



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería

ESTUDIO ESTADÍSTICO DE PESOS Y DIMENSIONES DE
VEHÍCULOS PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL
DE PUENTES

MIGUEL ARTURO BAROUSSE MORENO

TRABAJO FINAL

PRESENTADO A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

(ESTRUCTURAS)

CIUDAD UNIVERSITARIA

MAYO, 1997



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



DEPFI

T. UNAM

1 9 9 7

BAR

	Pág.
ÍNDICE	i
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REGLAMENTO CANADIENSE OHBDC	3
2.1. Cargas vivas de diseño	4
2.2. Efectos dinámicos	8
2.3 Factores de carga	8
3. REGLAMENTO AASHTO 1993 (NO VIGENTE)	11
3.1. Carga viva	11
3.2. Factor de impacto	15
3.3 Combinaciones de carga	15
4. REGLAMENTO AASHTO 1994	19
4.1 Introducción	19
4.2 Factores de carga	22
4.3 Carga viva	26
4.4 Carga dinámica permisible IM	30
5. REGLAMENTO EUROCÓDIGO	31
5.1 Introducción	31
5.2 Clasificación de acciones	31
5.3 Valores característicos de las cargas verticales	33
5.4. Modelo de carga 1.	34
5.5 Modelo de carga 2	37
6. REGLAMENTO DE PESOS Y DIMENSIONES DE MÉXICO	38
7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE PESOS Y DIMENSIONES	41
7.1. Introducción	41
7.2. Número total de vehículos considerados	43

7.3	Pesos brutos vehiculares	44
7.4	Cargas por eje	48
7.5	Longitud total entre ejes	62
7.6	Longitud entre ejes	66
8.	ANÁLISIS DE ELEMENTOS MECÁNICOS	99
8.1	Momentos y cortantes máximos	77
8.2	Elementos mecánicos usando el reglamento de Ontario	99
8.3	Elementos mecánicos usando el reglamento AASHTO	100
8.4	Elementos mecánicos usando pesos y dimensiones reglamentarios	103
8.5	Elementos mecánicos usando el Eurocódigo	105
8.6	Comparación de elementos mecánicos provocados por las cargas del OHBDC, AASHTO y Pesos y Dimensiones de México	106
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
9.1.	Conclusiones	110
9.2.	Recomendaciones	111
10.	REFERENCIAS	113

1. INTRODUCCION

En las carreteras federales mexicanas, según último censo del SIPUMEX¹, para 1995, se tenían 6,324 puentes, con una longitud total de 214,638 m y 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 estos puentes, buena parte fueron diseñados con las cargas correspondientes al vehículo H-15, vehículo definido por versiones ya no vigentes del reglamento AASHTO², 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 tal escenario, es evidente la necesidad de diagnosticar el estado de los puentes, establecer cargas actualizadas de diseño y de revisión, e implantar sistemas de inspección y mantenimiento, con el fin de evaluar la situación de las estructuras de los puentes ya construidos y generar criterios de diseño para los que se diseñen en el futuro.

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. Otros reglamentos más recientes (ref. 1 y 2) introducen el concepto de "carga viva vehicular virtual"³, que no pretende representar un vehículo en particular, sino las cargas correspondientes 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.

¹ 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.

² AASHTO son las siglas en inglés de "American Association Standards Highway Transportation Officials".

³ El término de "carga viva vehicular virtual" es equivalente al término en inglés de "notional load"

En el caso de México aún no existe un reglamento propio para el diseño y revisión de puentes, por lo que, en principio, se tendrán que analizar los efectos que producen, en puentes idealizados, algunos vehículos que se encuentran caracterizados en el Reglamento de Pesos y Dimensiones de México (ref. 3), y compararlos con los que resulten de utilizar los criterios estipulados en los reglamentos de EEUU, Ontario (Canadá) y Eurocódigo, para posteriormente, proponer las solicitaciones que se consideren adecuados en el diseño de los puentes mexicanos.

Con base en este panorama, en la presente investigación se realiza primeramente un análisis estadístico de la información existente en las bases de datos del estudio de pesos y dimensiones (ref. 4), para determinar cuáles son las cargas y dimensiones entre ejes más frecuentes en México. Posteriormente, se hace una comparación de diversos efectos que producen, en puentes tipo, las cargas reglamentarias de AASHTO, del OHBDC⁴, 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, Eurocódigo y los vehículos estipulados en el Reglamento de Pesos y Dimensiones de México. Posteriormente se presentan los resultados del análisis estadístico de las bases de datos. En la segunda 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 reglamento de pesos y dimensiones de México.

En resumen, los objetivos de este trabajo son:

- Evaluar las últimas disposiciones en materia de carga viva que se dan en los reglamentos arriba mencionados.
- Evaluar cuál sería el efecto de las cargas reglamentarias estipuladas en los mismos reglamentos, al utilizarlos en el análisis de puentes mexicanos.
- Dar algunas recomendaciones que sirvan para realizar una propuesta de un modelo de cargas vivas para puentes en México.

⁴ OHBDC son las siglas en inglés de "Ontario Highway Bridge Design Code".

2. REGLAMENTO CANADIENSE OHBDC

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 estará 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, en el que se incluyen criterios para carga muerta, carga viva y otros factores como viento, sismo, presfuerzo y asentamientos diferenciales.

2.1 Cargas vivas para diseño

El reglamento OHBDC ofrece dos opciones para considerar las cargas vivas en el diseño; la primera consiste en aplicar 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 pero reducida en un 30%; las figuras 2.1 y 2.2 muestran las cargas correspondientes a cada opción, respectivamente.

