.79 (0.099)	141.95 (0.071)	672.76 (0.281)	122.27 (0.079)	238.21 (0.159)	118.88 (0.079)	591.94 (0.200)	110.78 (0.103)

<sup>1</sup> Los valores dentro del paréntesis son los coeficientes de variación

Fuente: Propia, con los datos de los histogramas generados a partir de las bases de datos de pesos y dimensiones del año 1993

En la figura 7.38 se muestra la distancia del entre eje correspondiente al vehículo C-2, para el cual, como ya se comentó, se pueden observar tres poblaciones de vehículos.

En la figuras 7.39 y 7.40 se presentan los datos para el vehículo C-3, en las cuales se puede ver cierta uniformidad, lo cual coincide con lo encontrado al analizar las otras variables.

En las figuras 7.41 a 7.44, se presentan los resultados para el vehículo T3-S2. En estas figuras se puede ver que existe uniformidad en los datos,

excepto para el entre eje 3, el cual corresponde al remolque, en el que se distinguen dos poblaciones: una alrededor de los 4.00 m y la otra por los 8.20 m.

La misma situación se presenta para el vehículo T3-S3, en el que el entre eje correspondiente al remolque presenta las mismas dos poblaciones.

Para los vehículos T3-S2-R4, la situación no es tan clara, ya que se tiene una gran dispersión de los datos para todos los entre ejes. Esto se debe a que posiblemente existen muchos tipos de vehículos y arreglos para esta clasificación, o bien que la pesadora no hace una buena clasificación de este tipo de vehículos.