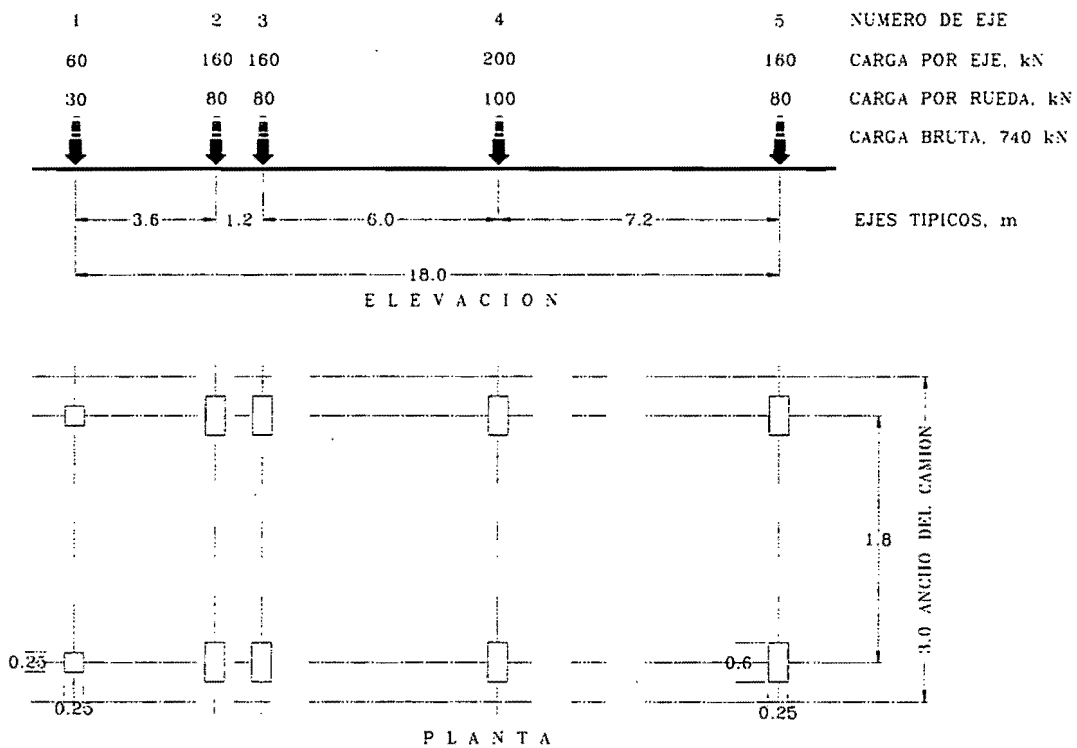


Figura. 2.1. Carga del vehículo idealizado correspondiente a la primera opción de carga

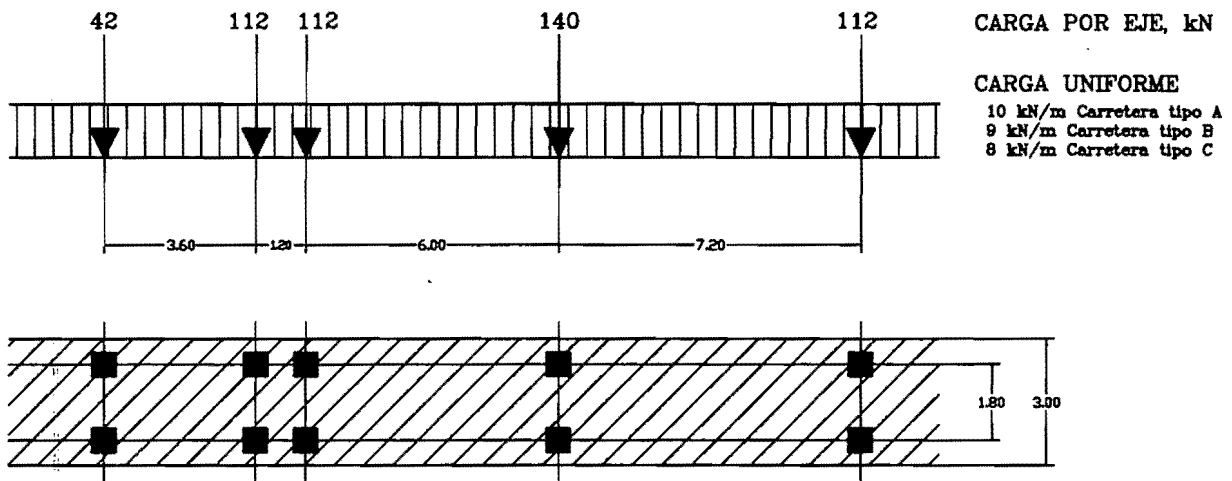


Figura 2.2. Carga uniforme correspondiente a la segunda opción de carga

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.

W_c, ANCHO DE LA SUPERFICIE DE RODAMIENTO (m)	NÚMERO DE CARRILES
6.0 ó 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 calculo 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 y 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 ó más	0.55