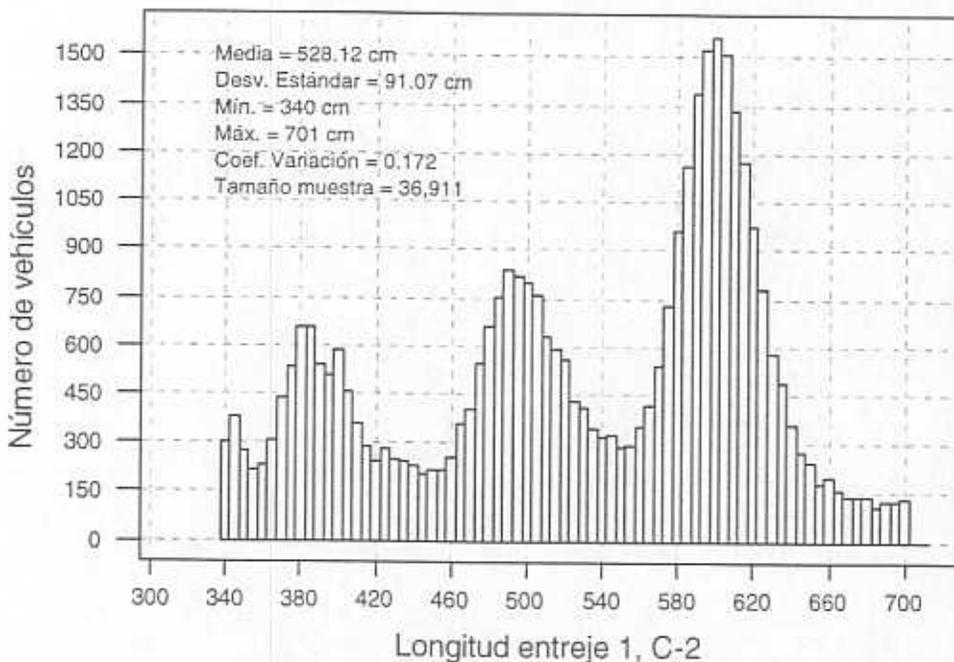


Figura 7.38 Longitud entre eje 1 en cm, vehículo C-2

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

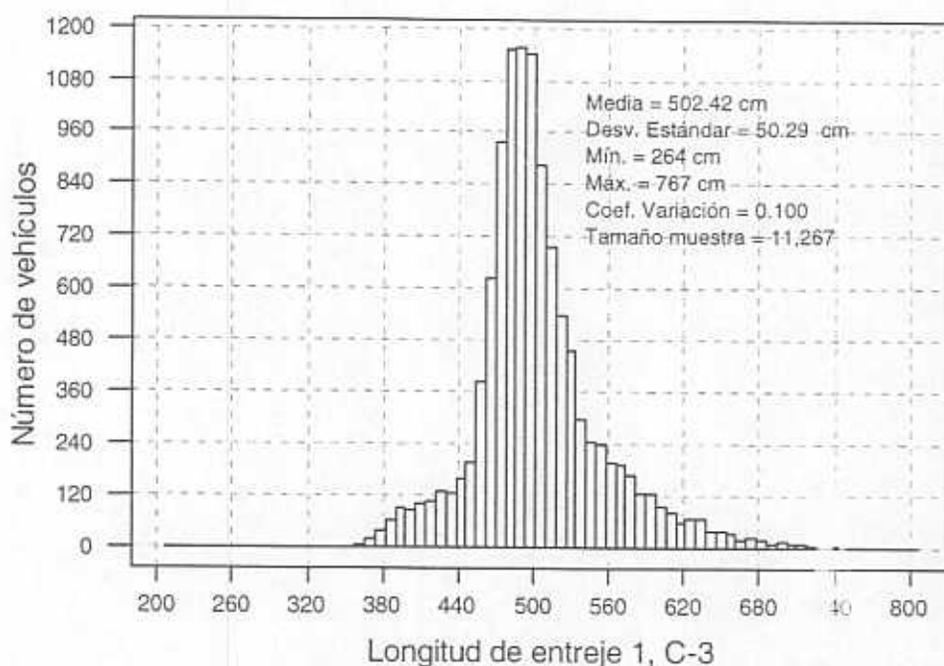


Figura 7.39 Longitud entre eje 1 en cm, vehículo C-3

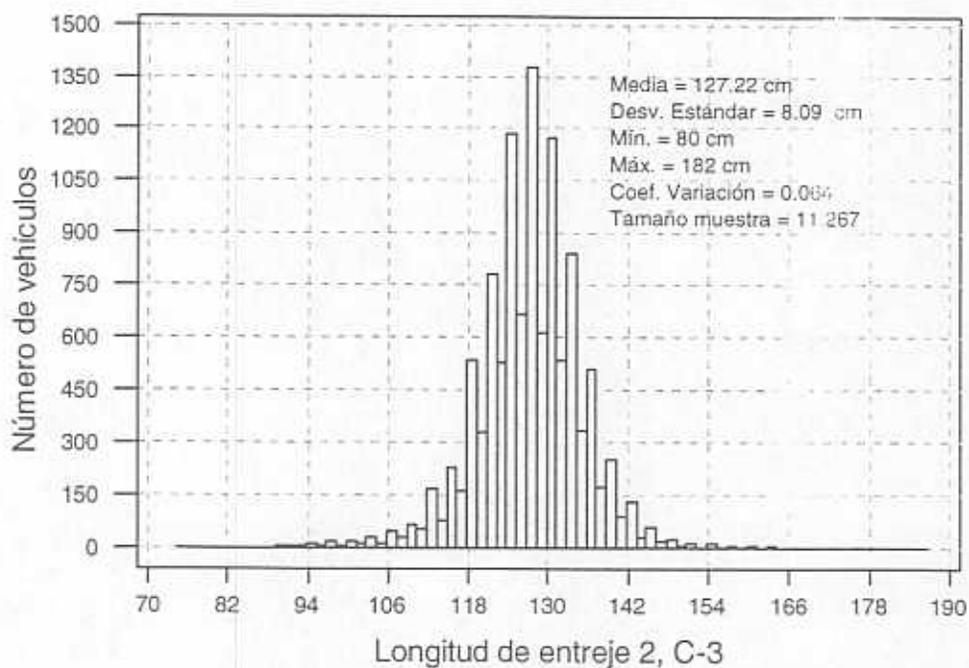


Figura 7.40 Longitud entre eje 2 en cm, vehículo C-3

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

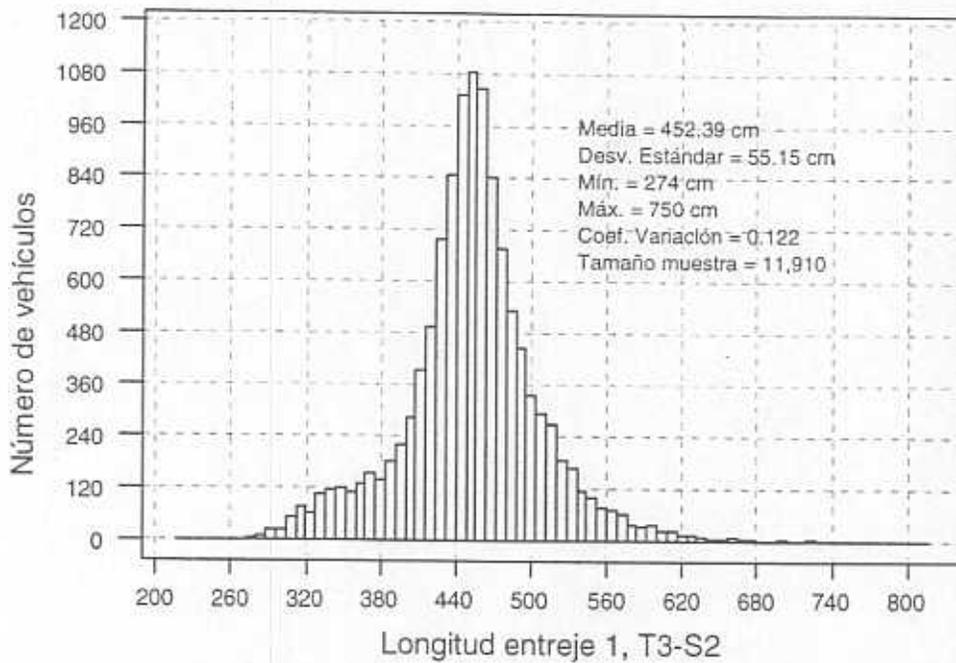


Figura 7.41 Longitud entre eje 1 en cm, vehículo T3-S2

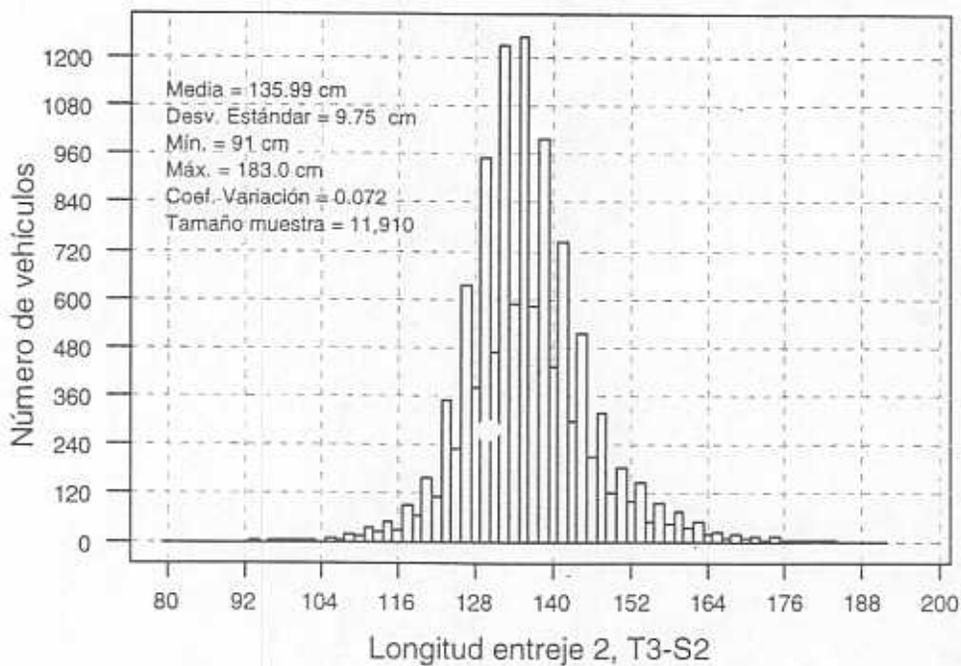


Figura 7.42 Longitud entre eje 2 en cm, vehículo T3-S2

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

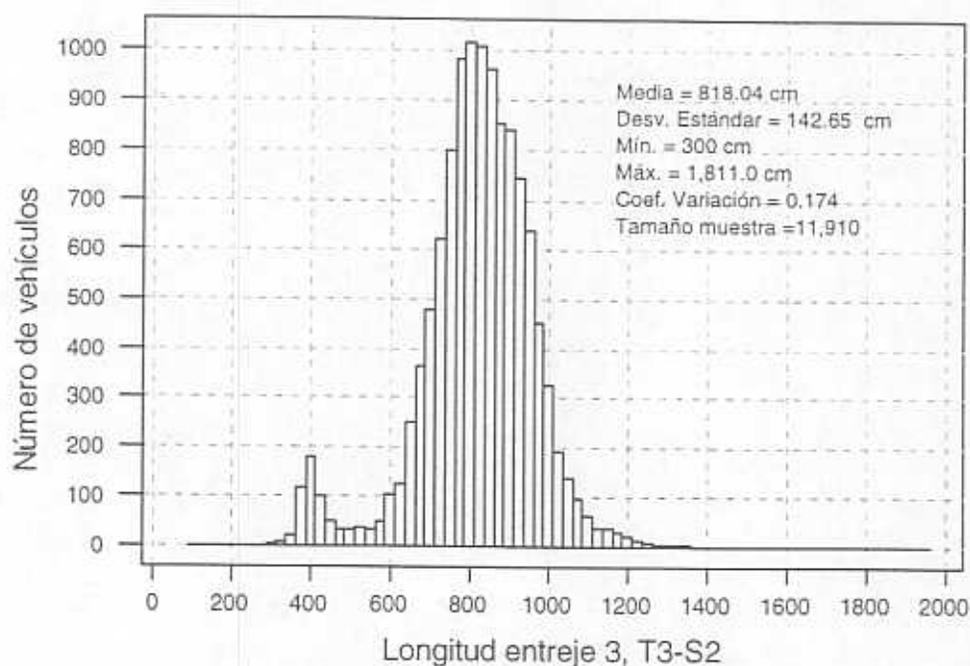


Figura 7.43 Longitud entre eje 3 en cm, vehículo T3-S2

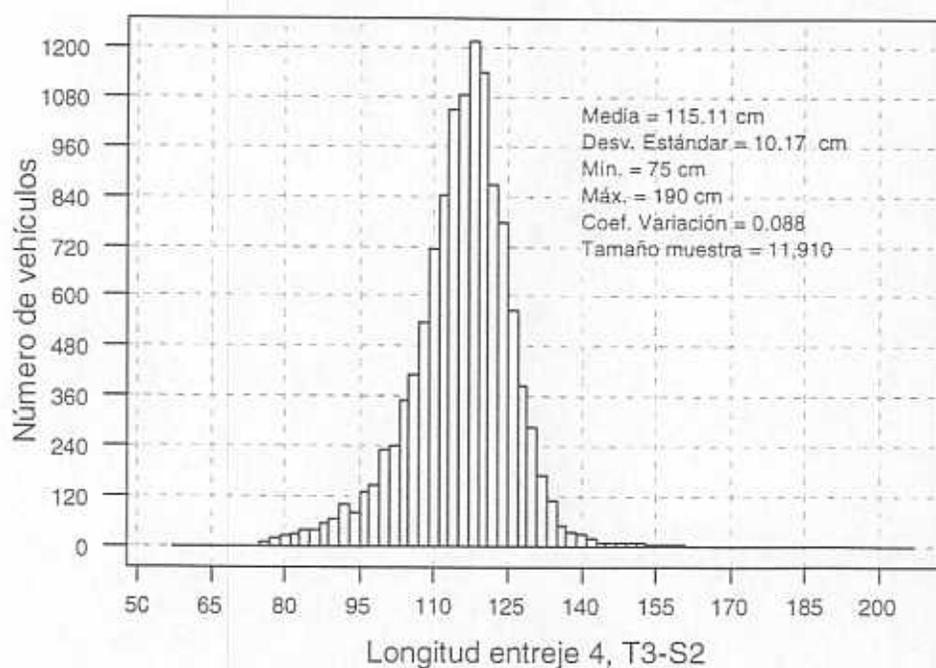


Figura 7.44 Longitud entre eje 4 en cm, vehículo T3-S2

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

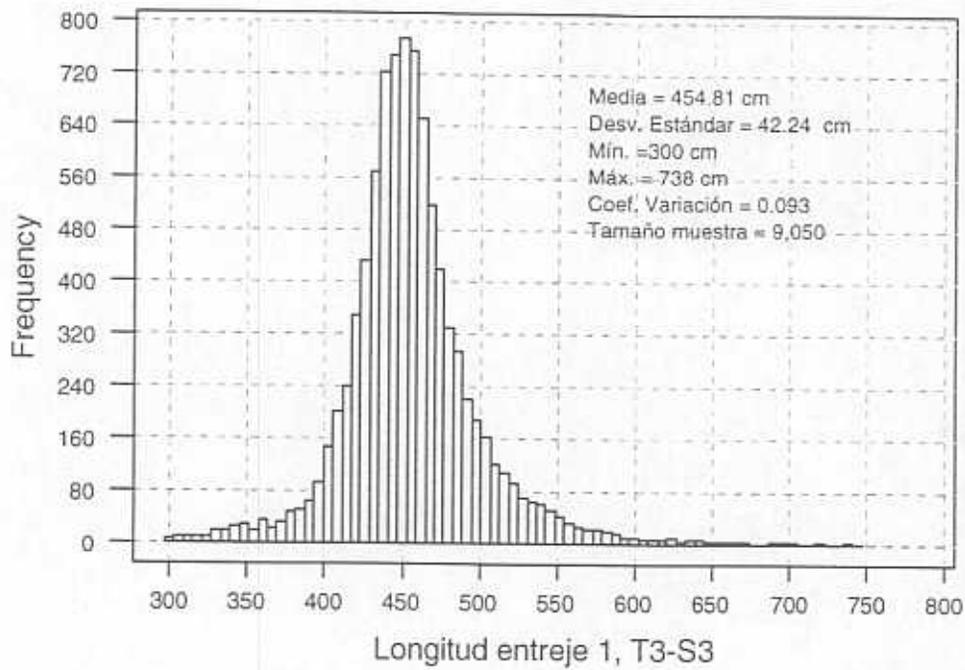


Figura 7.45 Longitud entre eje 1 en cm, vehículo T3-S3

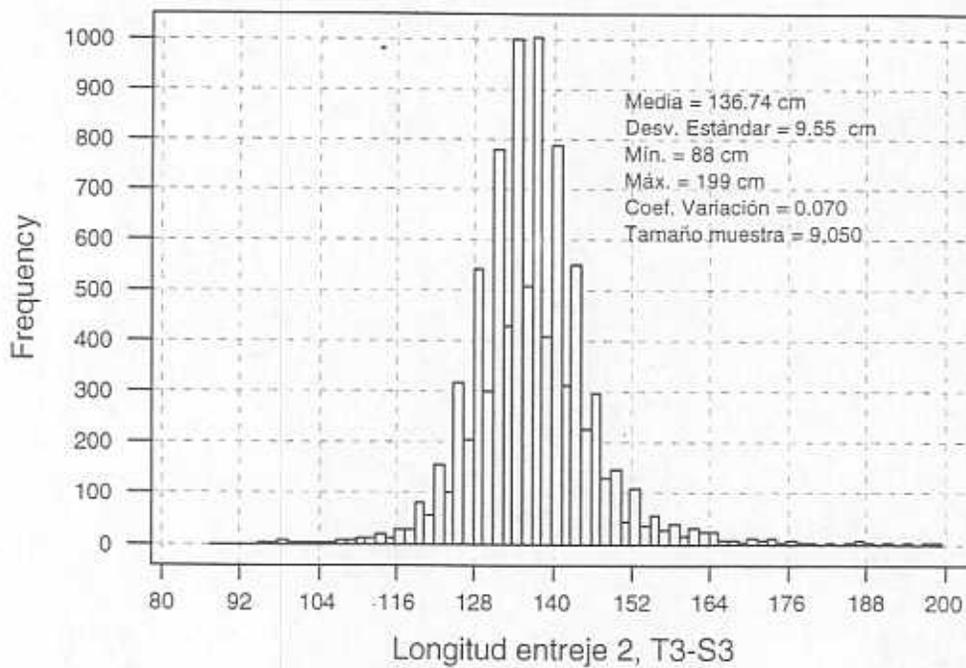


Figura 7.46 Longitud entre eje 2 en cm, vehículo T3-S3

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

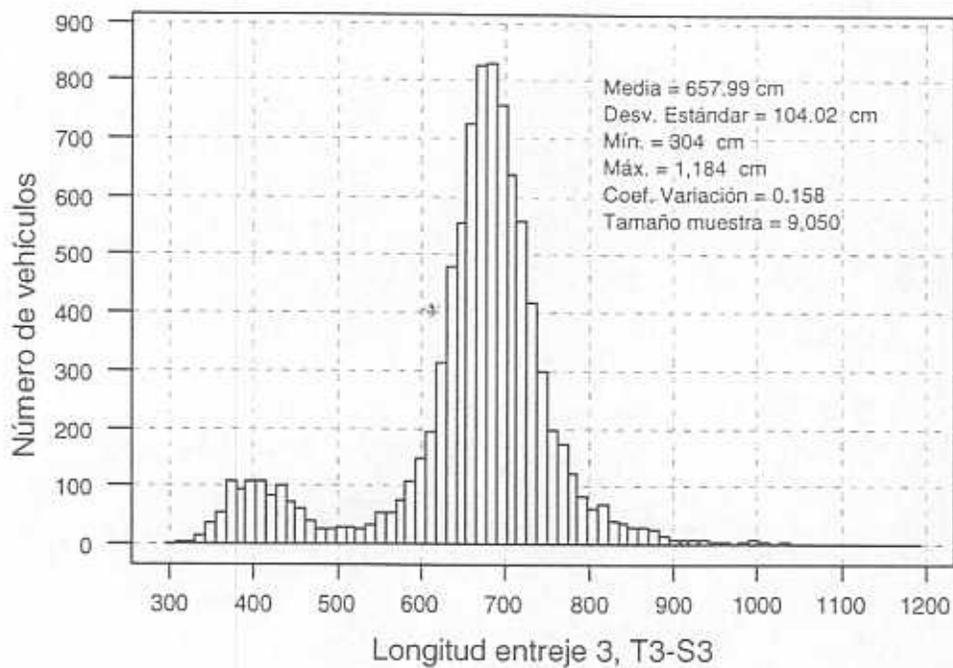


Figura 7.47 Longitud entre eje 3 en cm, vehículo T3-S3

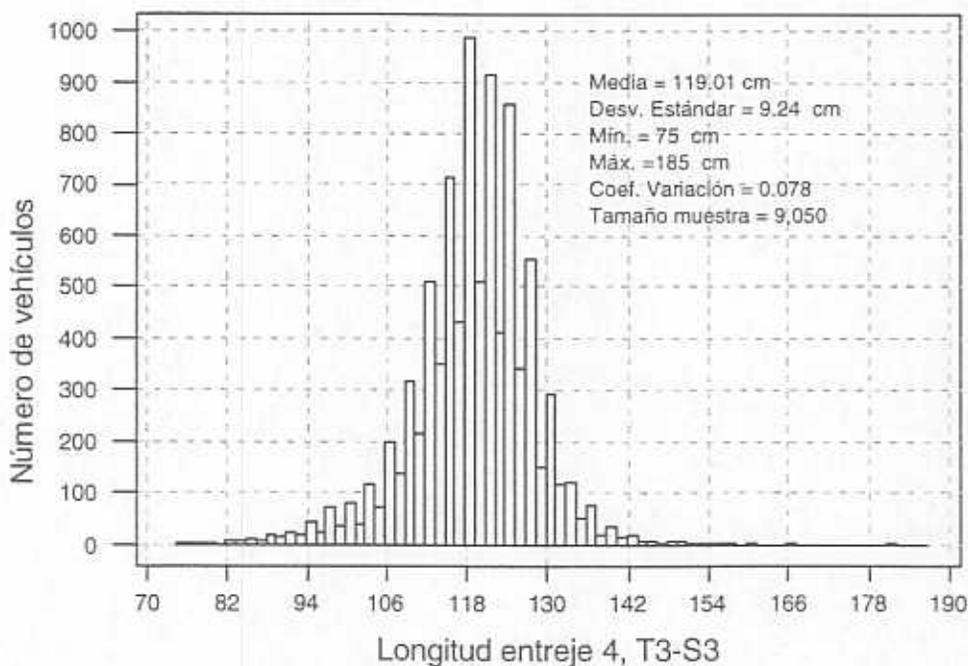


Figura 7.48 Longitud entre eje 4 en cm, vehículo T3-S3

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

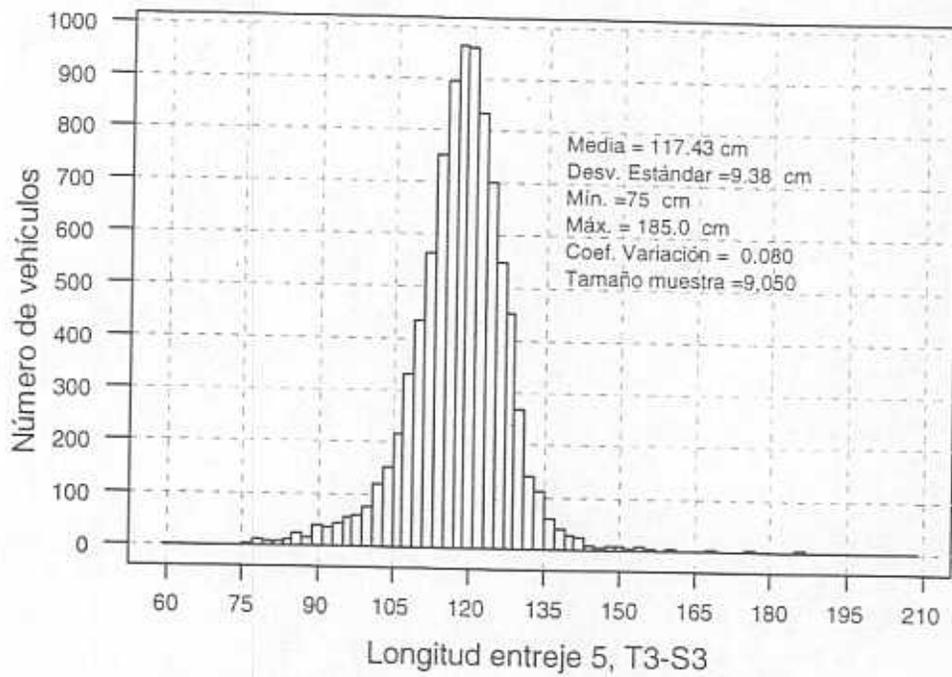


Figura 7.49 Longitud entre eje 5 en cm, vehículo T3-S3

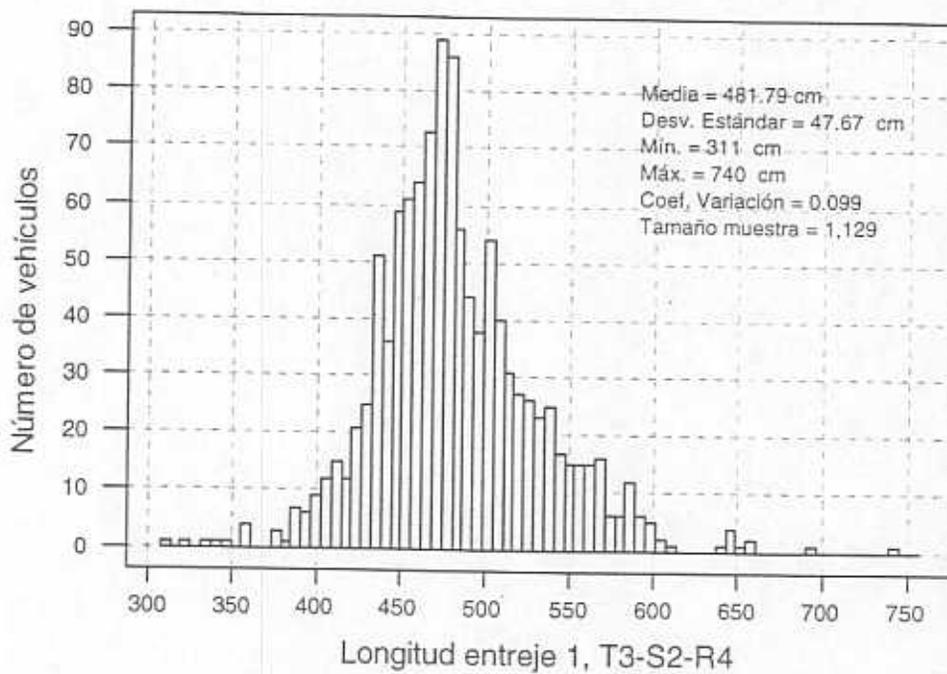


Figura 7.50 Longitud entre eje 1 en cm, vehículo T3-S2-R4

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

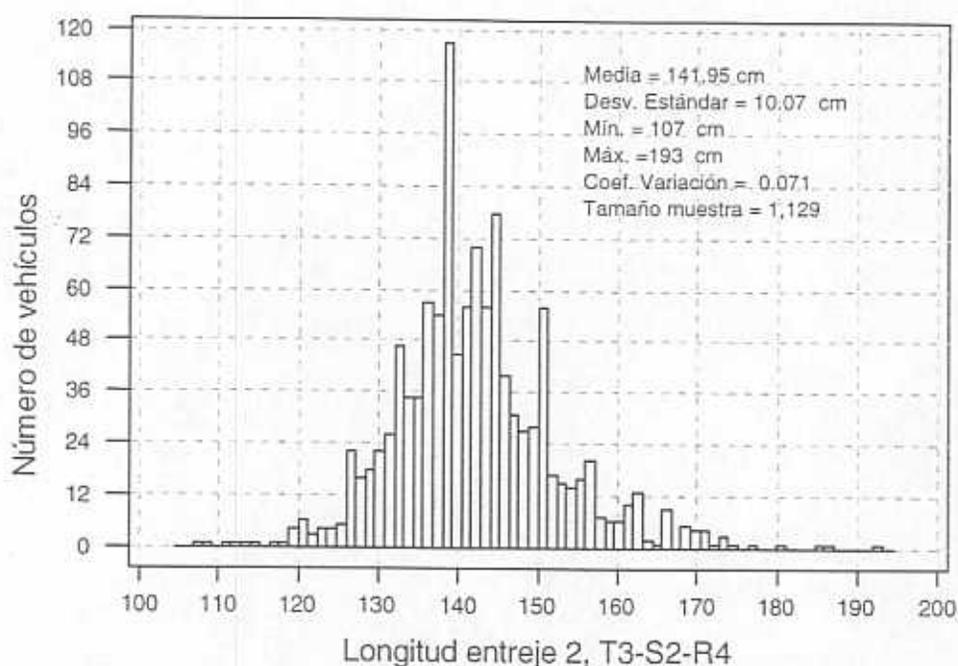


Figura 7.51 Longitud entre eje 2 en cm, vehículo T3-S2-R4

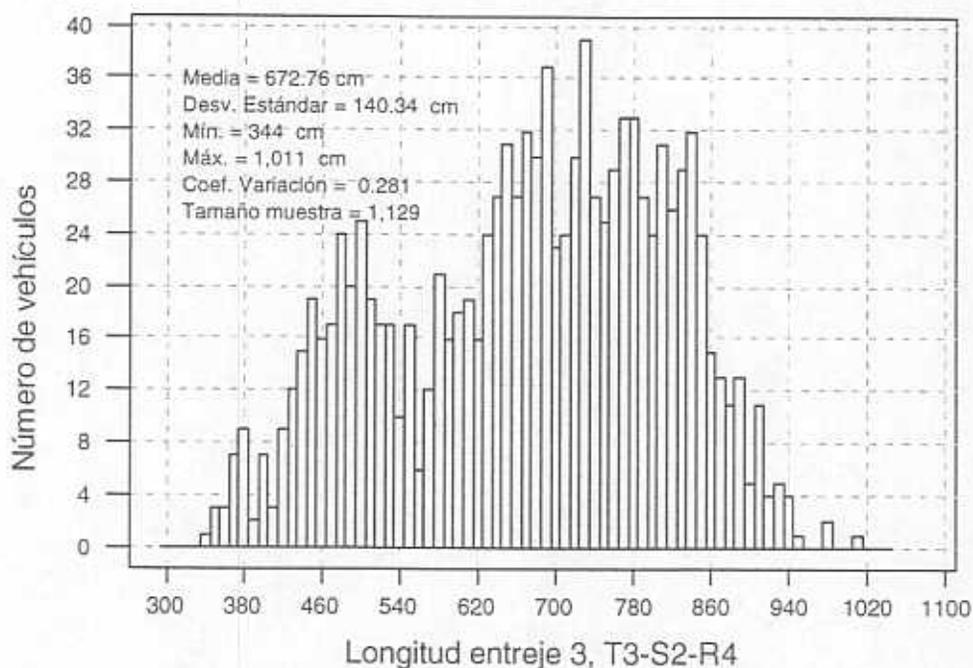


Figura 7.52 Longitud entre eje 3 en cm, vehículo T3-S2-R4

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

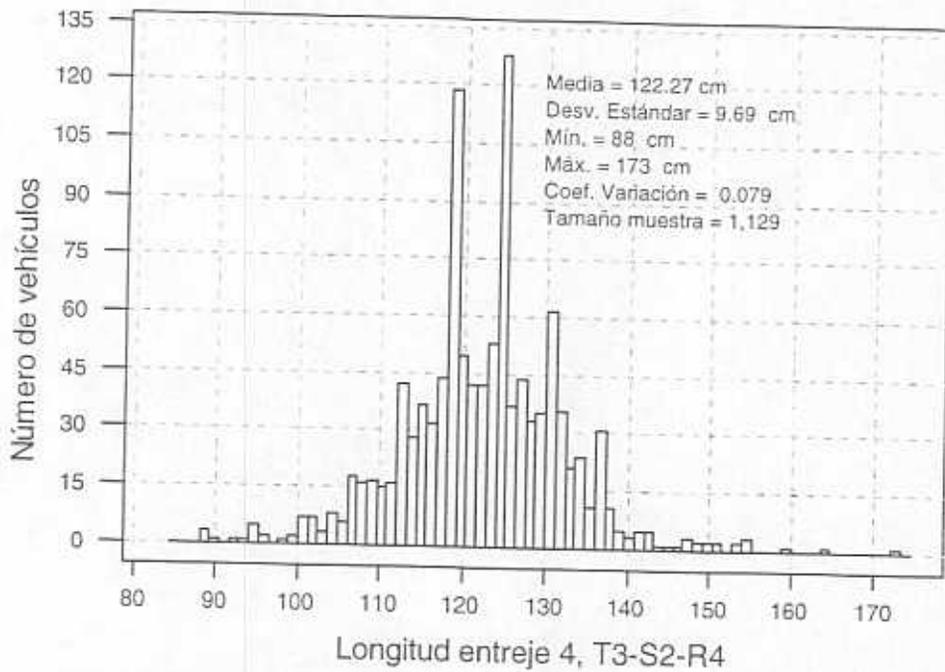


Figura 7.53 Longitud entre eje 4 en cm, vehículo T3-S2-R4

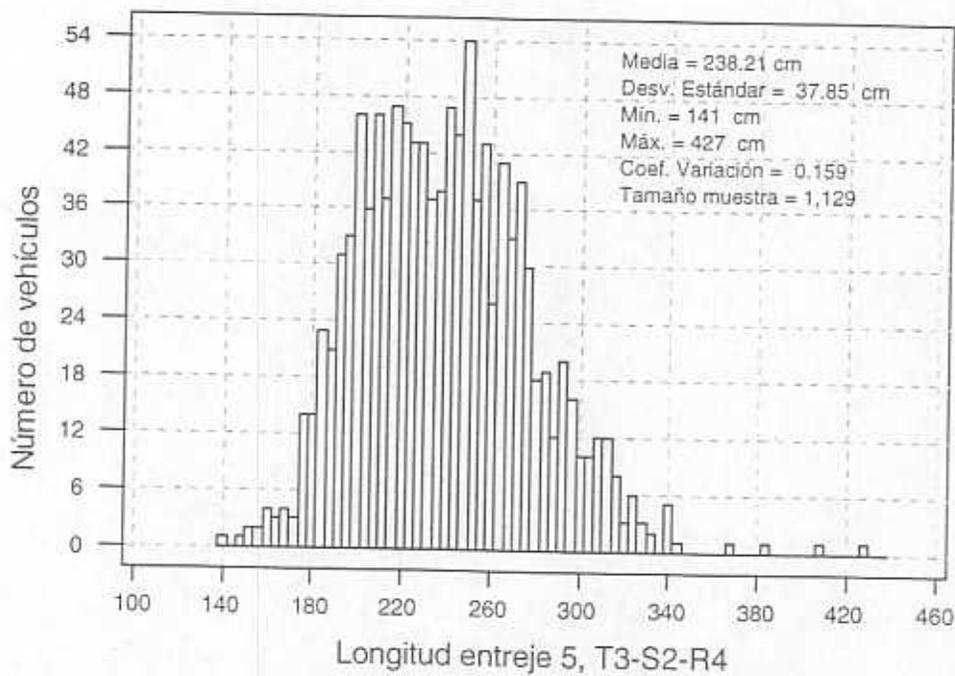


Figura 7.54 Longitud entre eje 5 en cm, vehículo T3-S2-R4

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

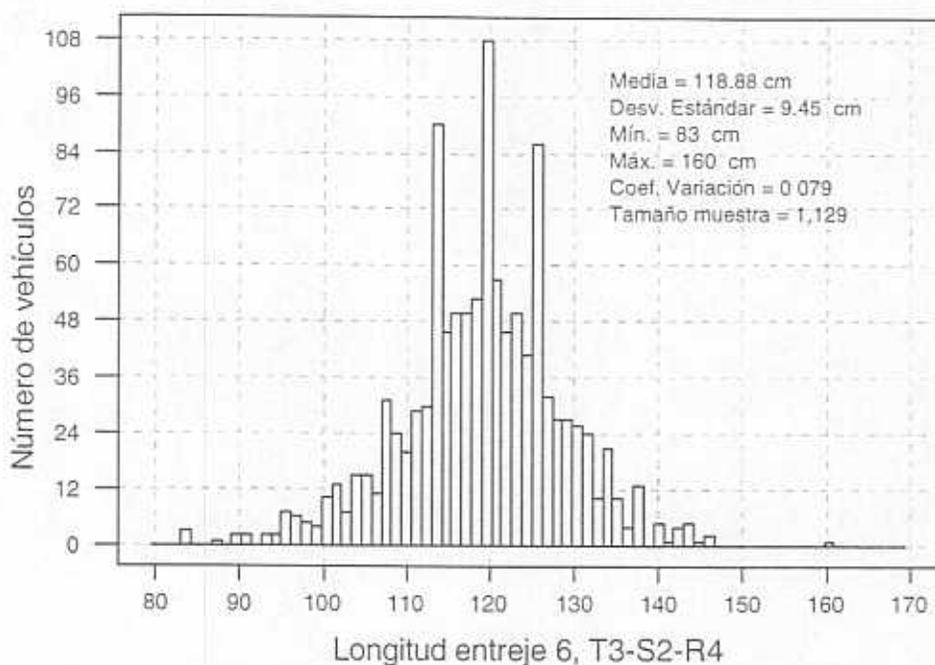


Figura 7.55 Longitud entre eje 6 en cm, vehículo T3-S2-R4

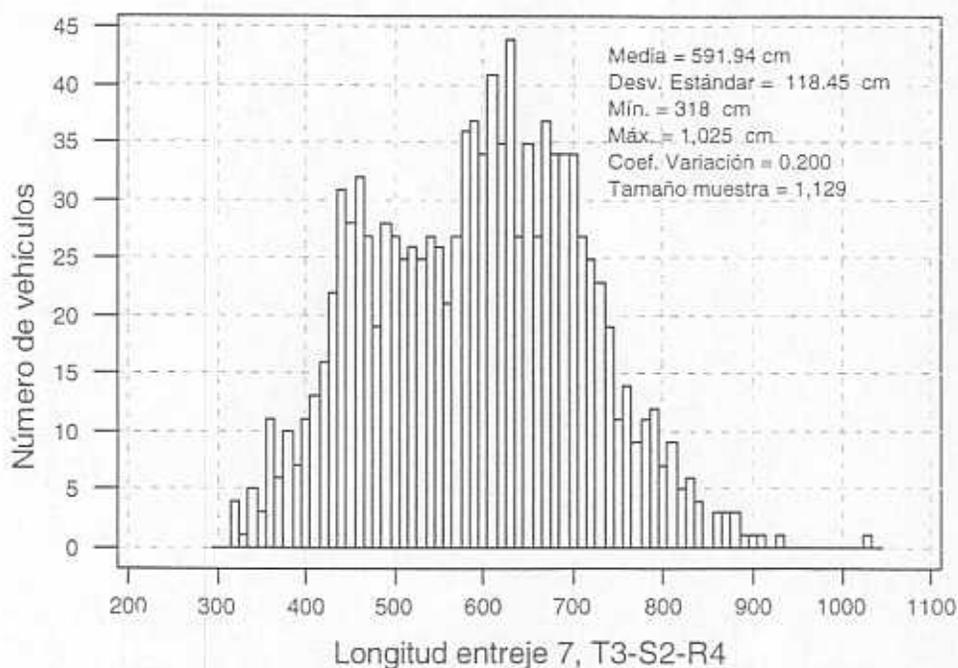


Figura 7.56 Longitud entre eje 7 en cm, vehículo T3-S2-R4

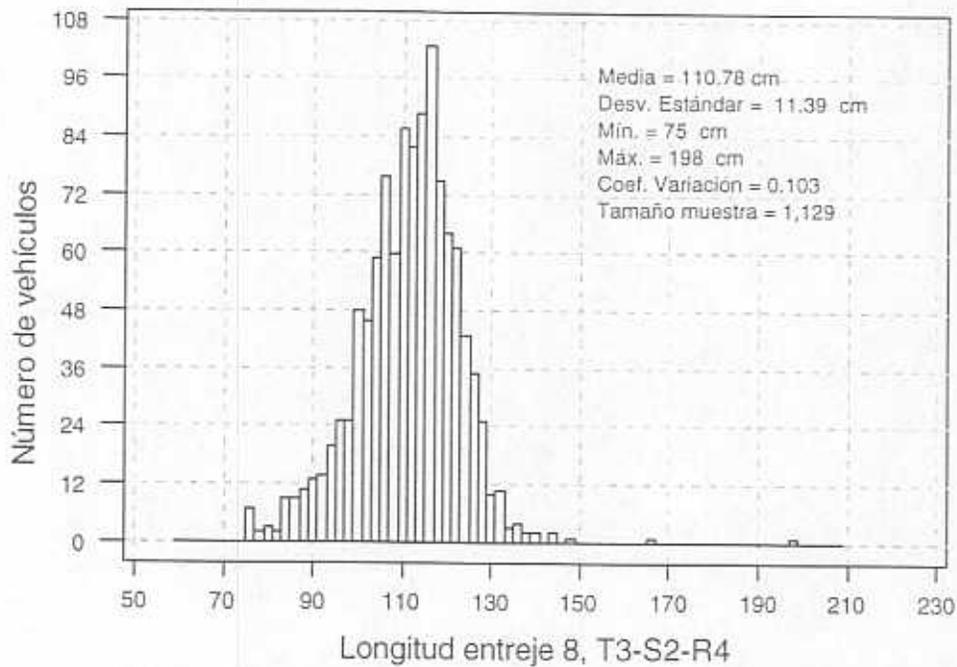


Figura 7.57 Longitud entre eje 8 en cm, vehículo T3-S2-R4

## 7.7 Momentos y cortantes máximos

Para tres claros diferentes de puentes simplemente apoyados; 15, 30 y 45 m, se calcularon los momentos flexionantes y fuerzas cortantes máximos, correspondientes a los 70,267 vehículos considerados en el análisis estadístico.

El algoritmo para el cálculo de momentos y cortantes se describe a continuación ( para más detalle sobre el tema de "líneas de influencia" ver la Ref. 12 ).

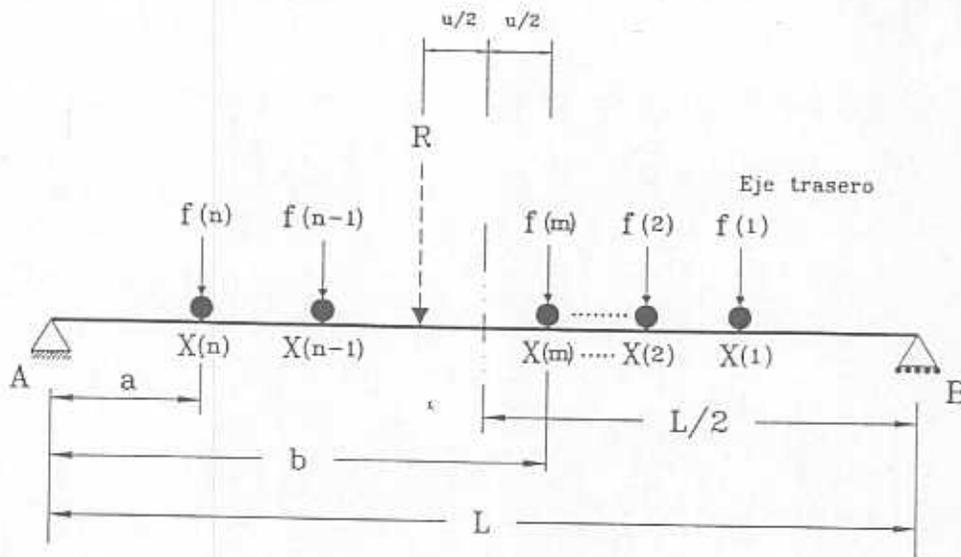


Figura 7.56 Viga simplemente apoyada con cargas móviles

El significado de las variables mostradas en la figura 7.56 es el siguiente :

- R, es la resultante o peso bruto vehicular.
- b, es la distancia del apoyo A a la llanta donde cambia de signo el cortante y ocurre el máximo momento, llanta "m".
- a, es la distancia del eje delantero al apoyo A
- u, es la distancia de la llanta "m" a donde actúa la fuerza R.
- L, es la longitud de la viga.
- A y B, son los apoyos izquierdo y derecho, respectivamente.
- n, es el número de ejes del vehículo.