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

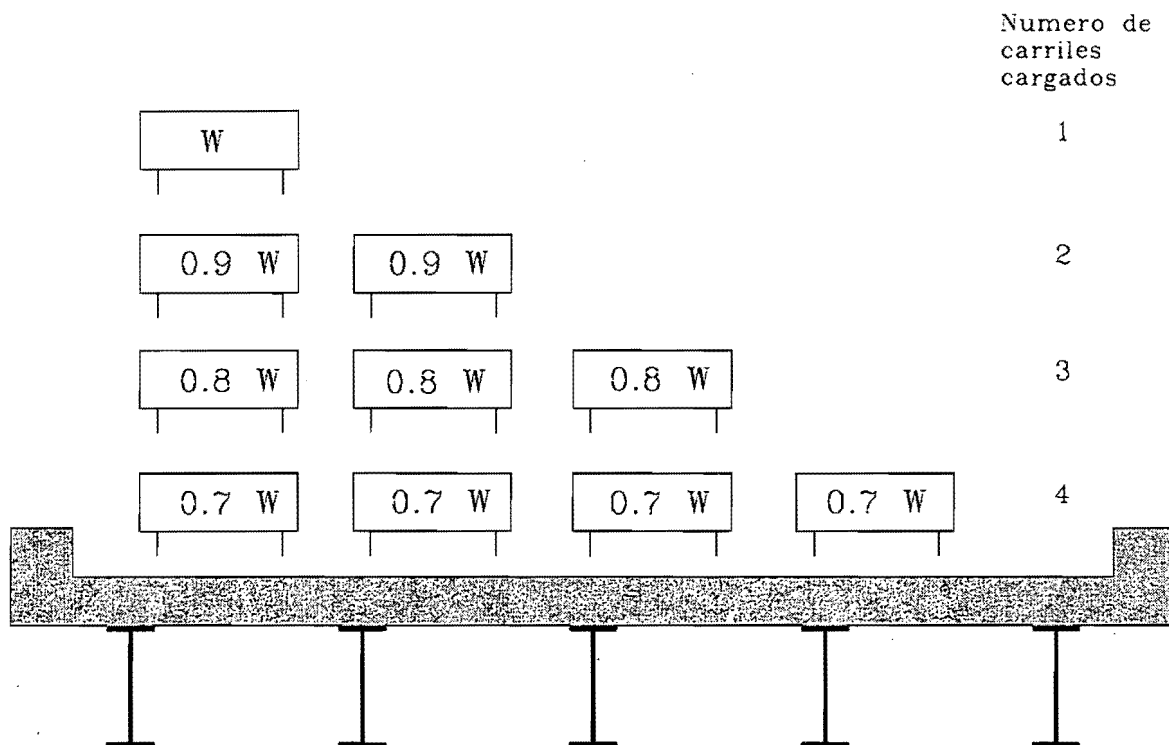


Figura 2.3. Factores de reducción de carga viva por la existencia de más de un carril de circulación

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.

2.2.- Efectos dinámicos

Las cargas vivas deben de 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	1.40
2	1.40
3 o más	1.25
Carga Uniforme	1.10
Tierra armada	1.40

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

2.3. 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 ¹			CARGAS TRANSITORIAS					CARGAS EXCEPCIONALES (Usar sólo una)			
	D	E	P	L	K	W	V	S	Q	F	A	H
ESTADOS LÍMITES DE FATIGA												
Combinación 1 "FLS"	1.00	1.00	1.00	0.80	0.00	1.00 ²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO												
Combinación 1 "SLS"	1.00	1.00	1.00	0.75 ³	0.80	0.70 ²	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS												
Combinación 1 "ULS"	α_D	α_E	α_P	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Combinación 2 "ULS"	α_D	α_E	α_P	1.25	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Combinación 3 "ULS"	α_D	α_E	α_P	1.15	1.00	0.40	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Combinación 4 "ULS"	α_D	α_E	α_P	0.00	1.25	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Combinación 5 "ULS"	α_D	α_E	α_P	0.00	0.00	0.70 ²	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 | Q Cargas sísmicas |
| D Carga muerta | S Asentamientos de la cimentación |
| E Presión de tierra y de agua | V Cargas de viento sobre la carga viva |
| F Cargas debidas a flujo de agua | W Carga de viento sobre la superestructura |
| H Colisión | P Efectos secundarios del presfuerzo |
| K Deformaciones y desplazamientos | L Carga viva |

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

Tabla 2.6. FACTORES α DE CARGA MÁXIMOS Y MÍNIMOS

CARGA MUERTA	α_D Máxima	α_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	α_E Máxima	α_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	α_p Máxima	α_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.

3. REGLAMENTO AASHTO 1993 (NO VIGENTE)

El objetivo de las especificaciones del reglamento AASHTO (ref. 6), 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 esviados se deben analizar en la dirección vertical, longitudinal y lateral (siguiendo el ángulo de esviamiento). 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 da especificaciones para construcción.

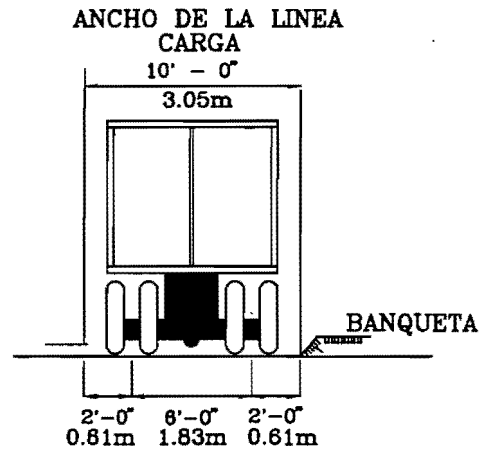
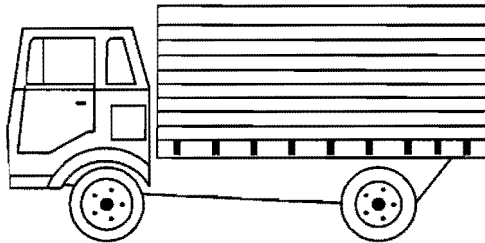
3.1 Carga Viva

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

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).