En la figura 7.56, el eje trasero es la llanta "1", y así sucesivamente, hasta la n-ésima que corresponde al eje delantero ; la razón de esta convención, es para dar los resultados de manera consistente invariablemente.

El algoritmo para encontrar el momento flexionante máximo, se basa en dos conceptos; el primero es que cuando el cortante cambia de signo, se tiene el momento flexionante máximo; el segundo, es que la resultante "R" y la llanta "m" (llanta correspondiente al lugar donde el cortante cambia de signo), se encuentran equidistantes con respecto al centro de la viga; esto último se demostrará a continuación.

Sea la llanta  $m$ -ésima en donde aparece el cambio de signo del cortante; si se toman momentos a la derecha de la llanta " $m$ " se obtiene:

$$\frac{R(L - b + u)b}{L} - \text{mom. de las llantas 1 a } m-1, \text{ con respecto a la llanta } m \quad (7.1)$$

Nótese que los momentos relativos a la llanta " $m$ " (segundo miembro de la ecuación 7.1) no dependen de la posición general del vehículo, por lo que esta resultante de momentos es una constante.

Para obtener el máximo, se deriva la expresión 7.1 con respecto a  $b$ , se iguala a cero y se despeja la variable  $b$ , el resultado se presenta en las ecuaciones 7.2 y 7.3.

$$L - 2b + u = 0 \quad (7.2)$$

$$b = \frac{L}{2} + \frac{u}{2} \quad (7.3)$$

De aquí, y con ayuda de la figura 7.56, se puede observar que  $R$  y la llanta " $m$ " se encuentran equidistantes del centro de la viga.

Existen casos en los que los vehículos no caben dentro del puente; en tal caso, el programa calcula los elementos mecánicos para todos los posibles arreglos de ejes que queden dentro de la longitud del puente, y da los valores máximos.

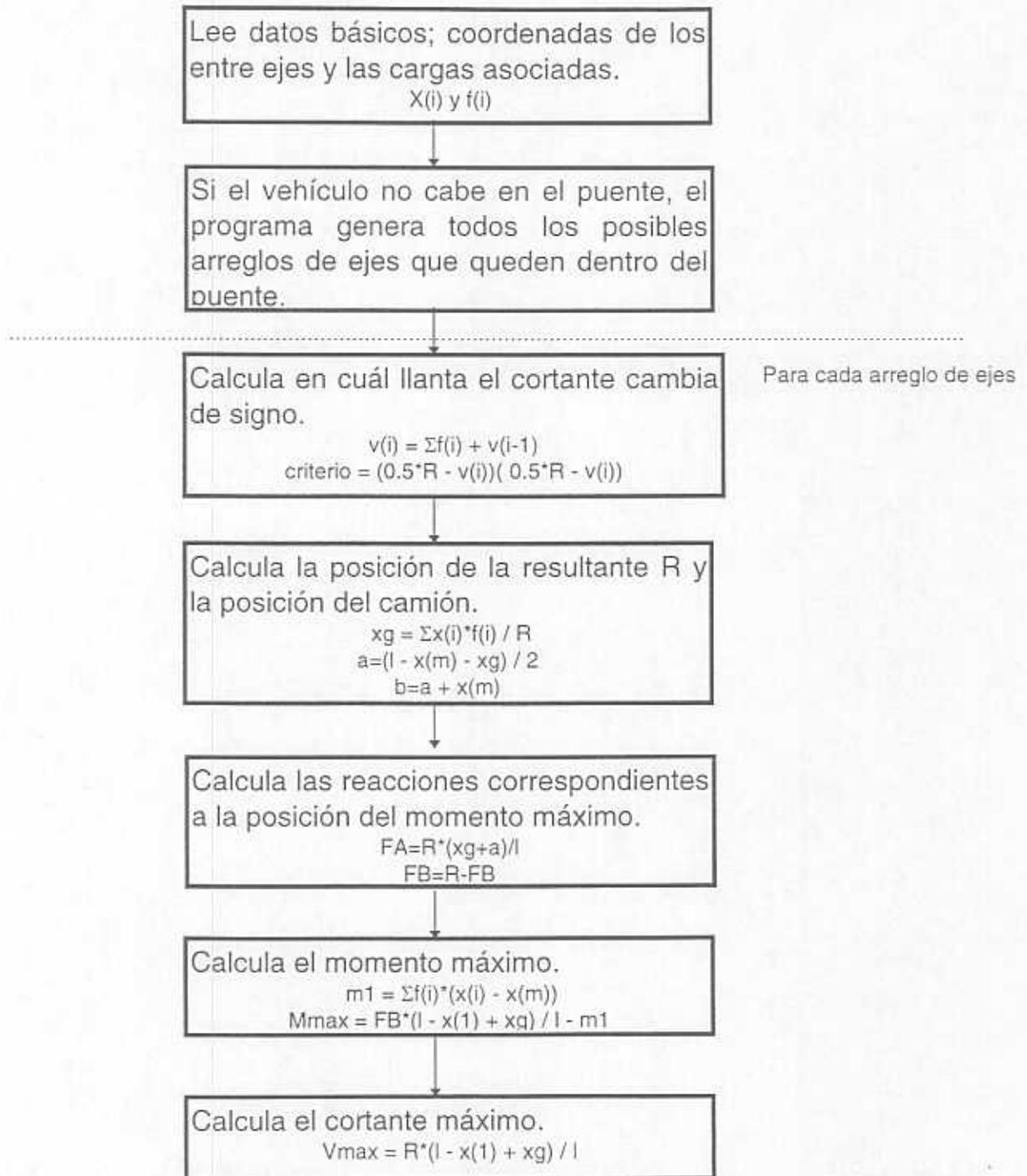
Las bases del programa de cómputo para encontrar el mayor momento flexionante son:

1. Localización relativa de la llanta " $m$ ", o sea, donde el cortante cambia de signo, tomando como hipótesis que la reacción en " $A$ " o " $B$ " es del orden de  $R/2$ , desarrollado como parte de este trabajo .
2. Cálculo de " $a$ ", apoyándose en la condición de equidistancia al centro geométrico de " $R$ " y de la llanta " $m$ ".
3. Obtención del momento flexionante.

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

La fuerza cortante máxima es más sencilla de obtener, ya que corresponde a la posición inmediata de entrada o salida del vehículo.

El diagrama de bloques del programa desarrollado es el siguiente:



↓

Para cada arreglo de ejes da el momento y cortante máximo.

En las figuras 7.57 a 7.86 se muestran los histogramas de los elementos mecánicos para cada tipo de vehículo y para los tres tipos de claros analizados. Para fines comparativos, en ellas se incluyen los valores de momentos y cortantes que provocan los vehículos y modelos de carga HS-20-44, H15-44, OHBEL y HL-93. Estos valores son nominales, es decir, no tienen ningún factor de carga, con el objeto de poder compararlos con los valores de los vehículos mexicanos. Asimismo, en cada figura se tienen los valores de la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación, el mínimo, el máximo y el tamaño de la muestra correspondiente.

Un resumen de los valores medios de los momentos, así como del cociente entre el momento que produce un vehículo HS-20-44 y la media del momento calculado, se presentan en la tabla 7.2. En esta comparación se utilizó el vehículo HS-20-44, ya que un buen número de puentes en México han sido diseñados con este vehículo. En la tabla se puede observar que el valor promedio de los momentos para los vehículos C-2, C-3 y T3-S2, están por debajo de los momentos que produce el vehículo HS-20-44; sin embargo, para el caso de los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4, los momentos que provocan son mayores al que produce el vehículo HS-20-44.

De esto se puede concluir que las cargas actuales, cada vez mayores, ya representan sobrecargas importantes no tomadas en cuenta en su momento, en el diseño de muchos de los puentes existentes, y que es importante considerar esto para revisar los puentes que se juzgen especialmente susceptibles de sufrir problemas serios.

El vehículo que en general produce los mayores elementos mecánicos es el T3-S3, ya que, aunque el vehículo T3-S2-R4 tiene mayor peso bruto vehicular, no cabe en puentes cortos y, además, las distancias entre ejes son mayores que las del vehículo T3-S3, por lo cual produce en ellos elementos mecánicos menores.

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

En la tabla 7.3 se presentan los cortantes promedio, en la cual se puede observar una situación muy similar a la de los momentos flexionantes, encontrándose también que el vehículo que produce los cortantes mayores es el T3-S3.

Tabla 7.2. MOMENTOS PROMEDIO Y SU COMPARACION CON LOS QUE PRODUCEN EL VEHICULO HS20-44

Tipo de vehículo	Momento en t-m, para los tres claros			Cociente entre el momento que produce el vehículo HS-20-44 y la media de los momentos calculados.		
	15 m	30 m	45 m	15 m	30 m	45 m
C-2	32.87 (0.413) <sup>1</sup>	77.56 (0.343)	122.70 (0.325)	2.611	2.696	2.724
C-3	69.05 (0.369)	154.58 (0.353)	240.15 (0.348)	1.243	1.353	1.392
T3-S2	57.77 (0.386)	184.35 (0.351)	316.69 (0.343)	1.485	1.134	1.055
T3-S3	106.79 (0.279)	319.75 (0.236)	539.15 (0.227)	0.804	0.654	0.620
T3-S2-R4	96.48 (0.374)	317.95 (0.360)	552.91 (0.307)	0.899	0.658	0.605

<sup>1</sup> Los valores dentro del paréntesis son los coeficientes de variación

Fuente: Propia, con los datos de los histogramas generados a partir de las bases de datos de pesos y dimensiones del año 1993

Tabla 7.3. CORTANTES PROMEDIO Y SU COMPARACION CON LOS QUE PRODUCEN EL VEHICULO HS20-44

Tipo de vehículo	Cortantes en t, para los tres claros			Cociente entre el cortante que produce el vehículo HS-20-44 y la media de los cortantes calculados.		
	15 m	30 m	45 m	15 m	30 m	45 m
C-2	10.25 (0.349) <sup>1</sup>	11.17 (0.317)	11.48 (0.309)	2.611	2.677	2.908
C-3	20.22 (0.359)	21.52 (0.348)	21.96 (0.345)	1.323	1.389	1.520
T3-S2	20.66 (0.424)	28.01 (0.369)	30.52 (0.356)	1.295	1.067	1.094
T3-S3	37.86 (0.255)	48.32 (0.229)	51.85 (0.223)	0.707	0.619	0.644
T3-S2-R4	30.40 (0.375)	44.35 (0.365)	54.46 (0.321)	0.880	0.674	0.613

<sup>1</sup> Los valores dentro del paréntesis son los coeficientes de variación

Fuente: Propia, con los datos de los histogramas generados a partir de las bases de datos de pesos y dimensiones del año 1993

En las tablas 7.4, 7.5 y 7.6 se presentan los porcentajes de vehículos que exceden el momento y el cortante que se producen con las cargas de los reglamentos a los que se hace referencia.

En la tabla 7.4 se presentan los resultados correspondientes al claro de 15m. En ella se destaca que el 44.17 % y el 50.62 % de los vehículos T3-S3, exceden el momento y el cortante, respectivamente, del que produce un vehículo HS-20-44. Para el vehículo C-2, se observa que los momentos y cortantes que produce el vehículo H15-44 exceden el 14.59 % y el 21.5 %, respectivamente. En general, se puede observar que las cargas propuestas por los reglamentos de Ontario y el AASHTO nuevo, producen elementos mecánicos más acordes con las nuevas cargas que se ven en las carreteras mexicanas.

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

La situación anterior se va agravando conforme se aumenta el claro del puente (tablas 7.5 y 7.6), llegándose a valores del 54.17 % y 53.20 % de excedencia en momentos y cortantes, respectivamente, para el vehículo T3-S3 con respecto al vehículo HS20-44.

**Tabla 7.4. PORCENTAJES DE EXCEDENCIA, EN MOMENTOS Y EN CORTANTES, CON RESPECTO A VARIOS MODELOS REGLAMENTARIOS DE CARGA VIVA. PUENTES CON CLARO DE 15 M.**

Tipo de vehículo	MODELO DE CARGA VIVA							
	HS-20-44		H15-44		OHBEL		HL-93	
	M	V	M	V	M	V	M	V
C-2	0.27 <sup>1</sup>	0.64	14.59	21.5	0	0	0	0
C-3	17.21	12.32	44.38	46.29	0.36	0.47	0.91	0.46
T3-S2	8.43	17.74	44.71	54.63	0.68	1.30	1.30	0.68
T3-S3	44.17	50.62	57.1	57.72	7.42	22.25	8.70	21.60
T3-S2-R4	45.04	44.08	62.31	67.43	8.25	13.37	9.53	12.73

<sup>1</sup> Estos porcentajes fueron calculados con respecto al total de los vehículos pesados  
Fuente: Propia, con los datos de los histogramas generados a partir de las bases de datos de pesos y dimensiones del año 1993

**Tabla 7.5 PORCENTAJES DE EXCEDENCIA, EN MOMENTOS Y EN CORTANTES, CON RESPECTO A VARIOS MODELOS REGLAMENTARIOS DE CARGA VIVA. PUENTES CON CLARO DE 30 M.**

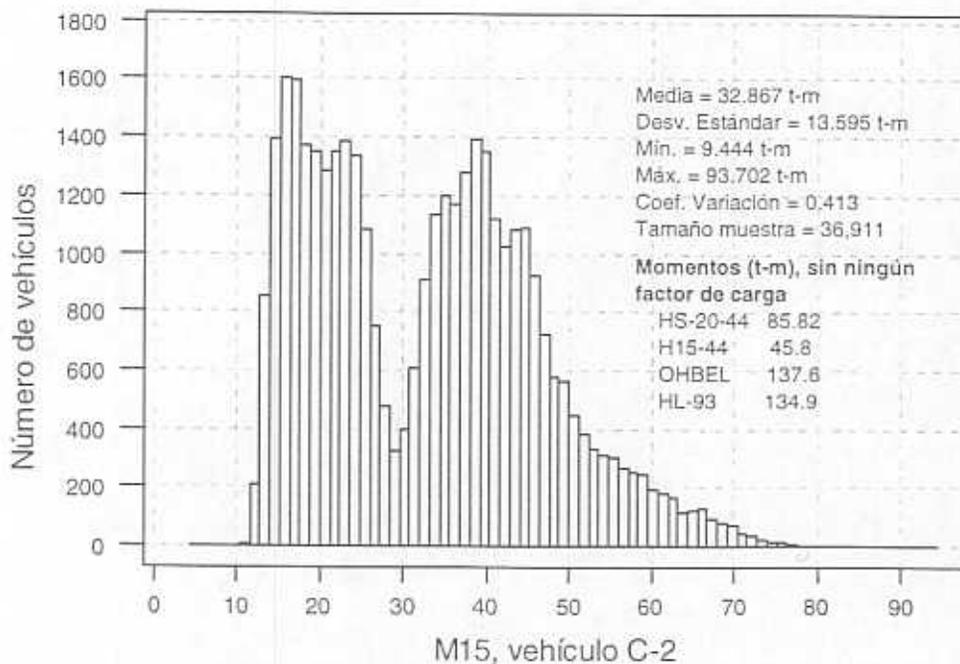
Tipo de vehículo	MODELO DE CARGA VIVA							
	HS-20-44		H15-44		OHBEL		HL-93	
	M	V	M	V	M	V	M	V
C-2	0.52 <sup>1</sup>	1.01	20.76	12.37	0	0	0	0
C-3	10.69	8.79	46.56	43.84	0	0	0	0
T3-S2	24.24	26.11	70.76	66.41	0.68	1.92	0.06	0.68
T3-S3	52.55	53.52	58.03	100	9.99	22.25	10.32	19.67
T3-S2-R4	54.64	53.04	100	100	22.0	24.89	22.33	22.33

<sup>1</sup> Estos porcentajes fueron calculados con respecto al total de los vehículos pesados  
Fuente: Propia, con los datos de los histogramas generados a partir de las bases de datos de pesos y dimensiones del año 1993

**Tabla 7.6 PORCENTAJES DE EXCEDENCIA, EN MOMENTOS Y EN CORTANTES, CON RESPECTO A VARIOS MODELOS REGLAMENTARIOS DE CARGA VIVA. Puentes con claro de 45 M.**

Tipo de vehículo	MODELO DE CARGA VIVA							
	HS-20-44		H15-44		OHBEL		HL-93	
	M	V	M	V	M	V	M	V
C-2	0.27 <sup>1</sup>	0.27	22.24	24.46	0	0	0	0
C-3	9.06	3.89	47.65	47.76	0	0	0	0
T3-S2	29.21	27.66	73.24	73.24	0.06	0.06	0.68	0.68
T3-S3	54.17	53.20	100	100	3.87	6.77	6.13	9.35
T3-S2-R4	56.88	54.32	100	100	12.73	14.65	17.85	17.21

<sup>1</sup> Estos porcentajes fueron calculados con respecto al total de los vehículos pesados  
 Fuente: Propia, con los datos de los histogramas generados a partir de las bases de datos de pesos y dimensiones del año 1993



**Figura 7.57 Momento longitudinal en t-m, vehículo C-2 y claro de 15 m**

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

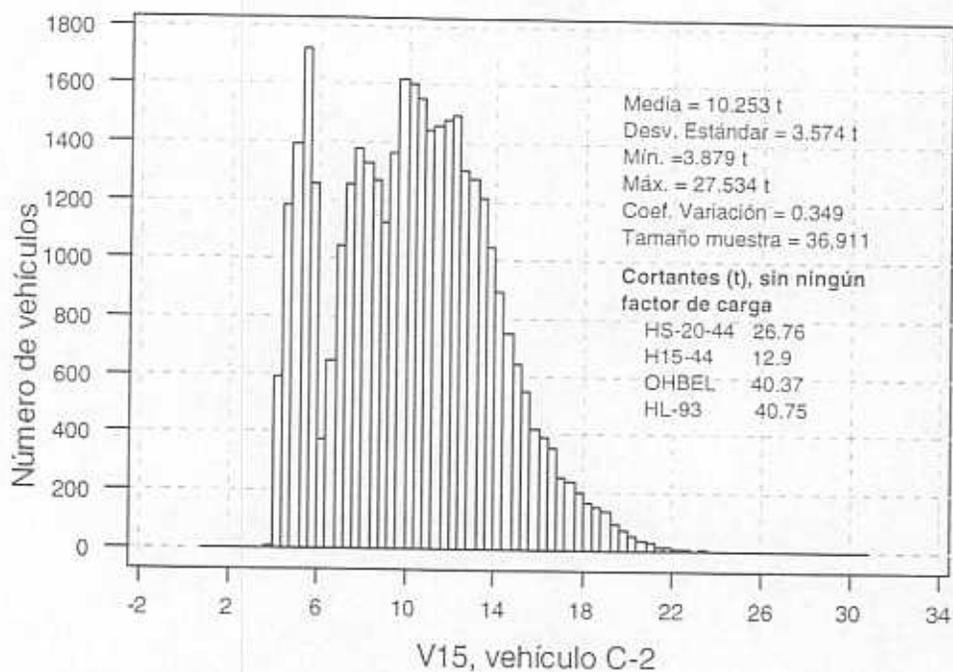


Figura 7.58 Cortante longitudinal en ton, vehículo C-2 y claro de 15 m

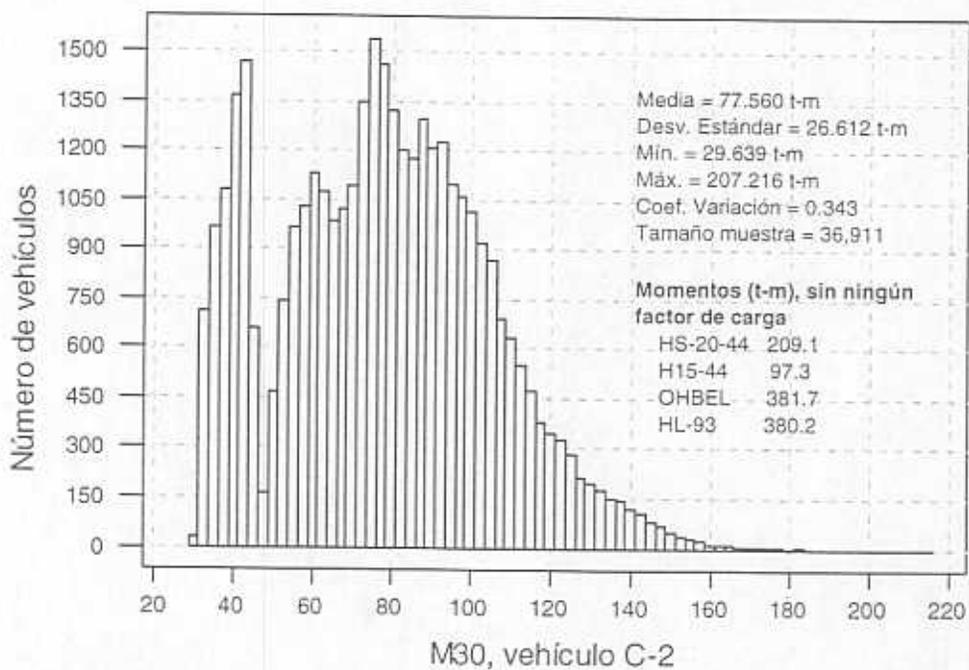


Figura 7.59 Momento longitudinal en t-m, vehículo C-2 y claro de 30 m

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

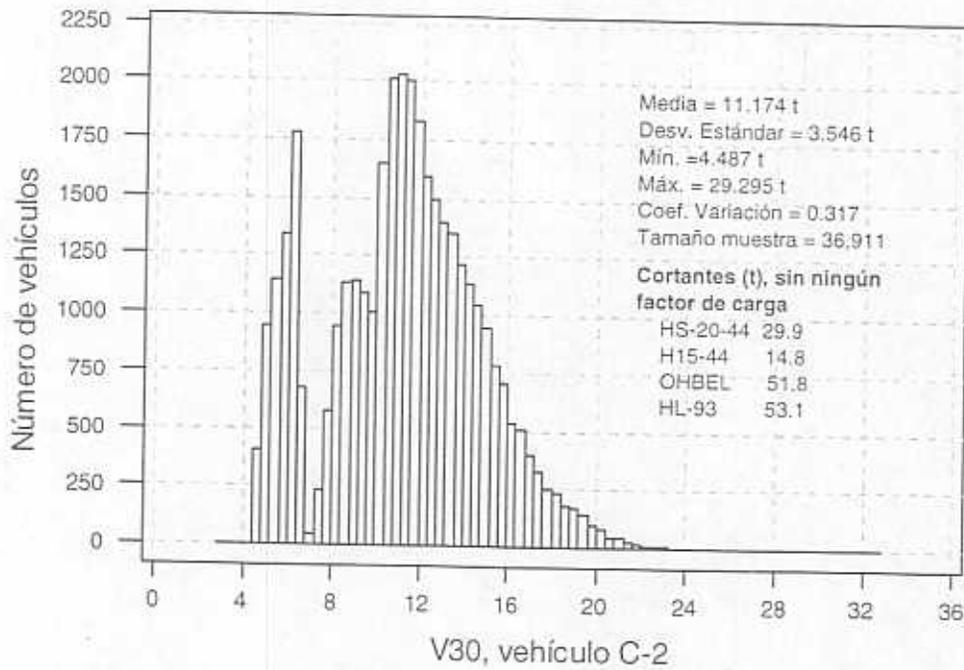


Figura 7.60 Cortante longitudinal en ton, vehículo C-2 y claro de 30 m

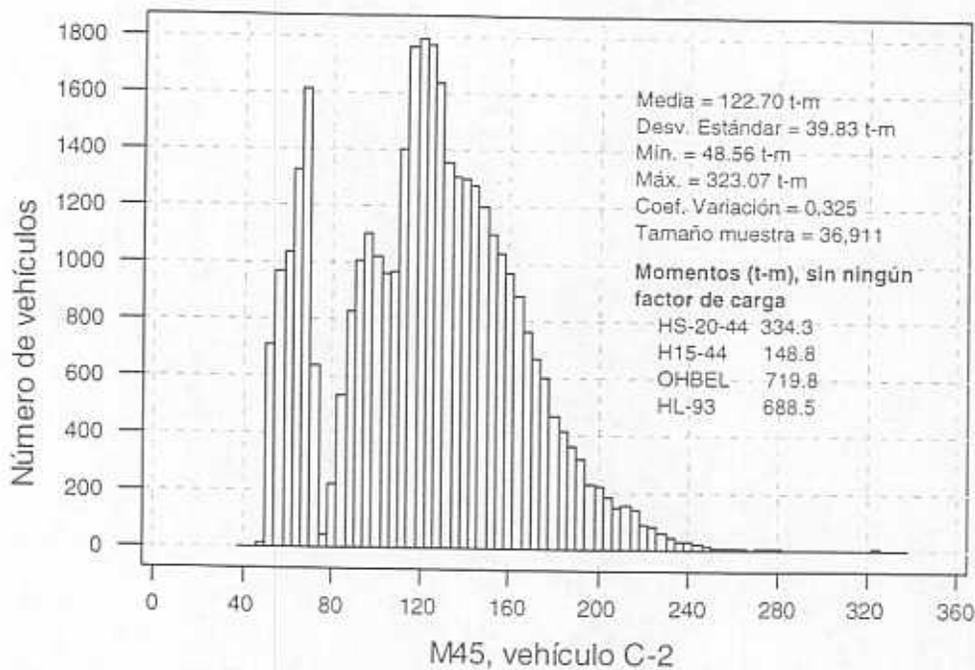


Figura 7.61 Momento longitudinal en t-m, vehículo C-2 y claro de 45 m

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

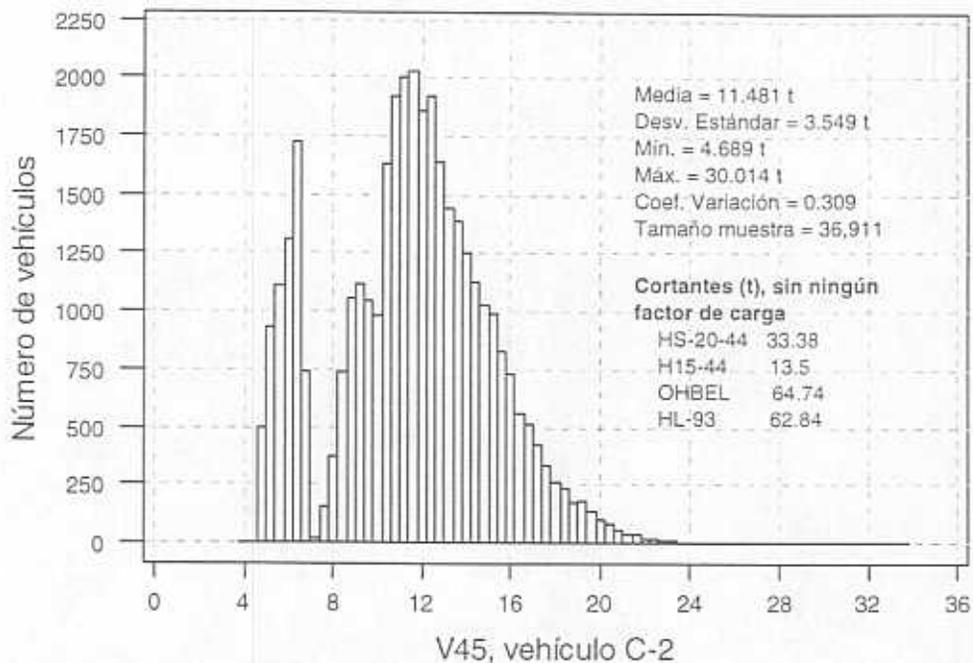


Figura 7.62 Cortante longitudinal en ton, vehículo C-2 y claro de 45 m

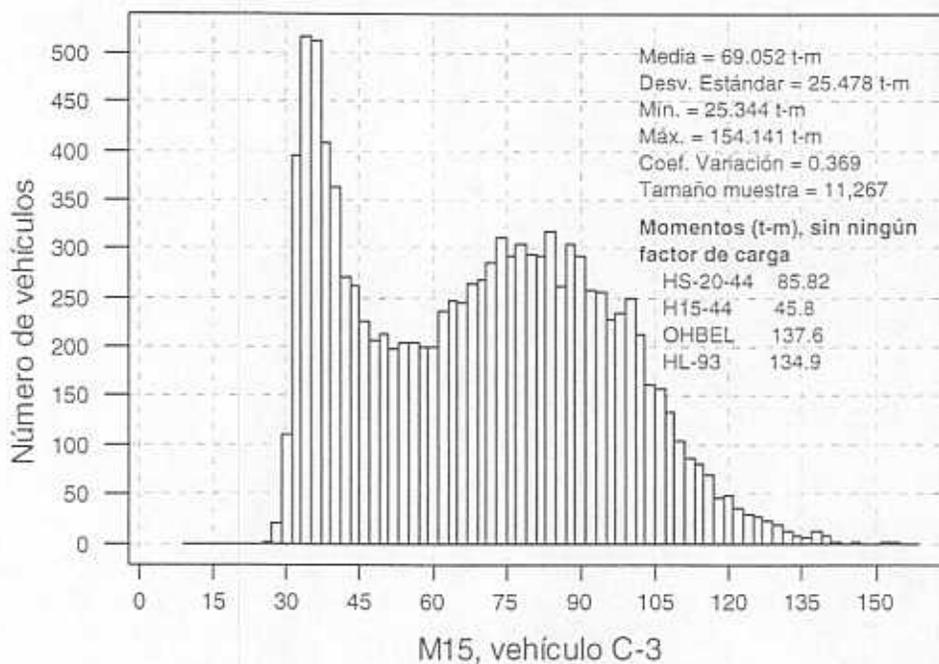


Figura 7.63 Momento longitudinal en t-m, vehículo C-3 y claro de 15 m

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

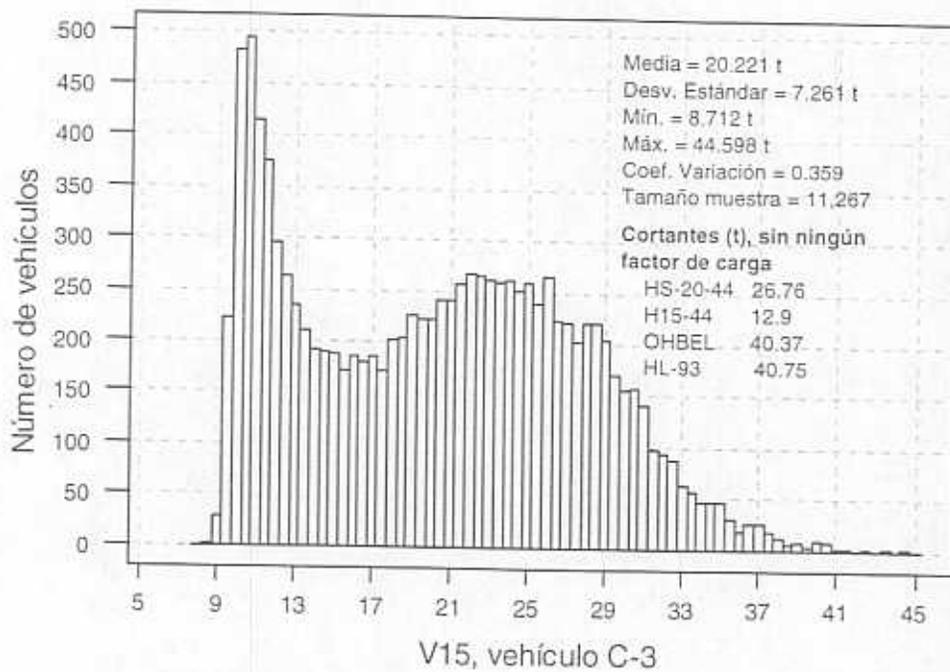


Figura 7.64 Cortante longitudinal en ton, vehículo C-3 y claro de 15 m

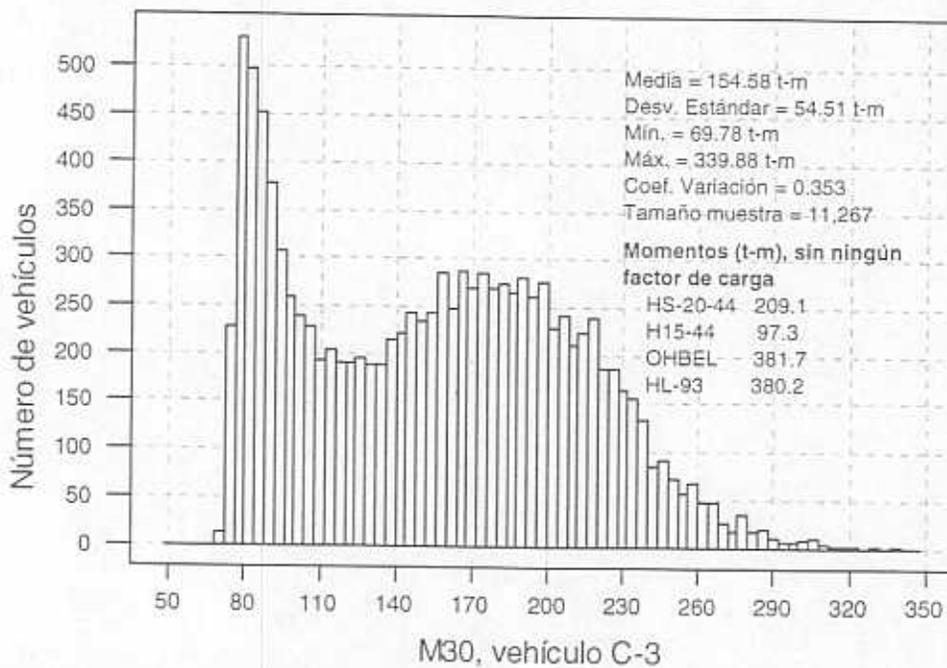


Figura 7.65 Momento longitudinal en t-m, vehículo C-3 y claro de 30 m

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

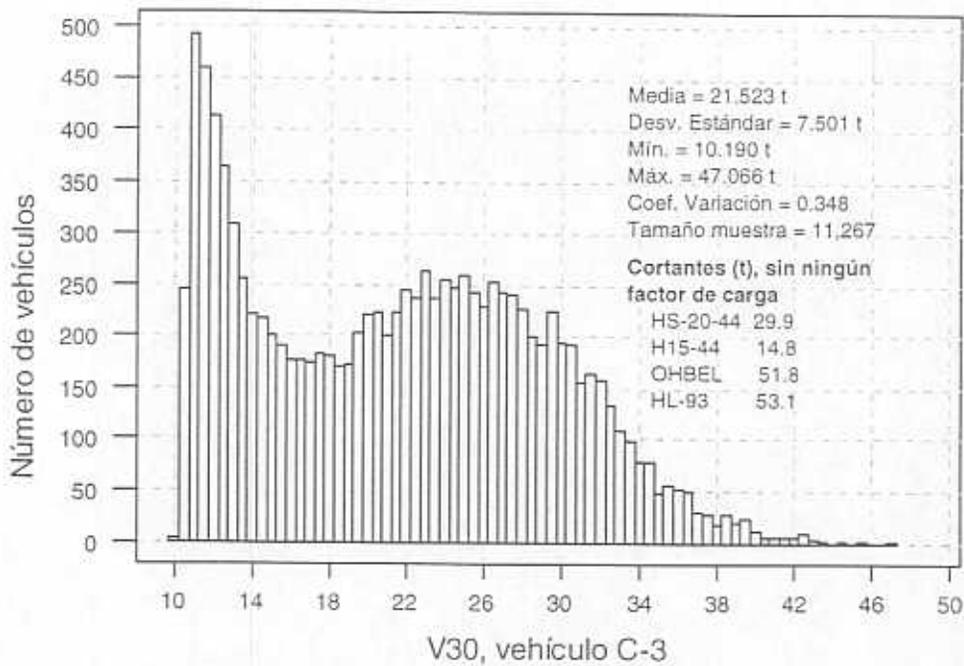


Figura 7.66 Cortante longitudinal en ton, vehículo C-3 y claro de 30 m

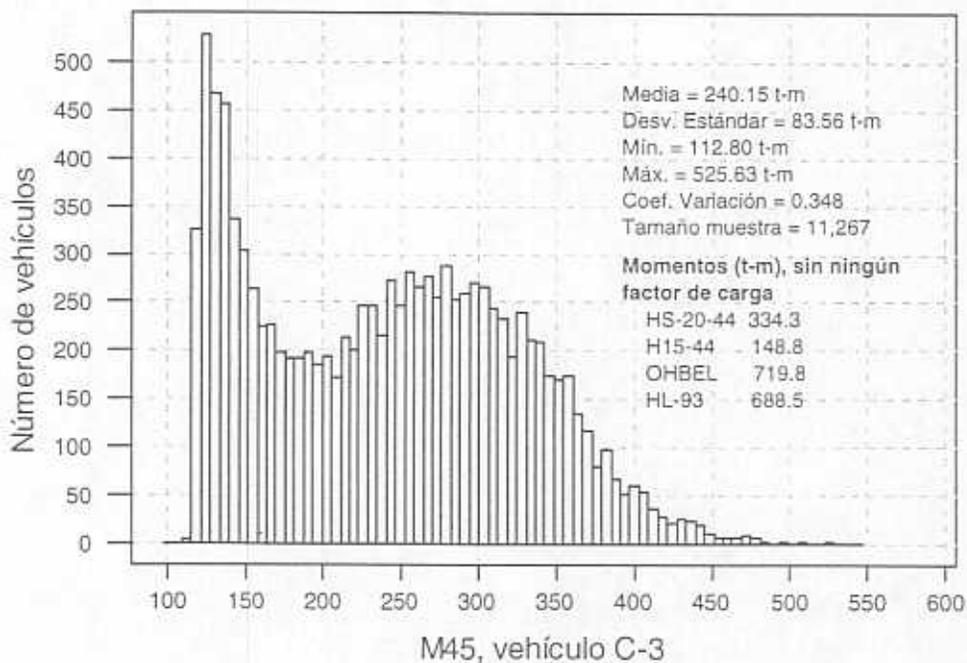


Figura 7.67 Momento longitudinal en t-m, vehículo C-3 y claro de 45 m

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

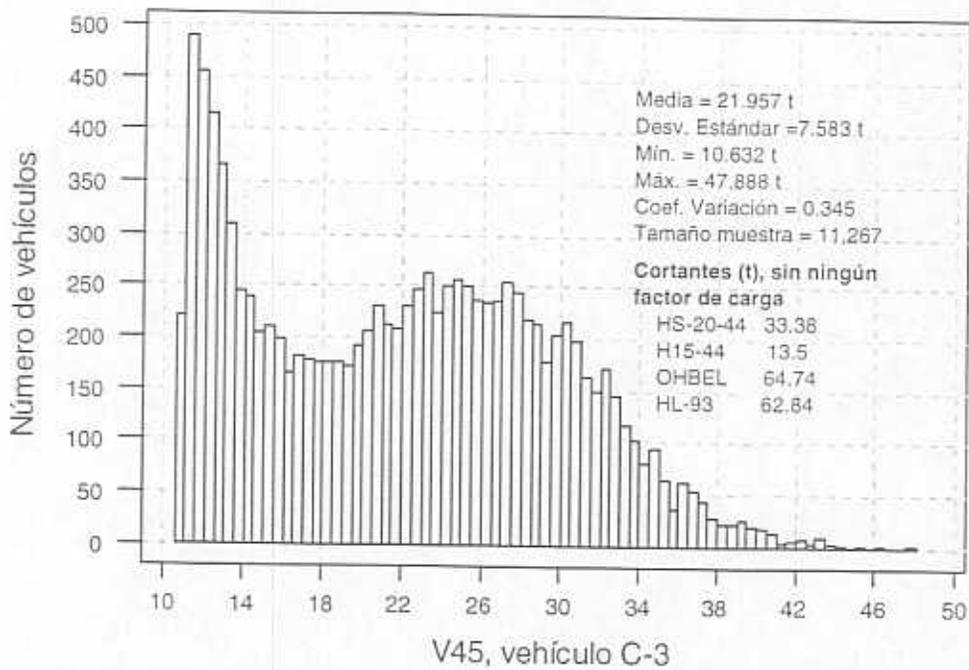


Figura 7.68 Cortante longitudinal en ton, vehículo C-3 y claro de 45 m

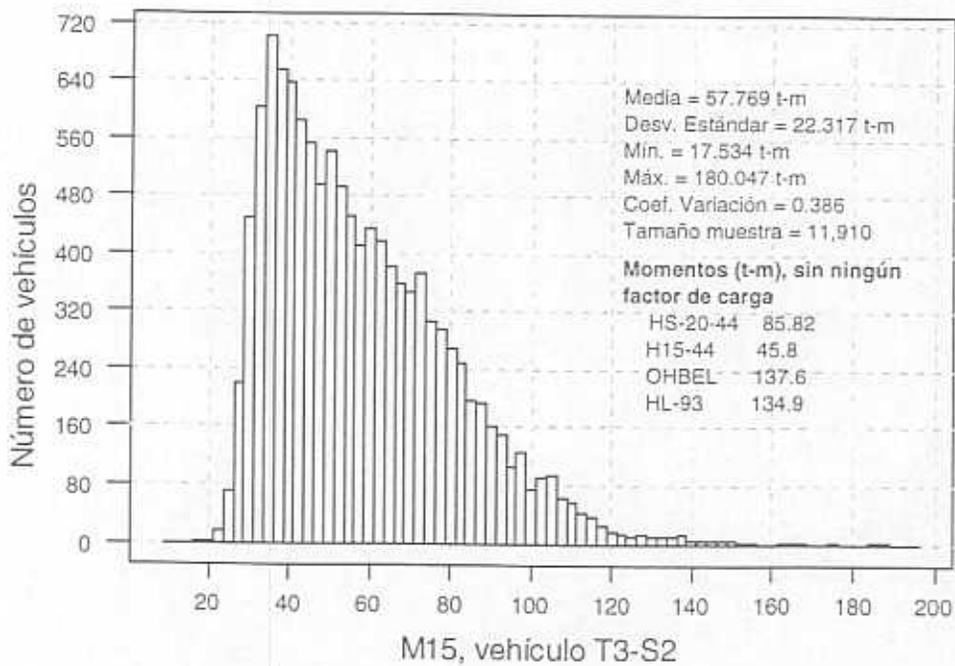


Figura 7.69 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S2 y claro de 15 m

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

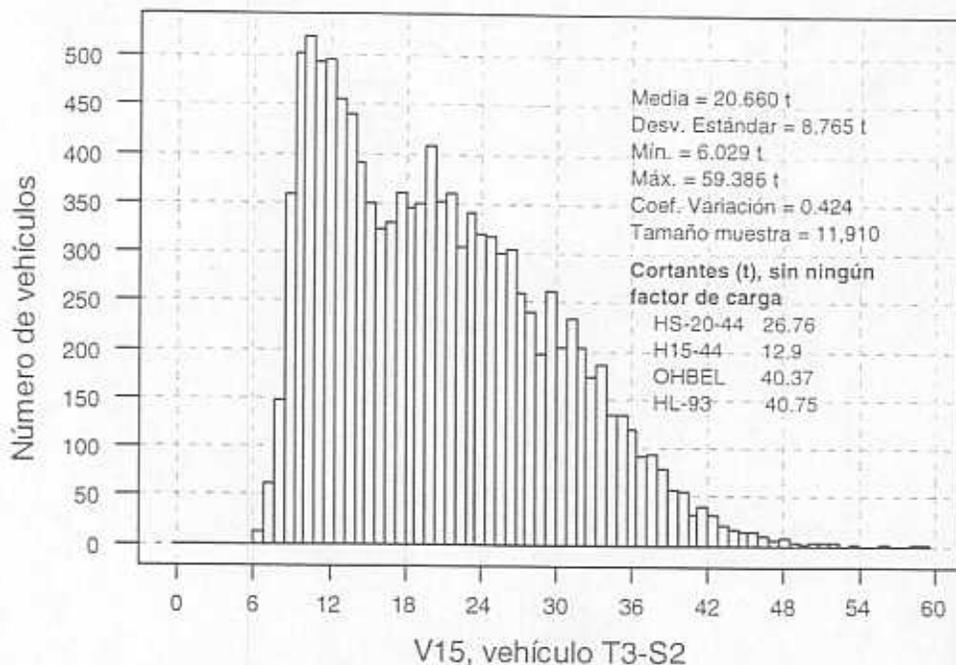


Figura 7.70 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S2 y claro de 15 m

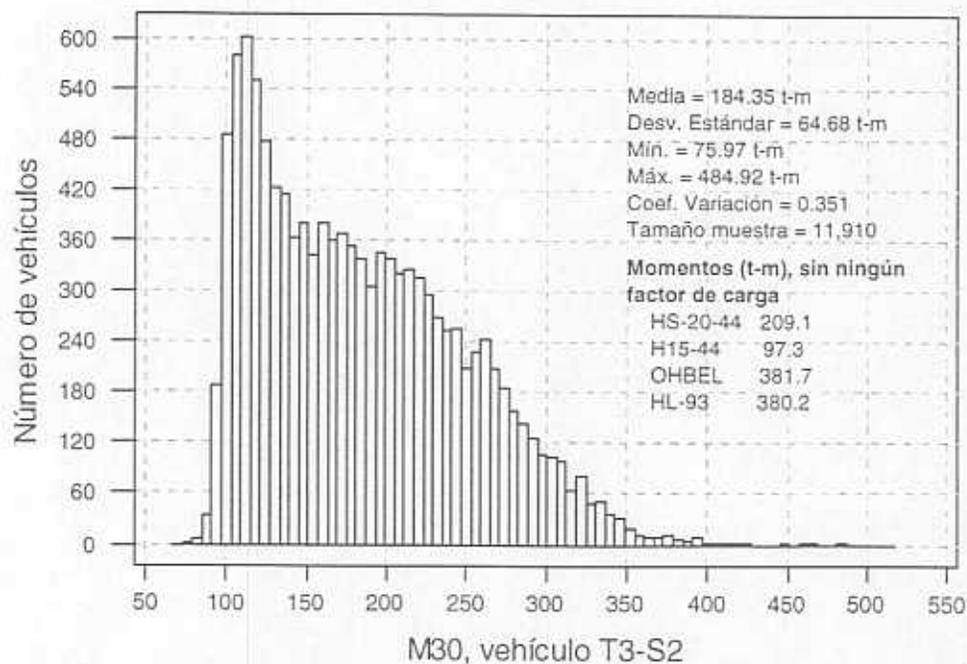


Figura 7.71 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S2 y claro de 30 m