H20-44	8,000 Lbs 3,632 Kgs	32,000 Lbs 14,528 Kgs
H15-44	6,000 Lbs 2,724 Kgs	24,000 Lbs 10,896 Kgs

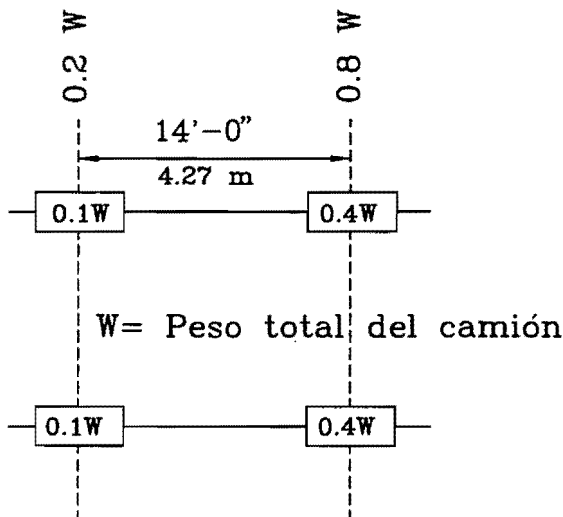
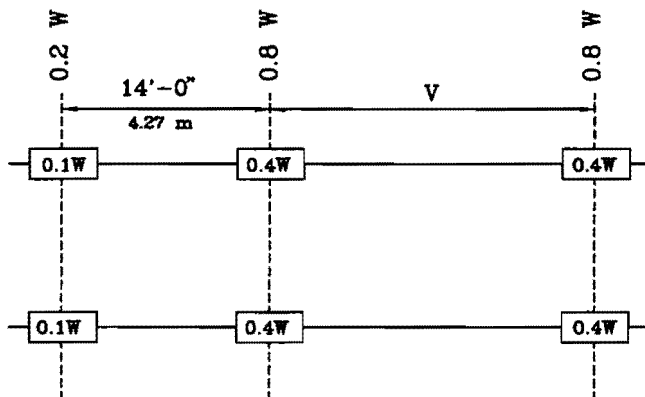
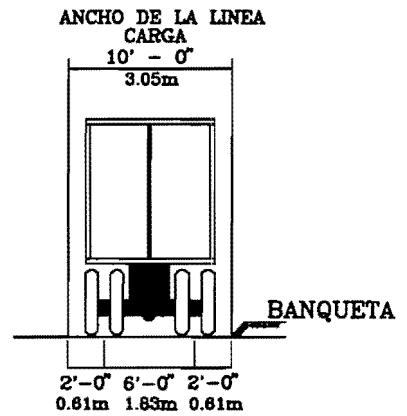
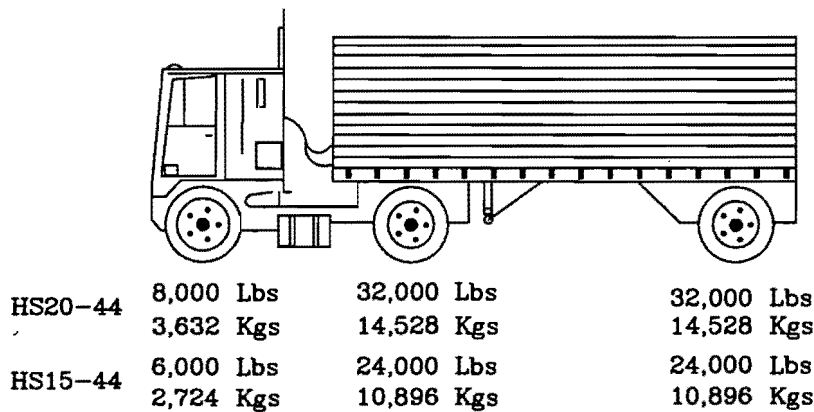


Figura 3.1. Vehículo denominado H15-44 y H20-44



W= Peso combinado de los dos primeros ejes
V= Separación variable

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

Las cargas vivas se aplican en "carriles de carga de diseño", los cuales tiene 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).

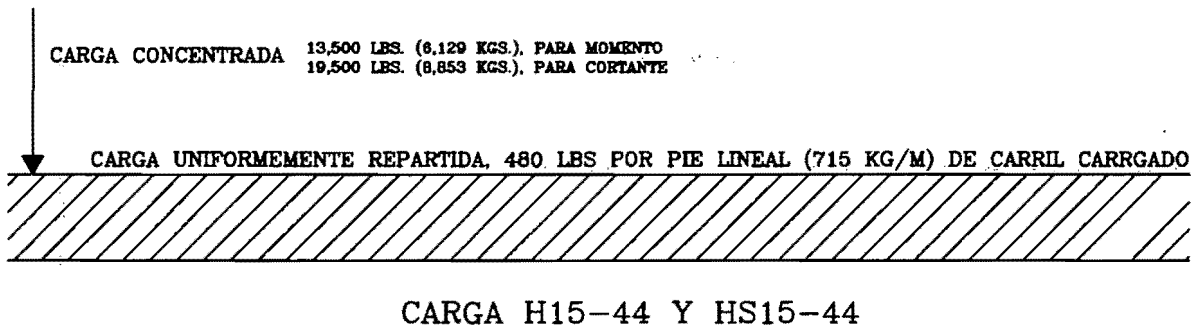
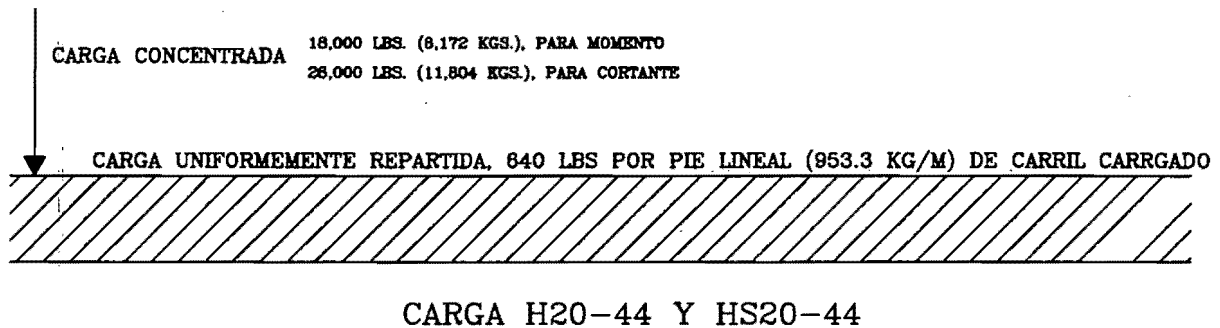