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

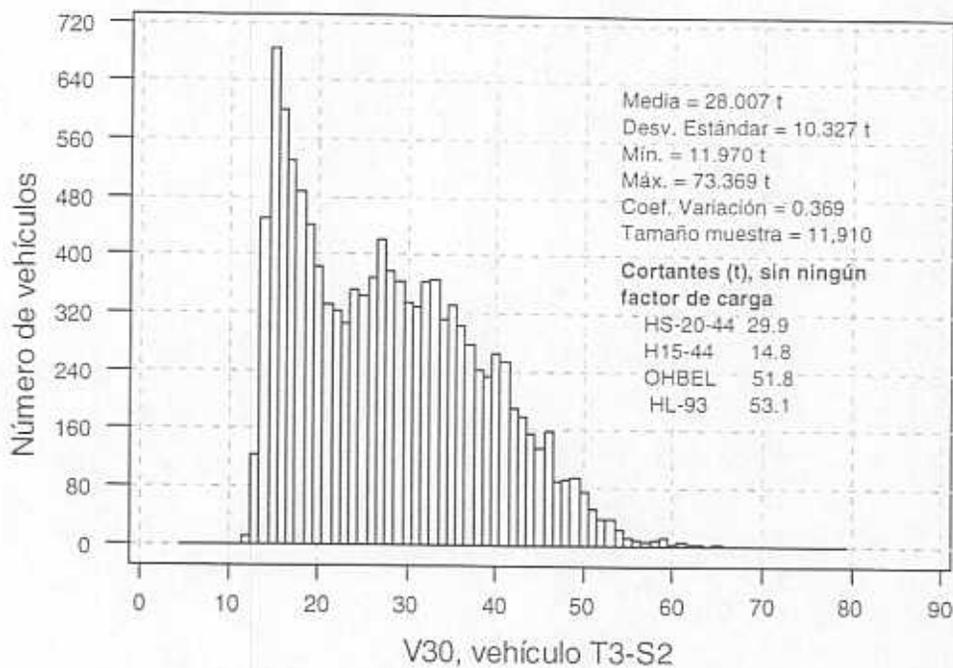


Figura 7.72 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S2 y claro de 30 m

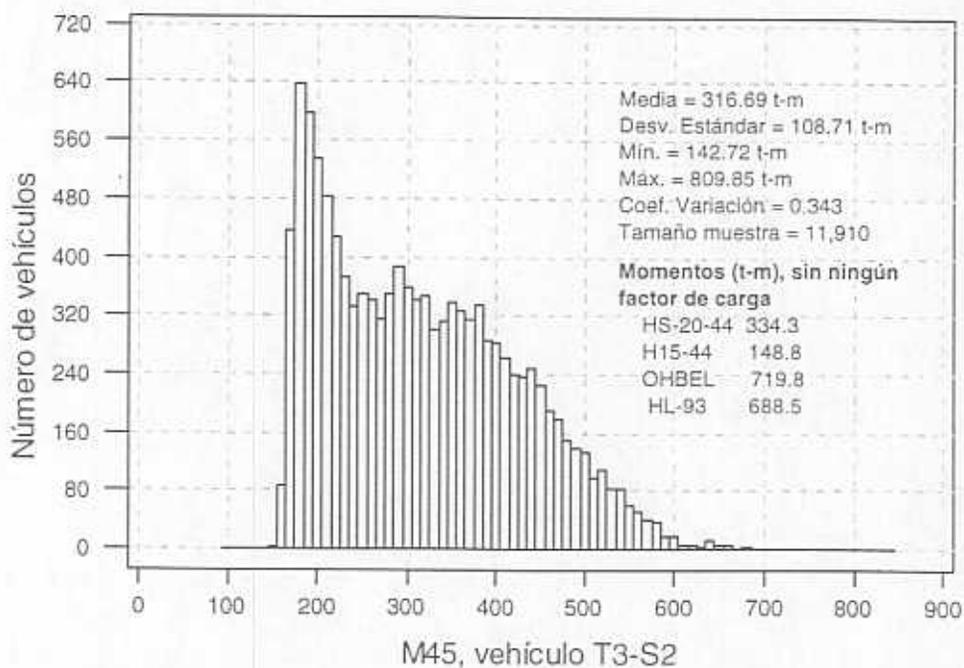


Figura 7.73 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S2 y claro de 45 m

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

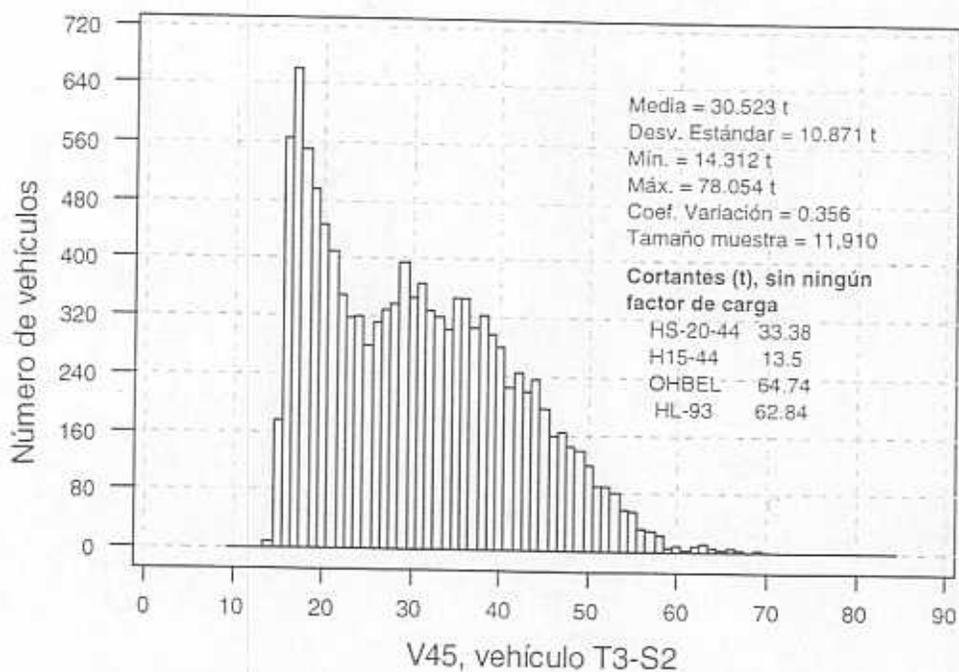


Figura 7.74 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S2 y claro de 45 m

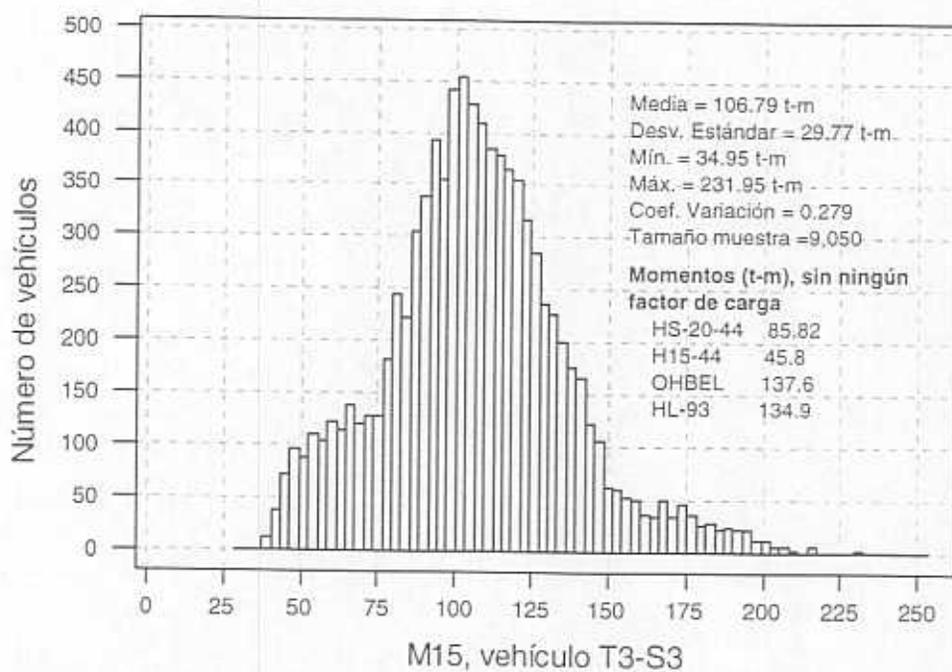


Figura 7.75 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S3 y claro de 15 m

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

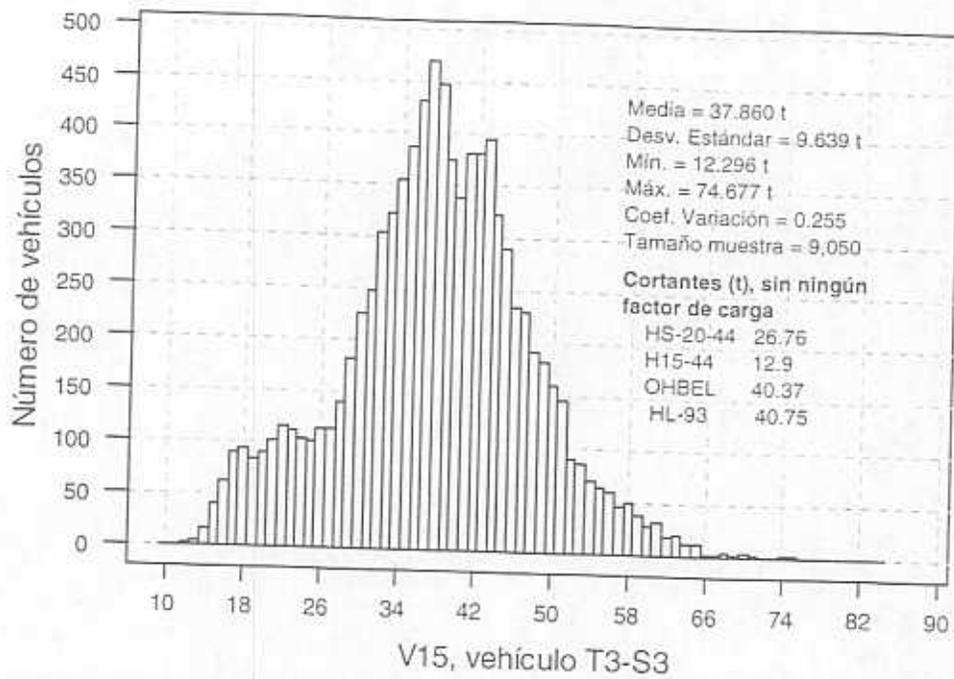


Figura 7.76 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S3 y claro de 15 m

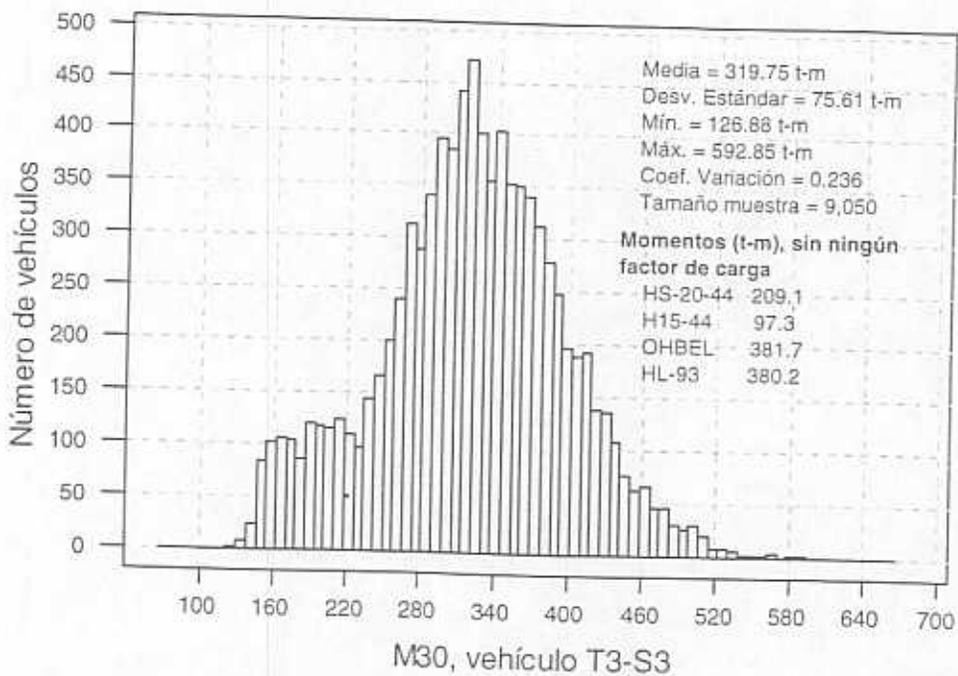


Figura 7.77 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S3 y claro de 30 m

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

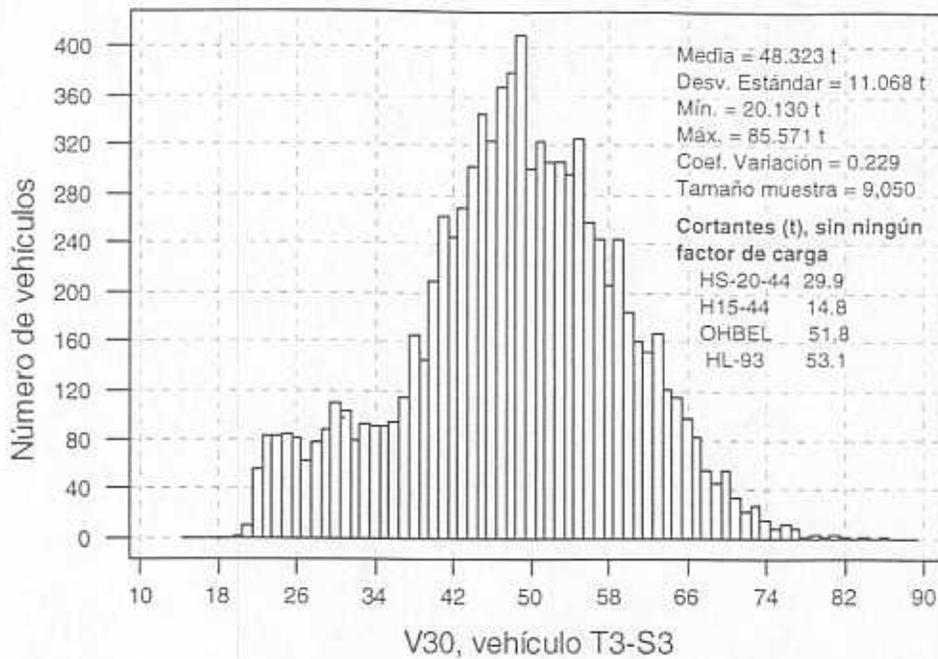


Figura 7.78 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S3 y claro de 30 m

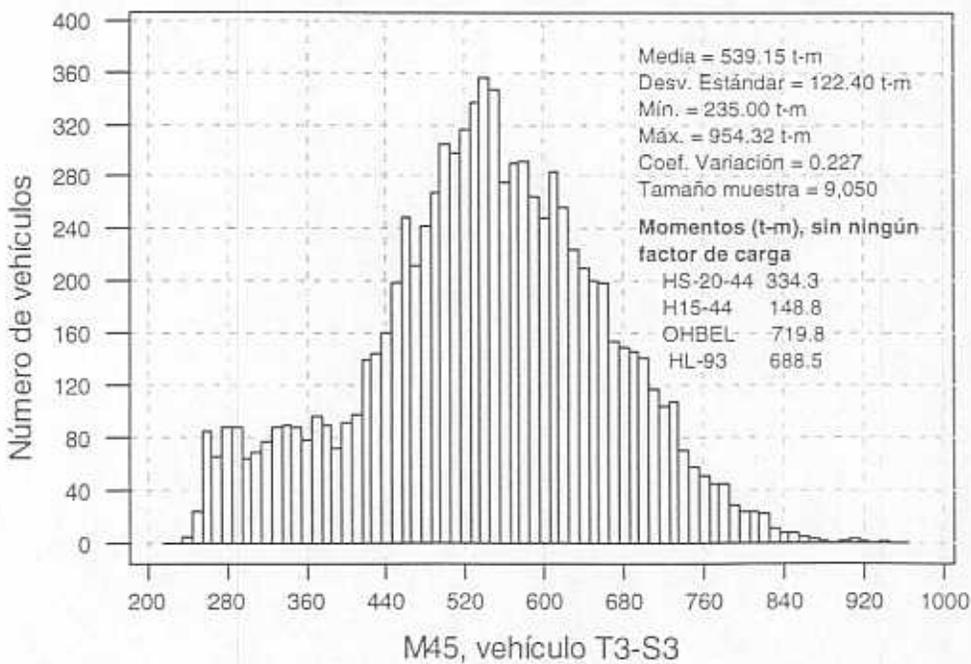


Figura 7.79 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S3 y claro de 45 m

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

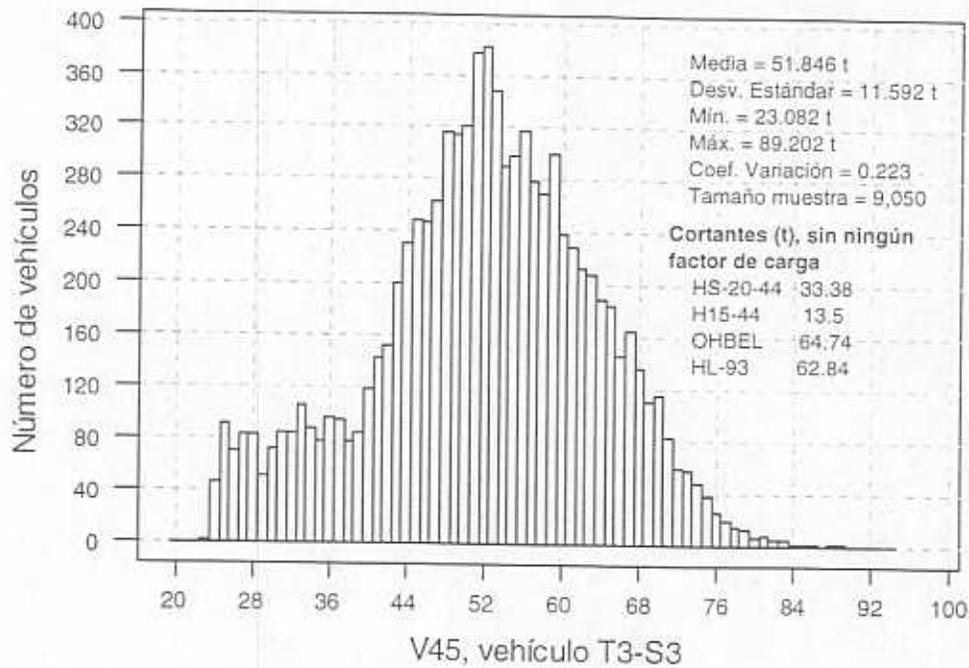


Figura 7.80 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S3 y claro de 45 m

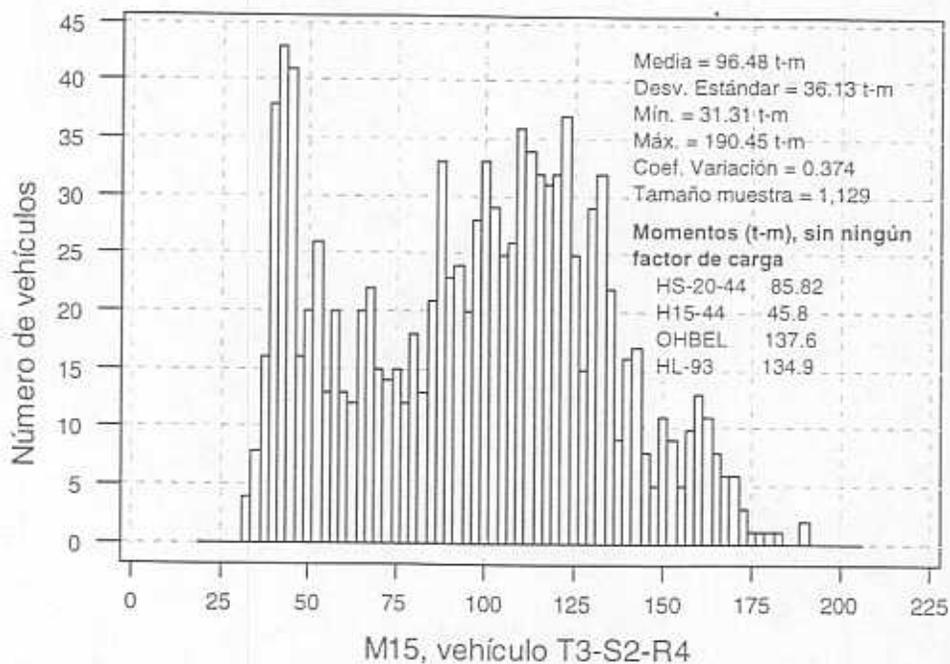


Figura 7.81 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S2-R4 y claro de 15 m

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

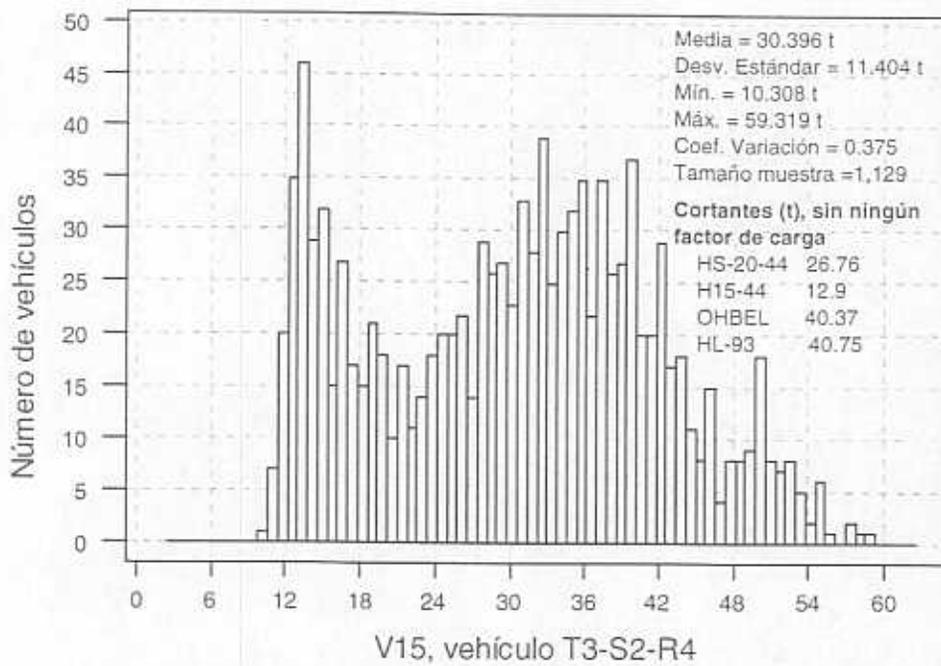


Figura 7.82 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S2-R4 y claro de 15 m