Figura 3.3. Carga uniforme más carga puntual

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 mas	75

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

3.2 Factor de Impacto

La cargas vivas deben aumentarse 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, las cuales se les aplicará los siguientes coeficientes que se consignan en la tabla 3.2. La ecuación general para la combinación de cargas es:

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

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	γ	Factor β														%
		D	(L+I) _v	(L+I) _h	CF	E	B	SF	W	WL	LF	R+S+T	EQ	ICE		
CARGAS DE SERVICIO	I	1.0	1	1	0	1	β_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	β_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	β_E	1	1	0.3	1	1	0	0	0	125
	IV	1.0	1	1	0	1	β_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	β_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	β_E	0	0	0	0	0	0	0	0	100	
FACTORES DE CARGA	I	1.3	β_D	1.67	0	1	β_E	1	1	0	0	0	0	0	No aplica	
	IA	1.3	β_D	2.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	IB	1.3	β_D	0	1	1	β_E	1	1	0	0	0	0	0		
	II	1.3	β_D	0	0	0	β_E	1	1	1	0	0	0	0		
	III	1.3	β_D	1	0	1	β_E	1	1	0.3	1	1	0	0		
	IV	1.3	β_D	1	0	1	β_E	1	1	0	0	0	1	0		
	V	1.25	β_D	0	0	0	β_E	1	1	1	0	0	1	0		
	VI	1.25	β_D	1	0	1	β_E	1	1	0.3	1	1	1	0		
	VII	1.3	β_D	0	0	0	β_E	1	1	0	0	0	0	1		
	VIII	1.3	β_D	1	0	1	β_E	1	1	0	0	0	0	1		
	IX	1.2	β_D	0	0	0	β_E	1	1	1	0	0	0	1		
X	1.3	1	1.67	0	0	β_E	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 β_E serán aplicados a las cargas horizontales y verticales.

Fuente: Standard Specifications for Highway Bridges. 1993

A continuación se describen las abreviaciones 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:

$$\beta_E = 1.0 \text{ y } 0.5 \text{ para cargas laterales y marcos rígidos.}$$

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:

- γ = factor de carga.
- β = coeficiente.
- D = carga muerta.
- L = carga viva.
- I = carga viva factorizada por impacto.
- E = carga por presión de tierra.
- B = bufamiento.
- 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.

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 6 m.

El método de diseño empleado por el AASHTO nuevo se denominan "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" engloban 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:

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

en la cual:

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

En esta ecuación:

γ_i = factor de carga i

ϕ = factor de resistencia

η = factor relativo a la ductilidad, redundancia e importancia operacional

η_D = factor relativo a la ductilidad

η_R = factor relativo a la redundancia

η_i = factor relativo a la importancia operacional

Q_f = efecto de la fuerza

R_n = resistencia nominal

R_f = resistencia factorizada ϕR_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 analizarán 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 estados 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 η :

Para el estado límite de resistencia

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

$\eta_D = 0.95$, cuando sí presenten ductilidad

Para los otros estados :

$\eta_D = 1.00$

Con relación a la *redundancia*, se definen los factores η de la siguiente manera :

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

$\eta_R = 0.95$, cuando sí presenten 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 η 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 y análisis óptimos del puente.

4.2 Factores de Carga

La carga factorizada total, debe tomarse de la siguiente ecuación :

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

donde:

γ_i = factor de carga

q_i = carga

η = 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 cargas muertas 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 sobrepase 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 4.1 y 4.2. 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 4.1. 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
Estados límite													
Resistencia - I	γ_p	1.75	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Resistencia - II	γ_p	1.35	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Resistencia - III	γ_p	-	1.00	1.40	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Resistencia - IV EH, EV, ES, DW Sólo DC	γ_p 1.5	-	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-
Resistencia - V	γ_p	1.35	1.00	0.40	0.40	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Evento extremo - I	γ_p	γ_{EO}	1.00	-	-	1.00	-			1.00	-	-	-
Evento extremo - II	γ_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	γ_{TG}	γ_{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	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Fatiga, LL, IM y sólo CE	-	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

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

Tabla 4.2. FACTORES DE CARGA PARA CARGAS PERMANENTES γ_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

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

DC = carga muerta de componentes estructurales y uniones no estructurales

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

EH = Presión de tierra horizontal

ES = Sobrecarga por rellenos de tierra

EV = Carga muerta por presión vertical de terraplén 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

4.3 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 4.3.

Tabla 4.3. FACTOR POR MULTIPLICIDAD DE CARRILES CARGADOS

Carriles	Porcentaje
uno	120
dos	100
tres	85
cuatro ó 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. Abarca un ancho de 3,000 mm. Esta carga uniforme no se debe de afectar por un factor de impacto.