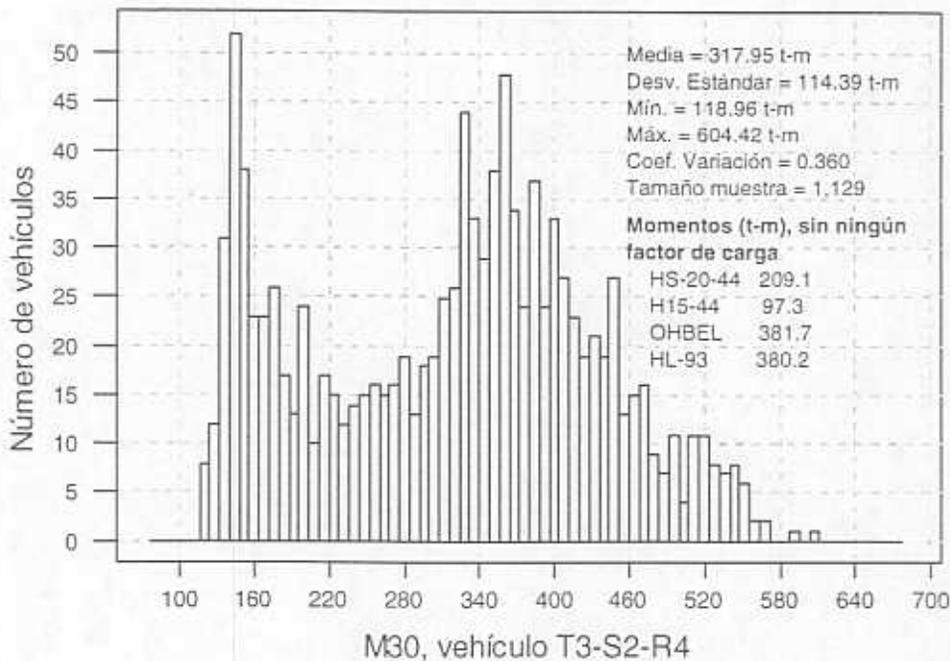


Figura 7.83 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S2-R4 y claro de 30 m

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

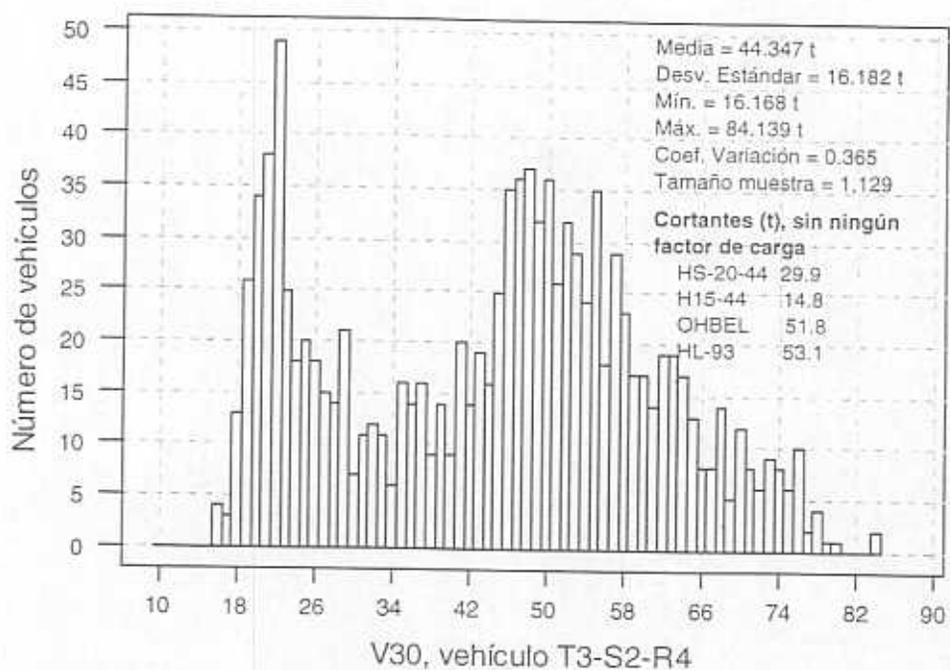


Figura 7.84 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S2-R4 y claro de 30 m

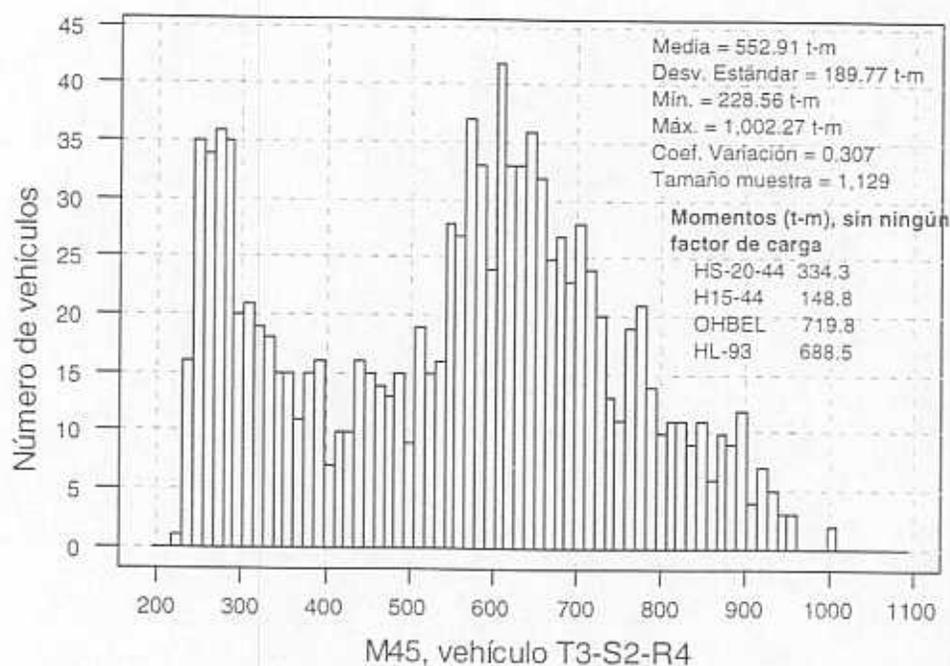


Figura 7.85 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S2-R4 y claro de 45 m

7. Análisis estadístico de las cargas vivas y de sus efectos en puentes

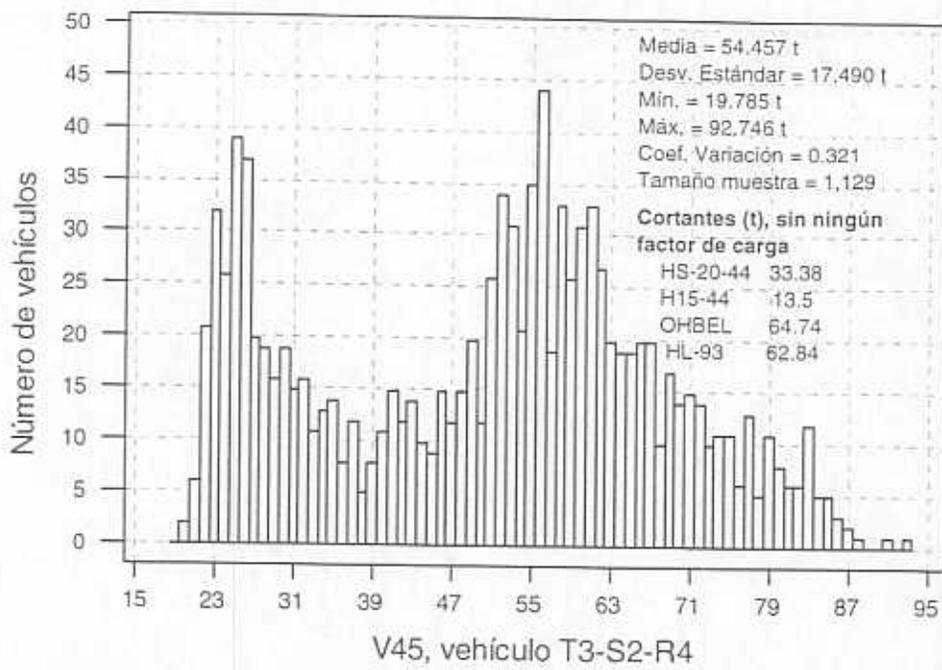


Figura 7.86 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S2-R4 y claro de 45 m

## 8. Análisis de elementos mecánicos

### 8.1 Elementos mecánicos calculados usando el Reglamento de Ontario

En la figuras 8.1 y 8.2 se presentan las gráficas correspondientes a "momentos flexionantes máximos vs. longitudes" y "cortantes máximos vs. longitudes", calculados para puentes simplemente apoyados y de un solo claro, sin afectar por factor alguno a los elementos mecánicos, debidos a las cargas vivas especificadas en el Reglamento OHBDC.

Analizando la gráfica 8.1, se observa que de los 18 m a los 30 m tienen dos tramos lineales y después su variación se vuelve ligeramente curva; esto obedece a que en tramos pequeños el camión tiene mayor longitud que el puente, por lo que hay que estudiar las configuraciones cuando entra y sale el camión; después de los 18 m el camión es más pequeño que la longitud del puente, pero hasta los 30 m rigen las cargas puntuales, y después rige la combinación de cargas puntuales con uniformemente distribuida.

Algo semejante sucede para los cortantes (figura 8.2).

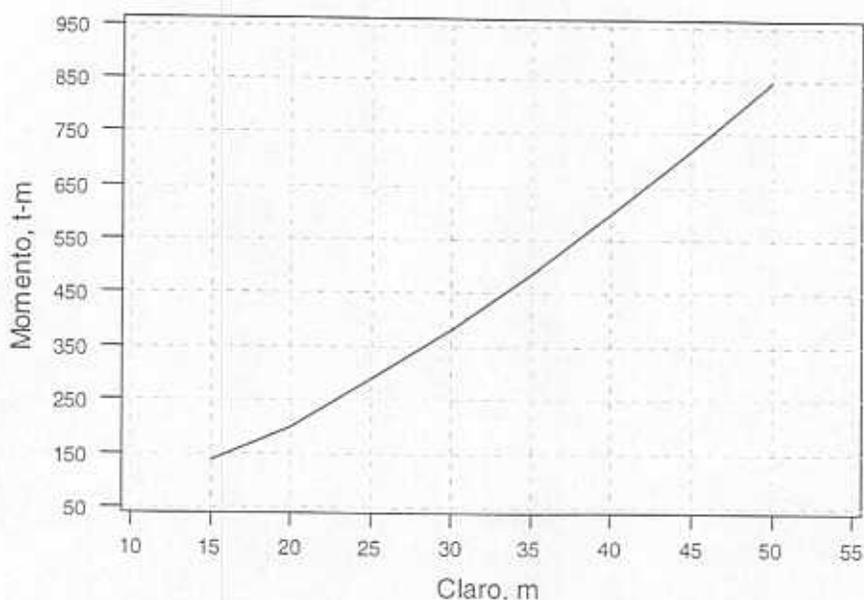


Figura 8.1 Momentos máximos, sin ningún factor de carga, de acuerdo al reglamento OHBDC

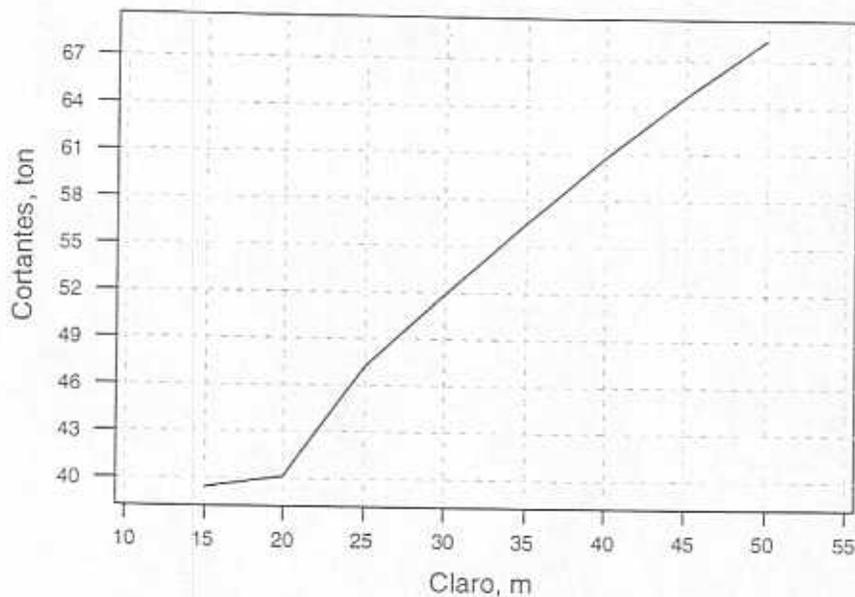


Figura 8.2 Cortantes máximos, sin ningún factor de carga, de acuerdo al reglamento OHBDC

## 8.2. Elementos mecánicos calculados usando el Reglamento AASHTO

Las gráficas 8.3 y 8.4 muestran los “momentos flexionantes máximos vs. longitud” y “cortante máximo vs. longitud”, que se calcularon empleando la carga “HS-20-44”, para puentes simplemente apoyados, de un solo claro, sin afectar los elementos mecánicos por factor alguno. De igual forma, se muestran las gráficas 8.5 y 8.6 correspondientes a la carga “HL-93”:

Observando las figuras 8.3 y 8.4, se nota que existen tramos bien definidos; en los momentos flexionantes la forma de la curva cambia a los 45 m, en los cortantes los cambios aparecen a los 20, 25 y 40 m. La razón obedece a que, en un principio, la carga puntual del HS20-44 es la que rige y, después, la carga uniformemente repartida HS20-44 produce mayores efectos.

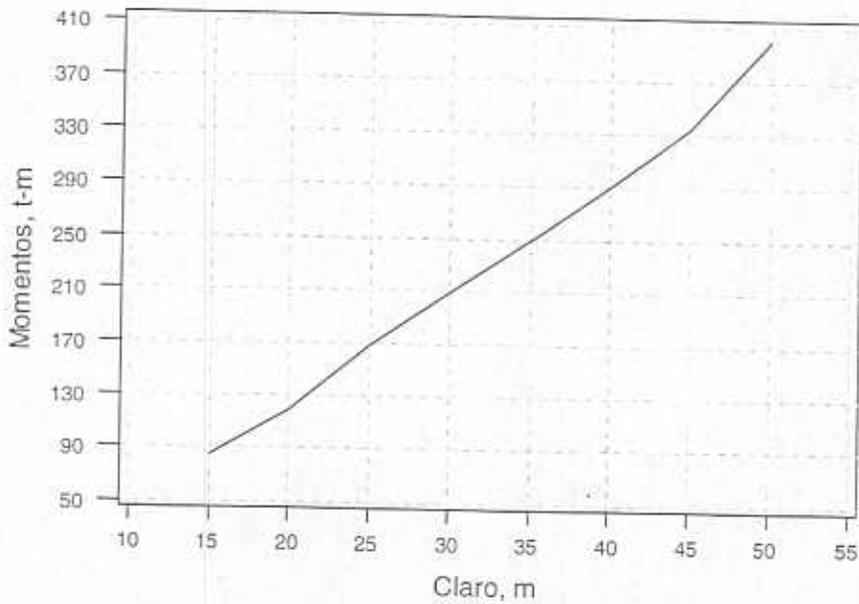


Figura 8.3 Momentos máximos, sin ningún factor de carga, de acuerdo al reglamento AASHTO, vehículo HS20-44

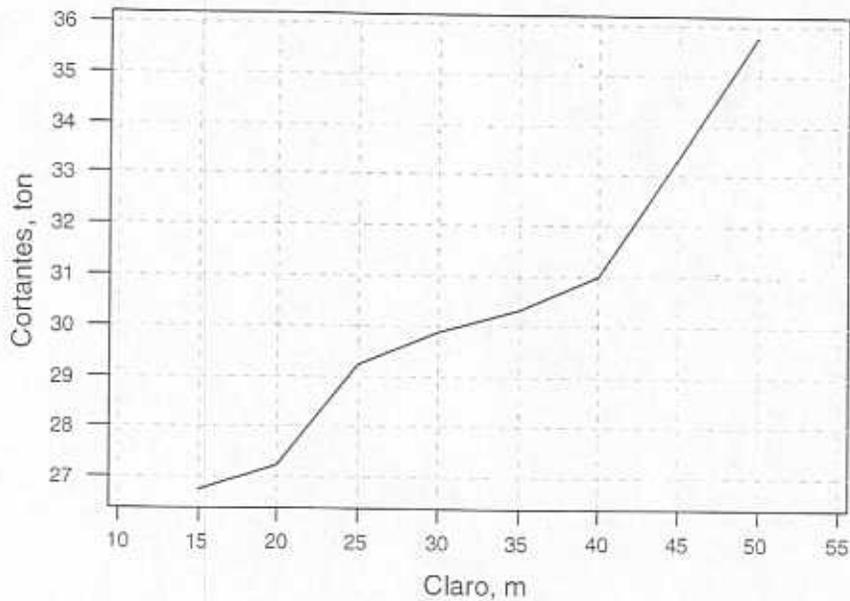


Figura 8.4 Cortantes máximos, sin ningún factor de carga, de acuerdo al reglamento ASHTO, vehículo HS20-44

Pasando a las figuras 8.5 y 8.6, del vehículo HL-93 se nota, en comparación con las anteriores, un incremento de cerca del 40% en su valor actual y una consistente forma curva en todo el intervalo analizado.

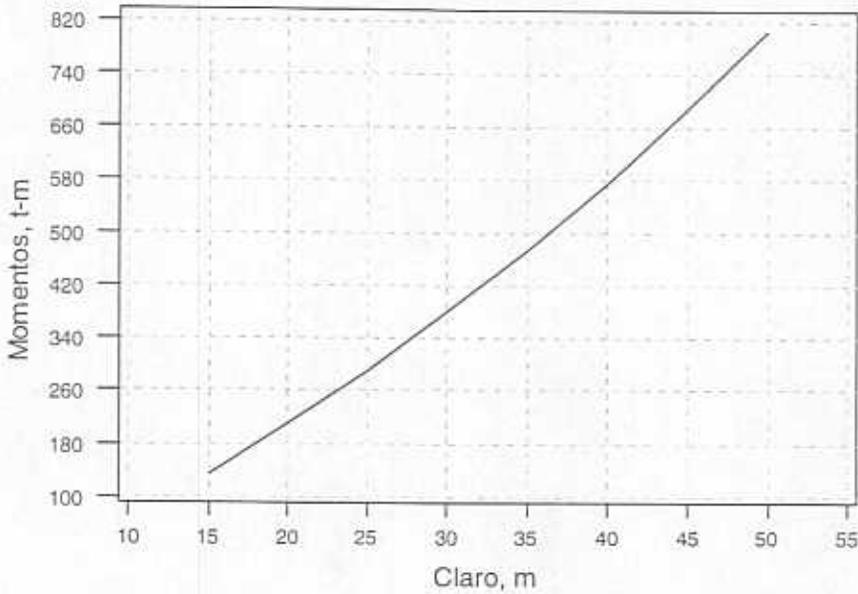


Figura 8.5 Momentos máximos, sin ningún factor de carga, de acuerdo al reglamento AASHTO-93 (vehículo HL-93)

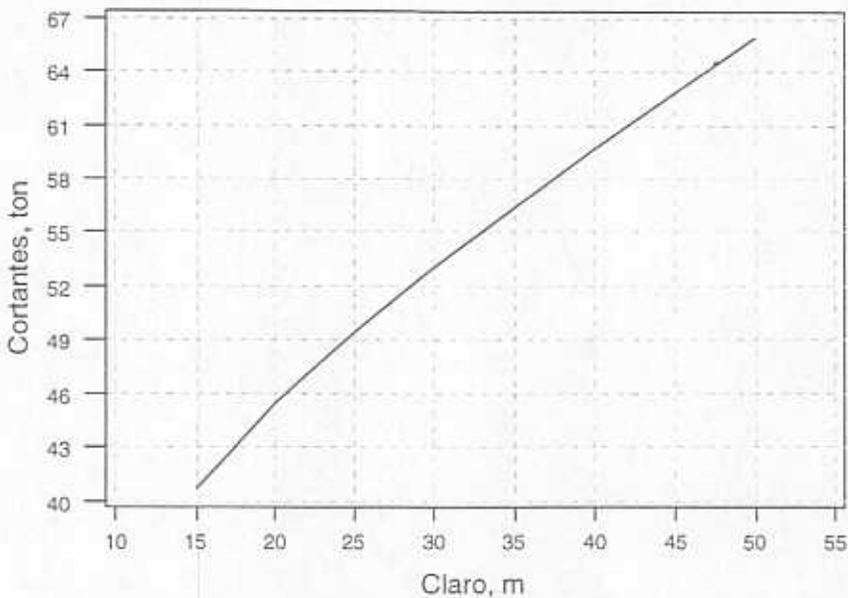


Figura 8.6 Cortantes máximos, sin ningún factor de carga, de acuerdo al reglamento AASHTO-93 (vehículo HL-93)

### 8.3 Elementos mecánicos calculados usando pesos y dimensiones reglamentarios de México

Debido a que existen vehículos con diversos pesos y dimensiones en el reglamento mexicano correspondiente, el primer paso es encontrar cuál de todos produce los mayores efectos en los puentes. A continuación se presentan los resultados de varias simulaciones para puentes simplemente apoyados de un claro, con longitudes de 20, 30, 40 y 60 m. Para estos análisis se utilizaron los pesos por eje y las distancias entre ejes definidas en el Reglamento de Pesos y Dimensiones.

Por simplicidad, en la tabla 8.1 se anotan por orden, de mayor a menor momento, los casos simulados, notándose que, en todos los casos, el T3-S2-R4 ocasionó los mayores efectos y, después, el T3-S3 o el T3-S2-R2, en los casos de 20 y 30 m, y de 40 y 60m, respectivamente.

**Tabla 8.1. ORDENACIÓN DE VEHÍCULOS DE MAYOR A MENOR MOMENTO ACTUANTE.**

L = 20m	L = 30m	L = 40m	L = 60m
T3-S2-R4	T3-S2-R4	T3-S2-R4	T3-S2-R4
T3-S3	T3-S3	T3-S3-R2	T3-S3-R2
T2-S2	T3-S3-R2	T3-S3	T3-S2-R2
C3	T3-S2	T3-S2-R2	T3-S3
T2-S1	T3-S2-R2	T3-S2	C3-R3
C2	C3-R3	C3-R3	T3-S2
	T2-S1-R2	T2-S1-R2	T2-S1-R2
	T2-S2	T2-S2	T2-S2
	C3	T2-S1	T2-S1
	T2-S1	C3	C3
	C2	C2	C2

Fuente: Propia

Para cortantes la tabla es similar, concluyéndose que con las especificaciones de este reglamento el vehículo que provoca mayores elementos mecánicos en un puente simplemente apoyado, de un claro, es el T3-S2-R4. Los máximos momentos y cortantes correspondientes se muestran graficados en las figuras 8.7 y 8.8.

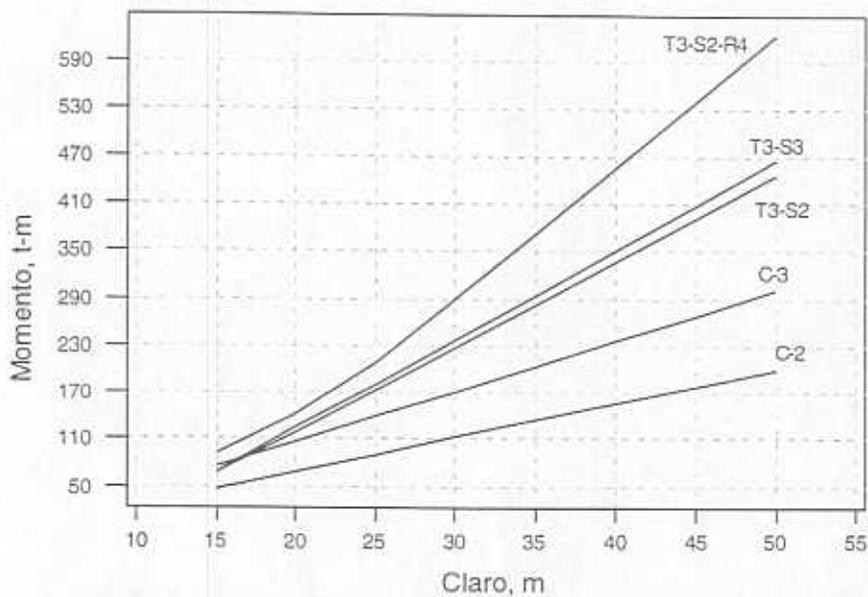


Figura 8.7 Momentos máximos, sin ningún factor de carga, utilizando vehículos del reglamento mexicano de pesos y dimensiones

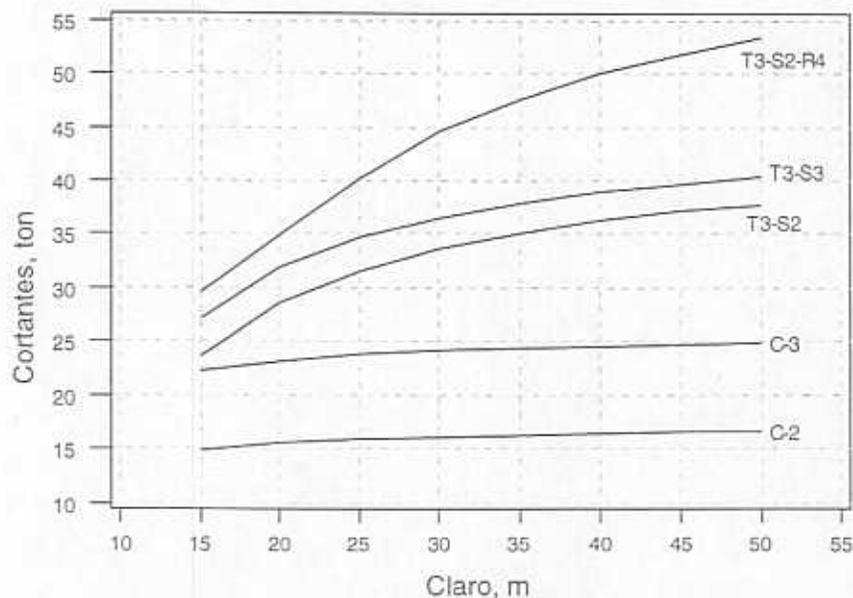


Figura 8.8 Cortantes máximos, sin ningún factor de carga, utilizando vehículos del reglamento mexicano de pesos y dimensiones

#### 8.4. Elementos mecánicos calculados usando el Eurocódigo

La carga que en este reglamento se denomina "modelo de carga 1", se utilizó para calcular los elementos mecánicos con factor de impacto incluido. Las curvas con los resultados se muestran en las figuras 8.9 y 8.10, siendo válidas para puentes de un claro simplemente apoyados.

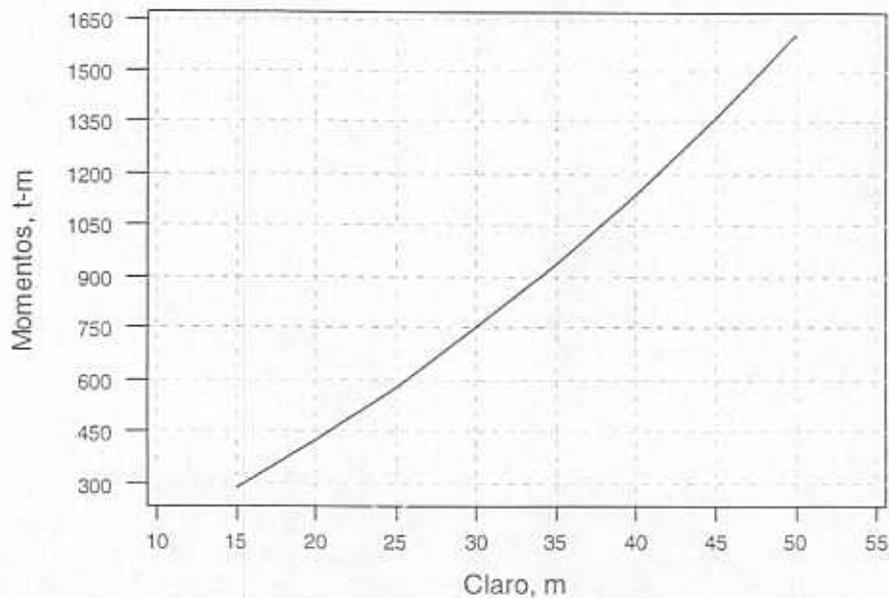


Figura 8.9 Momentos máximos, sin ningún factor de carga, EUROCODIGO

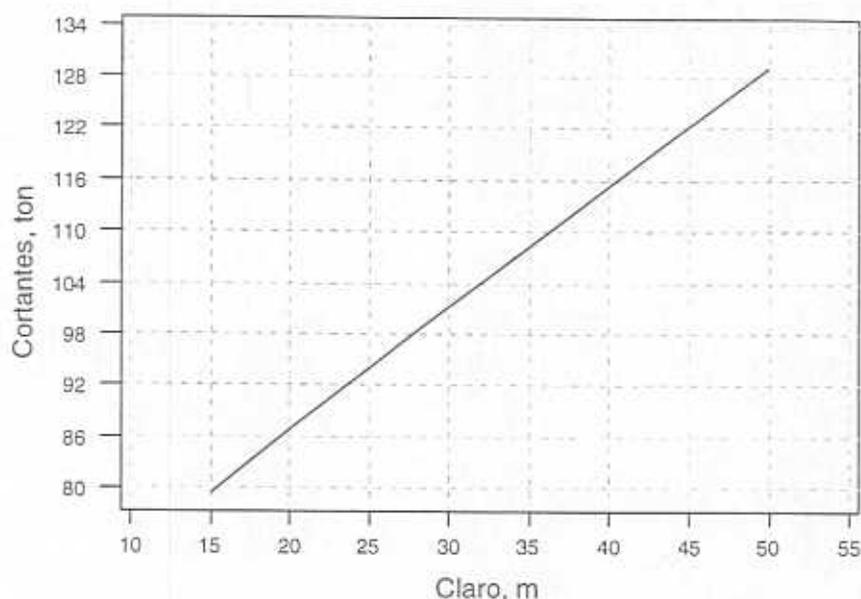


Figura 8.10 Cortantes máximos, sin ningún factor de carga, EUROCÓDIGO

### 8.5. Comparación de elementos mecánicos provocados por las cargas de los Reglamentos OHBDC, AASHTO y Pesos y Dimensiones de México.

Las figuras 8.11 y 8.12 muestran los momentos flexionantes máximos y cortantes máximos, respectivamente, usando las cargas de los reglamentos canadiense, estadounidense y mexicano, sin factor de carga alguno, y las del Eurocódigo con factor de impacto incluido. En estas figuras se aprecia, como era de esperarse, que las cargas reglamentarias C-2 producen los elementos mecánicos más pequeños; en seguida, el C-3 y el HS15-44 dan resultados muy parecidos entre sí.

En orden creciente, están los valores de HS20-44, T3-S2, T3-S3 y T3-S2-R4. A continuación, el HL-93 y el OHBDC ocasionan elementos mecánicos muy parecidos y, finalmente, el Eurocódigo.

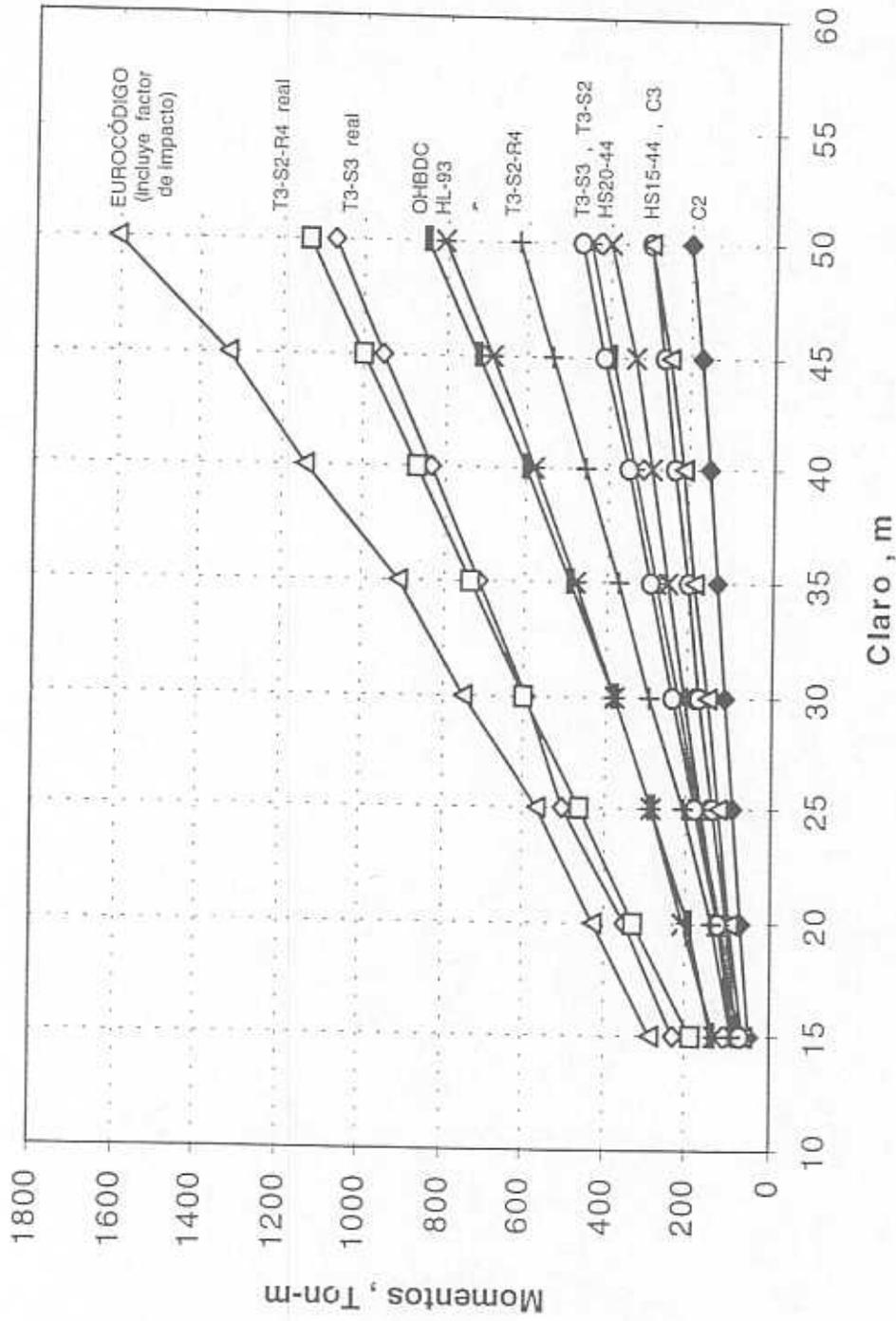


Figura 8.11 Momentos máximos, sin factor de carga

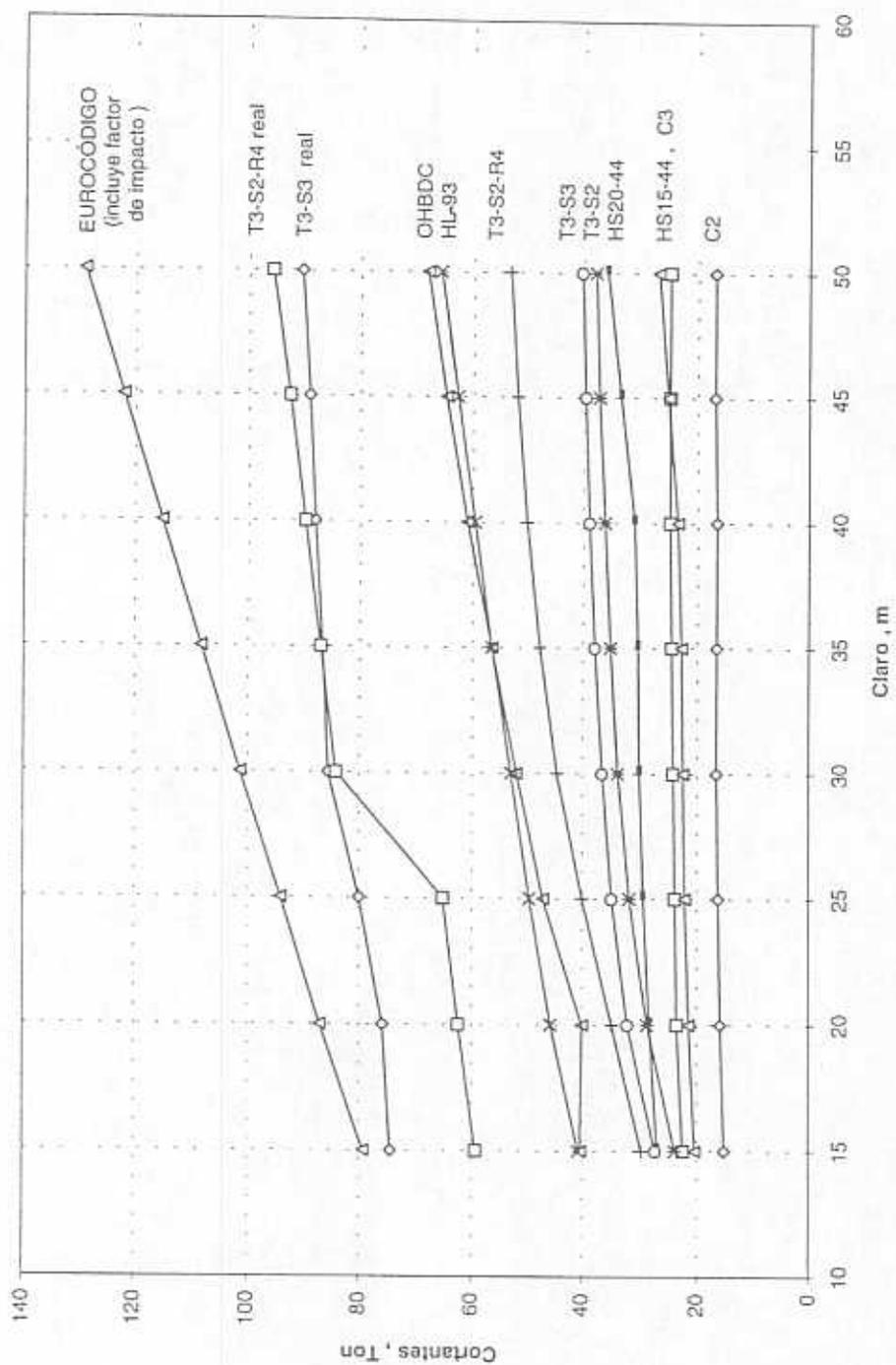


Figura 8.12 Cortantes máximos, sin factor de carga

Por otra parte , en dichas figuras se presentan también los valores máximos reales , obtenidos con los 9,050 vehículos cargados tipo T3-S3 y los 1,129 tipo T3-S2-R4, que se incluyeron en la muestra estadística con la información de pesos y dimensiones de 1993. Al comparar estos valores con los arrojados por las cargas reglamentarias , se aprecia claramente que los correspondientes a los vehículos reales son muy superiores, exceptuando a los del Eurocódigo .

Asimismo, se nota que los resultados máximos que se obtienen con los dos tipos de camión son relativamente semejantes, excepto en las fuerzas cortantes asociadas a claros cortos, menores a 30 m, ya que el vehículo T3-S2-R4 no cabe en los puentes cortos y, por ende, ejerce sólo una carga parcial sobre ellos.

Para tener mejores elementos de comparación, en las gráficas 8.13 y 8.14 se presentan los momentos y cortantes máximos, que ya incluyen los factores de impacto y de carga en los casos de los reglamentos extranjeros. En estas figuras se muestran también los valores máximos correspondientes a los vehículos reales considerados en la muestra, sin ningún factor de carga e impacto. Los mismos elementos mecánicos se analizan, pero en forma relativa al vehículo HL-93, en las figuras 8.15 y 8.16.

Observando todas las figuras, de la 8.11 a la 8.16, se observa que el Eurocódigo sobresale de los demás reglamentos, tanto en los análisis sin factor de carga, como cuando se estudia con todos los factores (de carga e impacto ); en el primer caso, sin factorizar, esto era de esperarse porque el Eurocódigo reglamenta su carga viva con factor de impacto incluido, en contraposición con el resto de reglamentos, que siempre establecen la misma, en primer instancia, sin factor alguno.

También, en dichas figuras, las gráficas que tienen la forma casi lineal corresponden a nuestros vehículos mexicanos, y es diferente a la tendencia curvilínea, con concavidad hacia arriba, de los reglamentos extranjeros, debido a que sólo se toman en cuenta cargas puntuales, tanto del Reglamento de Pesos y Dimensiones, como del tráfico real de la muestra. Esa tendencia curvilínea es debida, en general, a la carga uniforme de los reglamentos extranjeros. La condición de carga uniformemente repartida corresponde a secuencias de vehículos, uno después de otro, a lo largo del puente, situación que deberá de tomarse en cuenta en la reglamentación

futura mexicana, ya que con ello crecen los elementos mecánicos correspondientes.

Ahondando en los vehículos mexicanos, se ve en las figuras 8.11 y 8.12, que los del Reglamento de Pesos y Dimensiones: T3-S2, T3-S3 y T3-S2-R4, son un poco mayores a las cargas HS20-44 y a la HS15-44, de la antigua versión del AASHTO, pero las cargas reales T3-S3 y T3-S2-R4 son bastante mayores, en más del 150%, a las cargas HS. Por tanto, los puentes que se construyeron aproximadamente entre los años 50's a 70's, probablemente estén subdiseñados para el paso del tráfico pesado real, ya que los factores de carga se han incrementado con el paso de los años. En efecto, de la década de los 80's y hasta el año de 1993, el factor de carga del AASHTO aumentó mucho, de tal suerte que si se aplican dichos valores, en las figuras de las 8.13 a la 8.16, se observa que los efectos de la carga HS20-44 sobrepasan a los de los vehículos reales T3-S3 y T3-S2-R4, sin factor alguno.

Esta última tendencia se agudiza en la nueva versión del AASHTO, carga HL-93, con respecto a los vehículos reales T3-S3 y T3-S2-R4, tal como lo ilustran las figuras 8.15 y 8.16, de tal suerte que los elementos mecánicos inducidos por los vehículos mexicanos reales representan, en proporción y aproximadamente, el 70% del valor de la carga HL-93 factorizada. Lo anterior confirma la gran importancia que tiene el que, a la mayor brevedad se especifiquen las carga vivas para diseño de puentes en México, y que se definan los factores de carga y de impacto que deben emplearse.

En las figuras 8.13 y 8.14 se aprecia también que los valores máximos correspondientes a los vehículos reales tipos T3-S3 y T3-S2-R4, incluidos en la muestra, en términos generales, presenta relaciones con las carga HS20-44, HL-93, OHBDC y Eurocódigo de 1.18, 1.47, 1.59 y 2.0, aproximadamente, para el momento y claro de 50 m. Para cortantes y el mismo caso, las relaciones son: 1.29 (HS20-44), 1.49 (HL-93), 1.33 (OHBDC) y 1.95 (Eurocódigo). Esto permite sospechar que una vez que se definan los factores de carga y de impacto para las cargas vivas de diseño de puentes en México, se obtendrán elementos mecánicos que se aproximan, o que tal vez rebasen, los correspondientes al HL-93 y al OHBDC, pero quizá no alcancen a los del Eurocódigo .

Pasando otra vez a la figura 8.13 se observa que para la carga HS20-44 del AASTHO y en el intervalo de 15 m a 30 m (puentes cortos), las diferencias en momentos flexionantes con respecto al OHBDC y al HL-93 no son muy marcadas, pero a medida que aumenta la longitud del claro se separan los resultados, dando una relación de 1.34 con el primero y de 1.24 con el segundo, para el claro de 50 m.

La misma comparación, pero ahora con la figura 8.14 da, para los cortantes y 50 m de claro, relaciones de 1.03 (OHBDC) y 1.15 (HL-93). Sin embargo, es de destacarse que las fuerzas cortantes que produce la carga HS20-44 son mayores que las del OHBDC y del HL-93, en claros cortos, menores de 25 a 30 m; estas diferencias se aprecian también en forma relativa, en la figura 8.16.

Por otra parte, los resultados que producen las cargas del OHBDC y de la nueva versión del AASHTO, HL-93, se parecen mucho entre sí; en el caso de los momentos flexionantes, en la figura 8.15 se aprecia que los del OHBDC son ligeramente mayores en claros largos, y menores en claros cortos. En cambio, en la figura 8.16 se observa que las fuerzas cortantes que producen las cargas HL-93 son mayores que las del OHBDC, entre 10 y 20%. Asimismo, se aprecia que en ambos casos los valores son inferiores a los que se obtienen al aplicar el reglamento Eurocódigo, dando para el caso de momentos flexionantes, en el claro de 50 m, relaciones de, aproximadamente, 0.8 (OHBDC) y 0.74 (HL-93); en el caso de cortante y para el mismo claro, las relaciones respectivas son 0.69 (OHBDC) y 0.76 (HL-93).