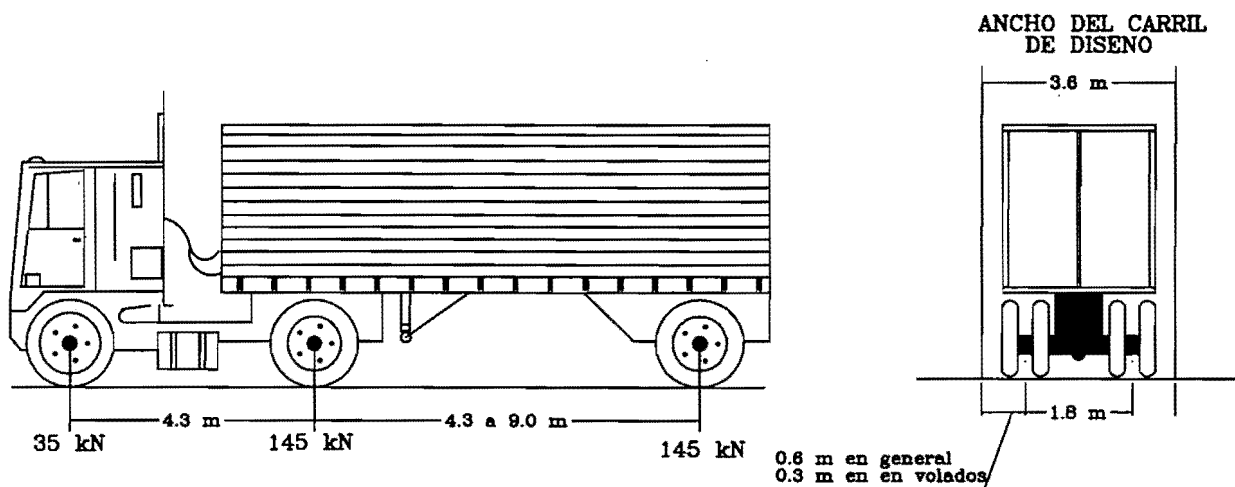
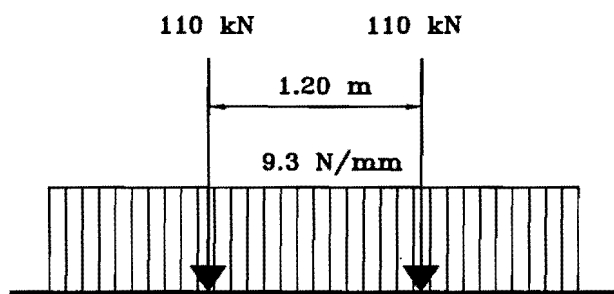


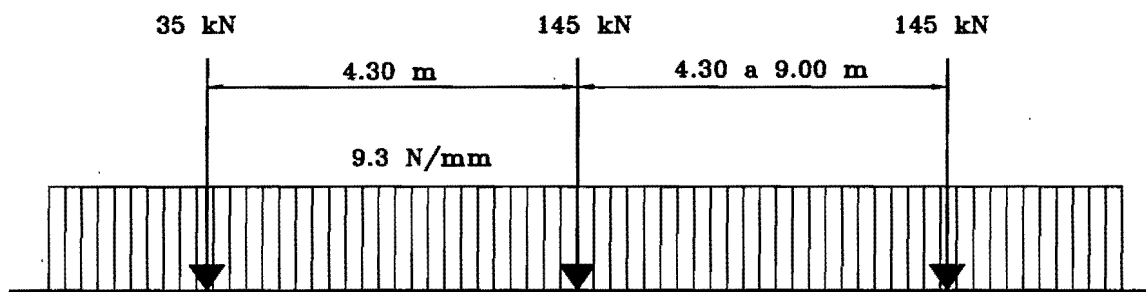
Figura 4.1. Vehículo virtual de tres ejes

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 para 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 :

γ = 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 el caso de la obtención de 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 desean 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 usará 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 correspondiente 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.

$ADTT_{sl}$ = El número de camiones por día asociados a un sólo carril, promediados en el tiempo de la vida útil de diseño.

P = Se obtiene de la tabla 4.4.

Tabla 4.4. 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

4.4 Carga dinámica permisible IM

El concepto de factor de impacto manejado por versiones anteriores del reglamento desaparece, el cual, como se vio anteriormente, 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 4.5; este factor no debe aplicarse a los puentes peatonales ni a la carga uniformemente distribuida.

Tabla 4.5. 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

5. REGLAMENTO EUROCÓDIGO

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 dos; acciones 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 uno de los siguientes grupos:

- **Valores característicos.-** Son medidas estadísticas obtenidas al limitar la probabilidad para que dichas medidas no la excedan durante la vida útil del puente.
- **Valores no frecuentes.-** Son valores promedio correspondientes a un período de retorno de un año.
- **Valores frecuentes.-** Son valores promedio 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 consisten en automóviles, camiones y vehículos especiales para transportar cargas no usuales, generalmente excedida en peso y dimensiones. En la definición del modelo de cargas se utiliza el concepto de cargas virtuales, 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. NUMERO 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
$W < 5.4 \text{ m}$	$n = 1$	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.