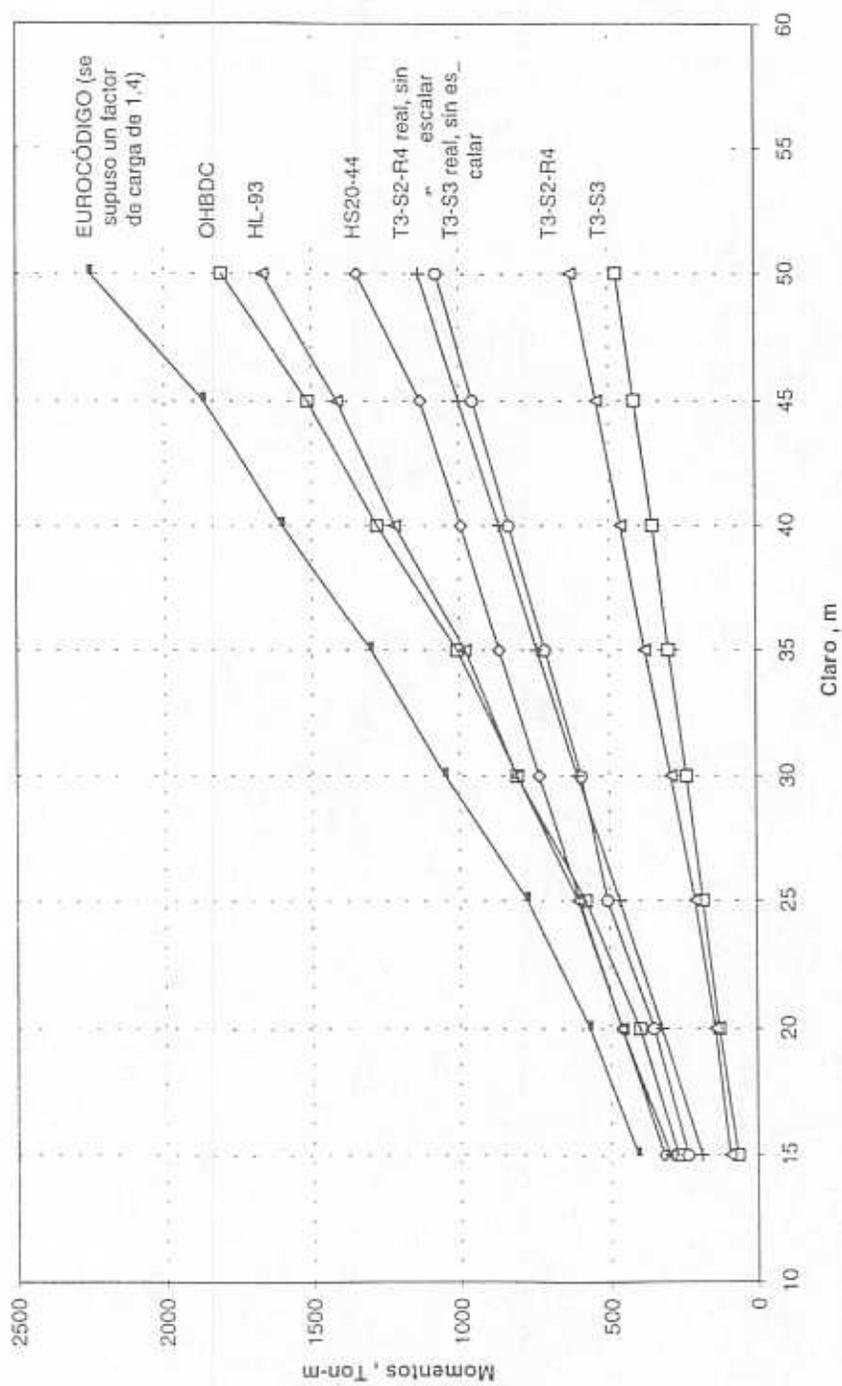


Figura 8.13 Momentos máximos con factor de carga y factor de impacto

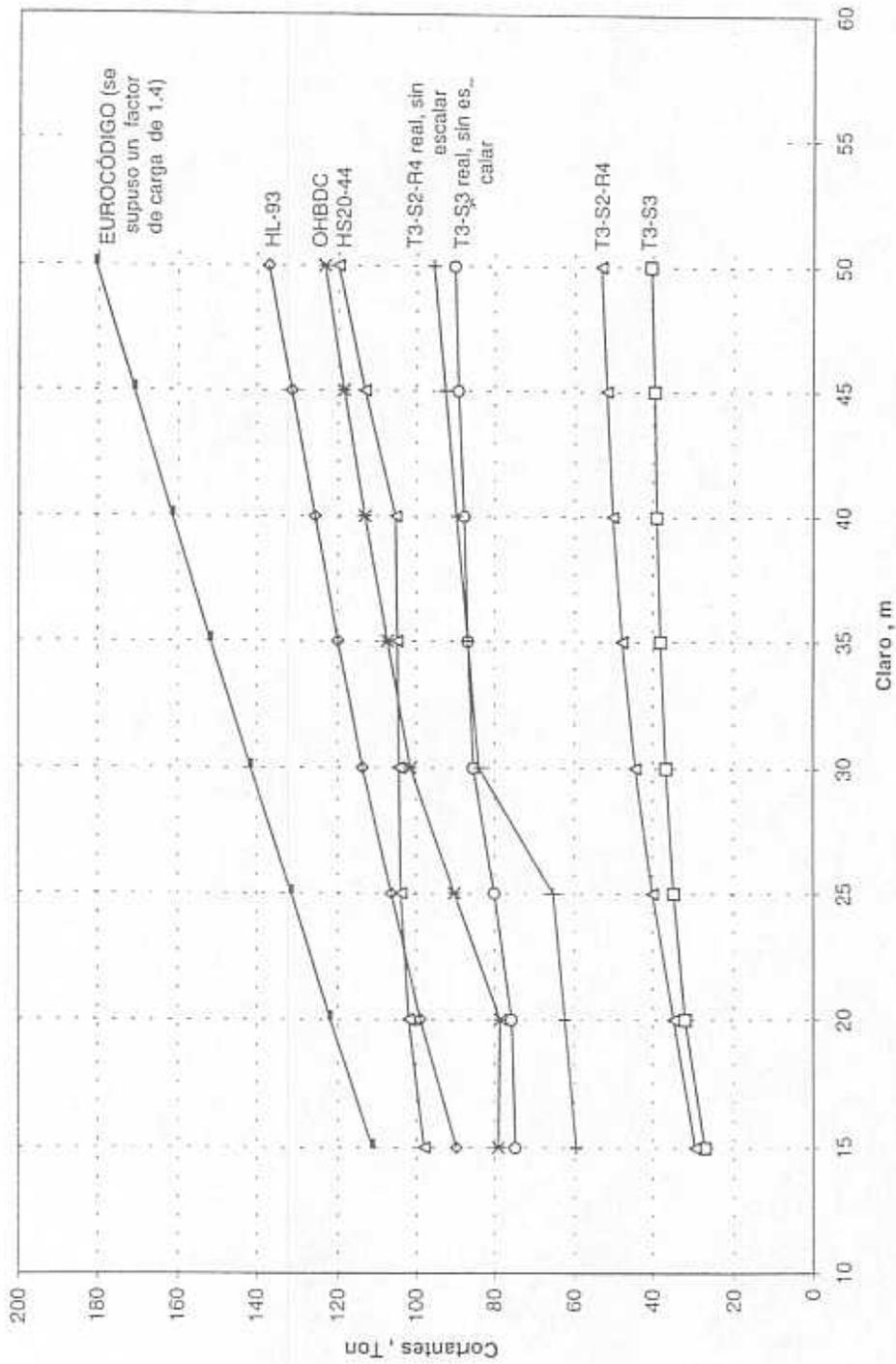


Figura 8.14 Cortantes máximos con factor de carga y factor de impacto

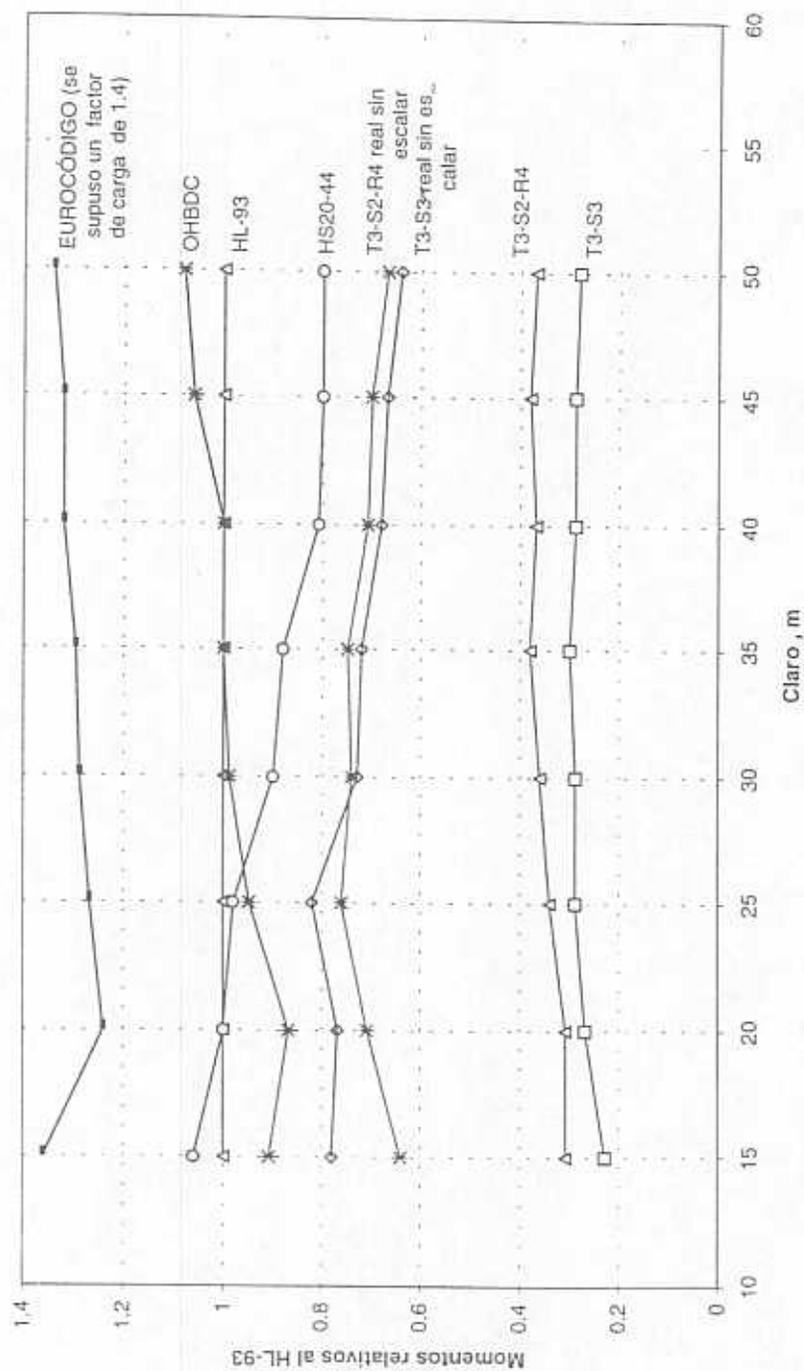


Figura 8.15 Momentos normalizados a la carga HL-93 ; incluyen factores de carga e impacto

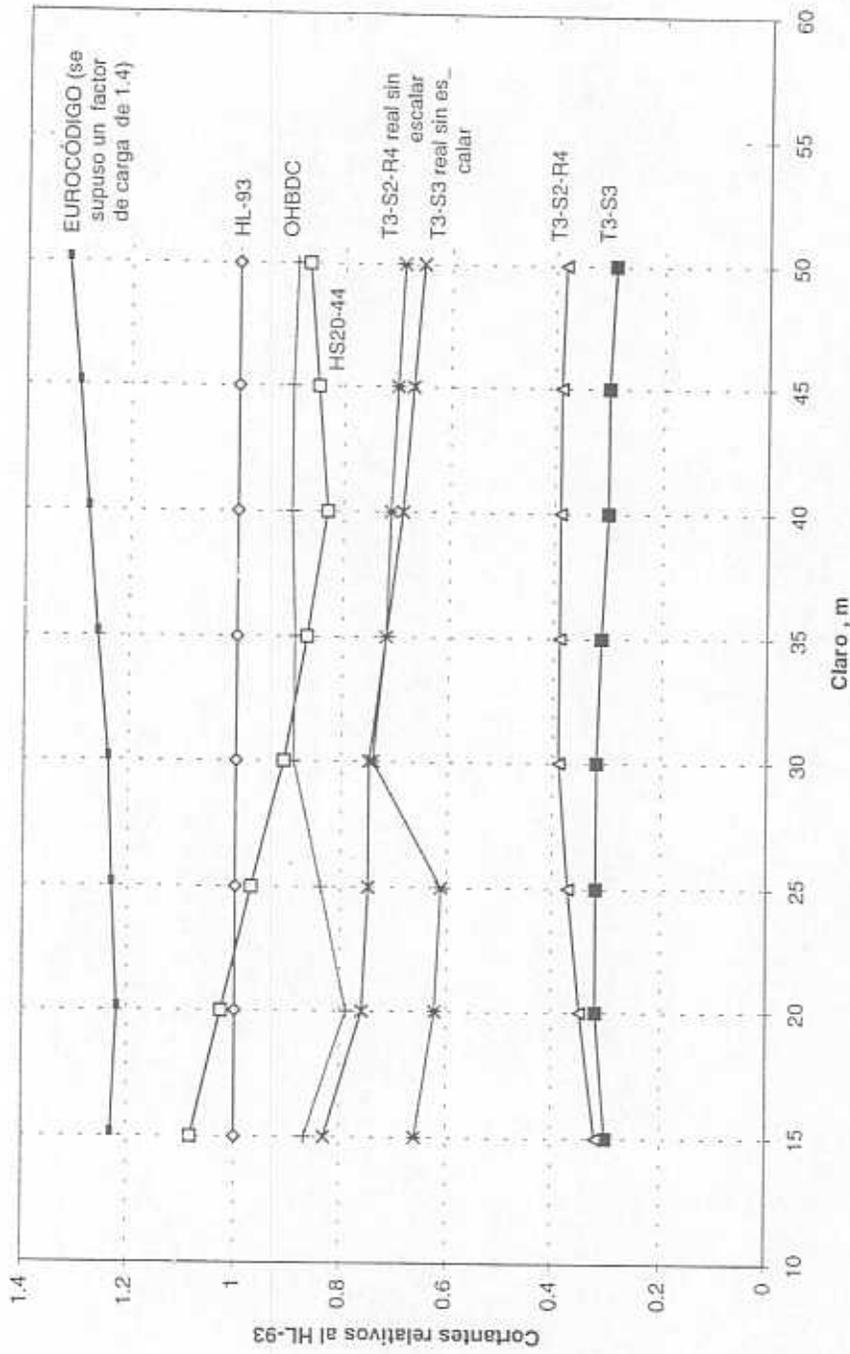


Figura 8.16 Cortantes normalizados a la carga HL-93 ; incluyen factores de carga e impacto



## **9. Conclusiones y recomendaciones**

A continuación se enumeran un conjunto de conclusiones y recomendaciones obtenidas en este trabajo, adicionales a las que a lo largo del mismo se fueron señalando.

### **9.1. Conclusiones**

1. El concepto de vehículo virtual (nocional) que introducen los reglamentos del AASHTO94 y el Eurocódigo es importante, aunque no nuevo, ya que los vehículos propuestos por versiones anteriores de los reglamentos AASHTO, manejaban cargas puntuales y uniformes, no reales, para representar situaciones de tráfico. Sin embargo, este concepto, ahora más reforzado, pretende lograr un manejo más realista de las cargas vivas para cubrir situaciones de tráfico específicas.
2. Con respecto a los reglamentos de puentes analizados, el de Ontario es exhaustivo y de fácil uso, y contiene muchas figuras que aclaran el tema de análisis.

El reglamento unificado europeo es el más conservador y el más resumido.

El nuevo reglamento norteamericano es más conservador que el antiguo, aunque en puentes con claros cortos, menores de 25 m, los elementos mecánicos que producen se parecen mucho entre sí; además, es difícil de usar, debido a que algunos temas específicos se abordan en varios capítulos y hay que remitirse a todos para no caer en alguna omisión.

En cuanto al desarrollo de temas, el de Ontario y el HL-93 pueden servir de base para un reglamento mexicano para análisis y diseño estructural de puentes.

3. Con relación al momento flexionante, en los reglamentos nuevos, en general se observan incrementos en la magnitud de los momentos que producen los modelos de cargas vivas

propuestos. Por ejemplo, si comparamos el efecto de los reglamentos AASHTO94, OHBDC y el Eurocódigo, se observa que producen momentos flexionantes, con respecto al reglamento anterior del AASHTO, del orden de 1.24, 1.34 y 1.67 veces mayores, respectivamente. Situación similar ocurre respecto a los cortantes, en los que las relaciones son de 1.15, 1.03 y 1.51 veces, respectivamente.

4. Analizando los momentos obtenidos con el tráfico real de la muestra, se observa, en los valores de los elementos mecánicos, que los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4 son los que presentan porcentajes de excedencia mayores. Por ejemplo (tabla 7.4, pag. 112), para el T3-S3 y claro de 15 m, se tiene, con respecto al vehículo HS20-44, que la excedencia en los momentos flexionantes es del 171.0 %, con relación al reglamento de Ontario es de 68.0 %, y con respecto al vehículo HL-93 es 72.0 %. En estos porcentajes no se están considerando factores de carga.
5. Con relación a los cortantes obtenidos del tráfico real, y el mismo caso anterior, los porcentajes de excedencia son los siguientes: con respecto al HS20-44 es 184.0%, con el de Ontario, es 85.0%, y con el HL-93, es 85.0%.
6. Para hacer una comparación más real y detallada, es necesario involucrar a los factores de carga, de impacto y de resistencia, no sólo en los sistemas de carga reglamentarios como aquí se hizo, sino también en los vehículos reales para los cuales aún no se han definido valores.
7. En el análisis estadístico de los elementos mecánicos calculados con los pesos y dimensiones de la muestra del año 1993, se puede ver que para claros menores a 30 m, el vehículo que produce los efectos más desfavorables es el T3-S3, y para puentes con claros mayores es el T3-S2-R4.
8. Otro aspecto importante es el relacionado con los porcentajes de vehículos que exceden los pesos totales autorizados. El vehículo que va más excedido es el T3-S3, con un 51.91 %

respecto al peso bruto vehicular autorizado; le sigue el T3-S2-R4, con 49.84 % de excedencia.

## 9.2. Recomendaciones

- 1.- Es importante tener en cuenta, para fines de autorizar incrementos en los pesos y dimensiones de los vehículos, que se deben considerar tanto los daños a los pavimentos, como también a los puentes, ya que como se vio en algunos de los resultados de este trabajo, las cargas actuantes están induciendo momentos flexionantes y fuerzas cortantes que, una vez incluidos los factores de carga y de impacto, podrían estar por encima de los previstos en los diseños originales de los puentes.
- 2.- Se recomienda continuar realizando estudios y análisis utilizando información estadística, con el fin de conocer mejor las cargas y dimensiones vehiculares mexicanas, así como sus posibles efectos en puentes de diversos tipos y estructuraciones, con el fin de estar en posibilidades de hacer propuestas de modelos de cargas vivas realistas para México. Actualmente se cuenta con datos para los años 1994, 1995 y 1996, los cuales serán utilizados de inmediato para dichos fines. En estos nuevos estudios deberán considerarse puentes continuos y secuencias de vehículos.
- 3.- Se recomienda continuar obteniendo datos sobre pesos y dimensiones de vehículos, ya que éstos serán muy valiosos para mantener una línea de estudio sobre el efecto de las cargas vivas en los puentes. Es recomendable que se incorporen, para esto, pesadoras con tecnología más nueva y con mayor exactitud.
- 4.- Formular e implantar, en su momento, en el reglamento mexicano para análisis y diseño estructural de puentes, una carga uniformemente repartida, ya que, como se observó en la vieja versión del AASHTO, para claros mayores a los 35 m, prevalece

esta carga sobre la del camión con “peso bruto vehicular” máximo. La condición de carga uniformemente repartida corresponde a secuencias de vehículos, uno después de otro, a lo largo del puente; para definir esto, se harán los estudios correspondientes. También es importante tomar en cuenta el énfasis del Eurocódigo y el de la nueva versión del AASHTO, por usar el concepto de carga vehicular virtual.

- 5.- Realizar estudios de tipo probabilístico para generar, analizar y proponer modelos de cargas vivas para análisis y diseño estructural de puentes, con base en análisis de riesgos de excedencia.
- 6.- Realizar simulaciones del tipo Montecarlo, con el fin de estudiar, mediante métodos de procesos estocásticos, los efectos de la ocurrencia simultánea de vehículos, en diferentes carriles y en diferentes posiciones en cada carril.

## ***Bibliografía***

---

- 1.- **AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.** America Association of State Highway and Transportation Officials. Primera edición. EUA. 1994.
- 2.- **EUROCODE 1. Basis of design and actions on structures. Part 3. Traffic loads on bridges.** European Committee for Standardization. Bélgica. 1995.
- 3.- **Reglamento sobre el peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal.** Diario Oficial. SCT. México. 4 de septiembre de 1995.
- 4.- **Datos provenientes de las pesadoras dinámicas instaladas en 1993.** Los datos son recabados bajo la supervisión de la Dirección General de Servicios Técnicos y el Instituto Mexicano del transporte, SCT. 1993.
- 5.- **Ontario Highway Bridge Design Code.** Ministry of Transportation. Ontario, Canadá. Tercera edición. 1991.
- 6.- **Standard Specifications for Highway Bridges.** AASHTO. Fifteenth edition. Washington, EUA. 1993.
- 7.- Mendoza, A. y Cadena, A. **Análisis estadístico del peso y las dimensiones de los vehículos de carga que circulan por la red nacional de carreteras.** Documento técnico 8. IMT. 1992.
- 8.- Xanthakos, P. **Theory and Design of Bridges.** John Wiley & Son. EUA. 1994.
- 9.- Bakht, B. y Jaeger, L. **Bridge Analysis Simplified.** McGraw-Hill. EUA. 1987.
- 10.- Nowak, A, Nassif, H. y DeFrain, L. **Efect of Truck Loads on Bridges.** **Journal of Transportation Engineering.** ASCE. Vol. 119. No. 6 nov./dic. 1993. págs.853-867. EUA.

11.- Fossas, F. **Cargas vivas sobre puentes**. Memorias del Seminario Internacional de Puentes 1991. Instituto Mexicano del Transporte.1991.

12.- Timoshenko, S. **Resistencia de Materiales, 2 volúmenes**. Espasa Calpe, S. A.. Madrid, España. 1947.