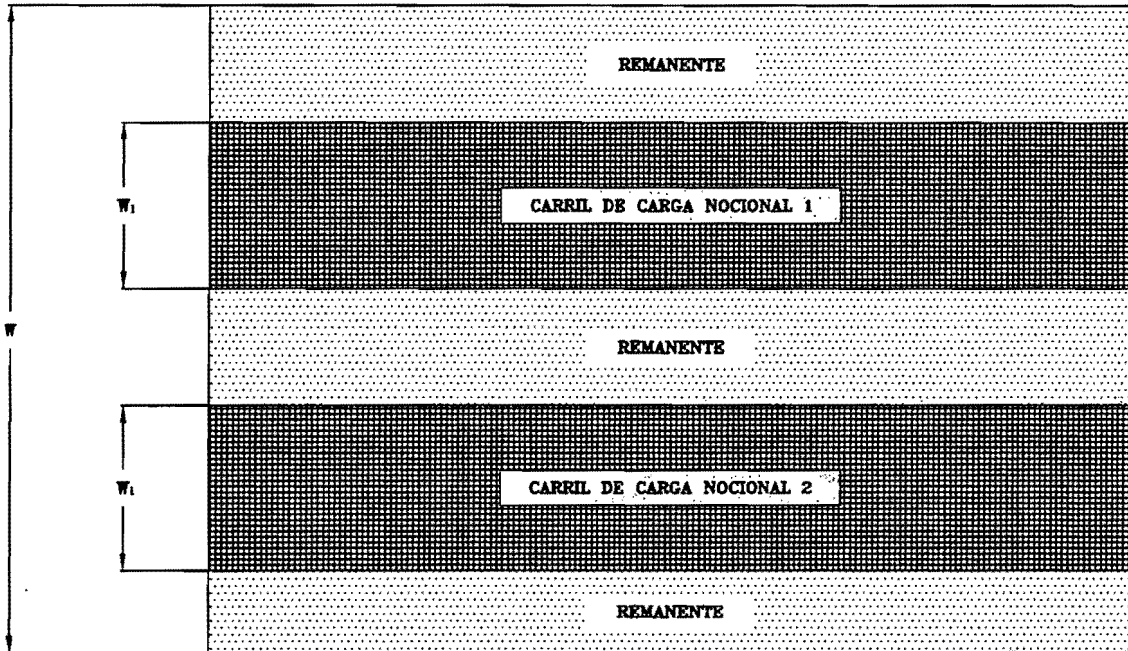


Figura 5.1. Arreglo típico para el manejo de los carriles de carga virtuales

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

$$\alpha_o Q_k \quad (5.1)$$

donde:

α_o 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:

α_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, 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_{lk} o q_{rk} (kN/m²)
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 α_{Qi} y α_{qi} pueden ser ajustados para diferentes situaciones de tráfico. En ausencia de estudios, se pueden utilizar estos factores igual a uno.

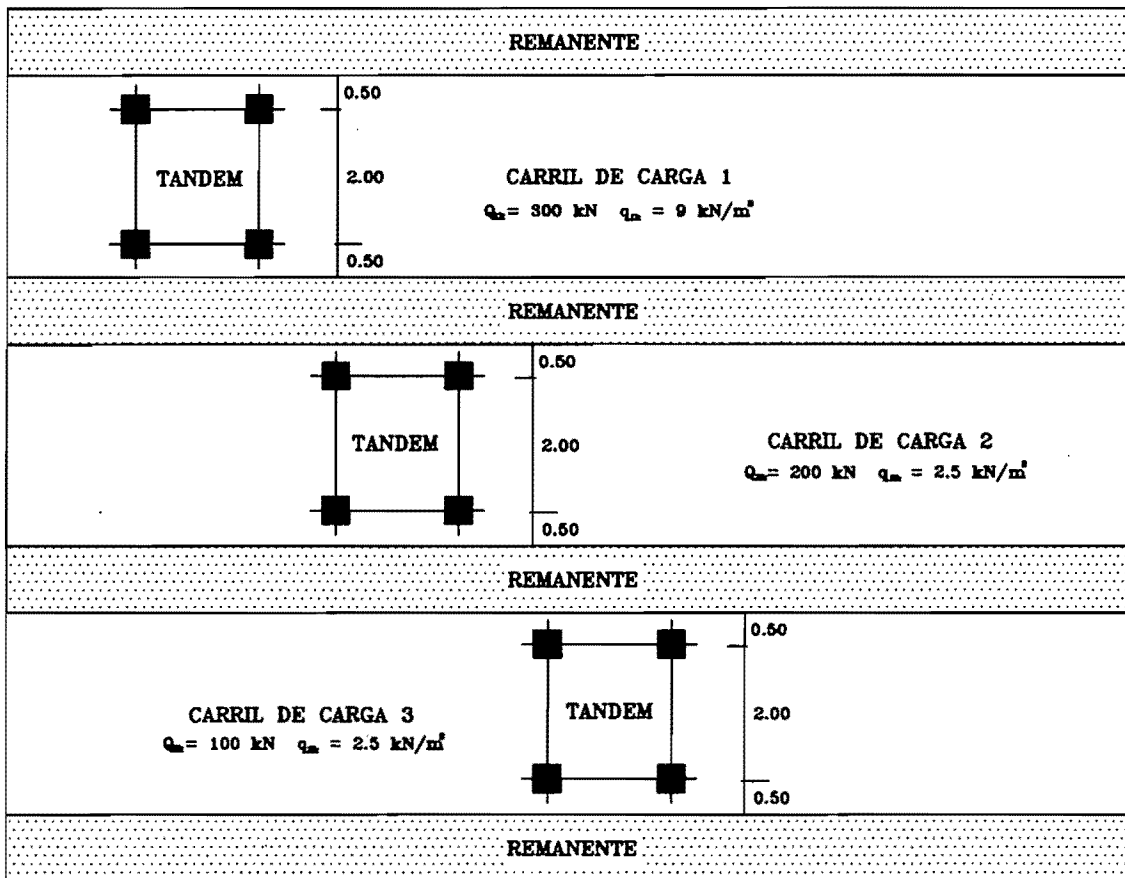
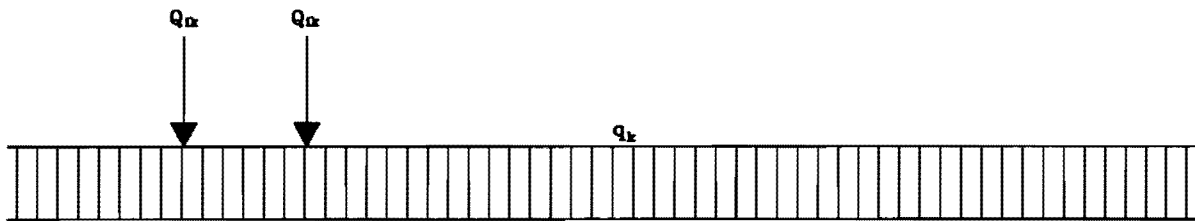


Figura 5.2. Modelo de carga 1

En la figura 5.2 se muestra el caso de un puente con un ancho de calzada que requiere de la definición 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 dada por

$$\beta_0 Q_{ak} \quad (5.3)$$

donde:

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

En los dos casos donde se requiera utilizar sólo una rueda, se utilizará $Q_{ak} = 200 \text{ kN}$.

Si no se tienen mejores valores de β_0 , se tomará igual a α_{01} . La figura 5.3 muestra gráficamente este modelo de cargas.

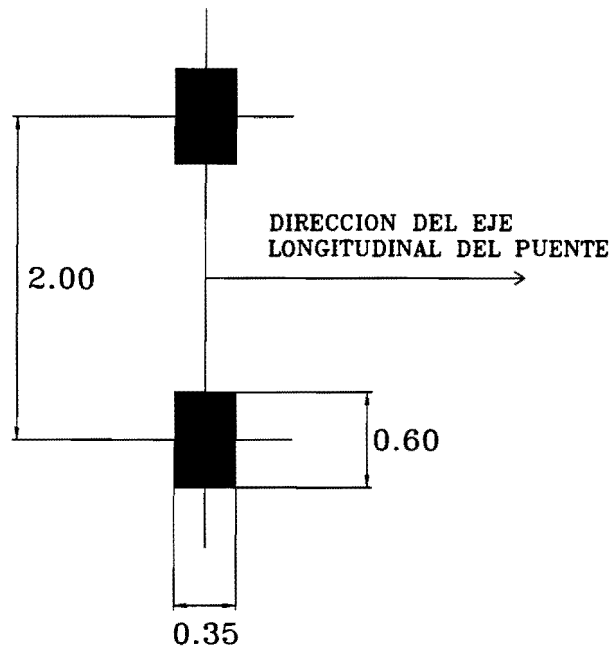


Figura 5.3. Modelo de carga 2

6. REGLAMENTO DE PESOS Y DIMENSIONES DE MÉXICO

La presente norma oficial sobre “pesos y dimensiones” (ref. 3) tiene por objeto regular el peso, dimensiones y capacidad a que 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. Estas cargas fueron obtenidas tomando en cuenta sólo el daño a pavimentos, sin incluir el daño a puentes.

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 POR EJE Y TIPO DE CAMINO AUTORIZADOS

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 diario oficial el 4 de septiembre de 1995

Tabla 6.2. PESOS BRUTOS VEHICULARES (PBV) PARA LOS CAMINOS A4 Y A2 ASI COMO LA LONGITUD MAXIMA AUTORIZADA

CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO	NUMERO DE LLANTAS	PBV (ton)	LONGITUD DEL VEHÍCULO
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 diario oficial el 4 de septiembre de 1995

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.

Para el caso del vehículo C-2, figura 7.3, se observan dos poblaciones; esto debido a que no existe uniformidad estándar 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 ² (kg)	% de vehículos excedidos ³
C-2	11,268 (0.356) ¹	13,500 (4 llantas) 17,500 (6 llantas)	28.16 (4 llantas) 4.96 (6 llantas)
C-3	22,825 (0.339)	19,000 (6 llantas) 26,000 (10 llantas)	37.86 (6 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) 48,500 (22 llantas)	51.91 (16 llantas) 46.75 (22 llantas)
T3-S2-R4	71,150 (0.319)	59,000 (22 llantas) 66,500 (34 llantas)	49.84 (22 llantas) 43.44 (34 llantas)

¹ los valores dentro de los paréntesis son los coeficientes de variación

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

³ 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

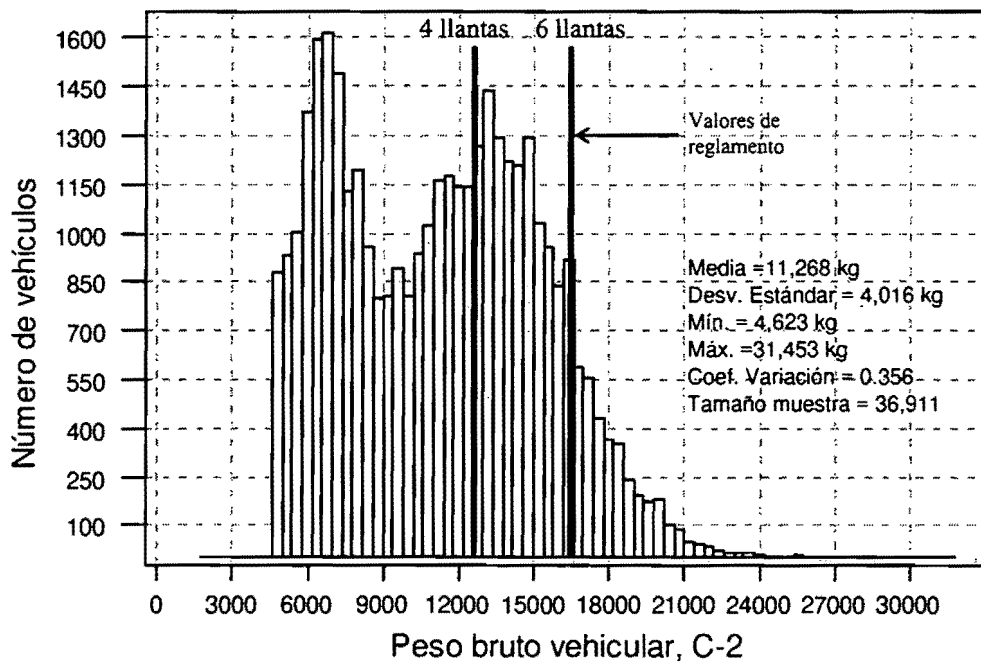


Figura 7.3 Peso bruto vehicular de vehículos cargados C-2, en kg

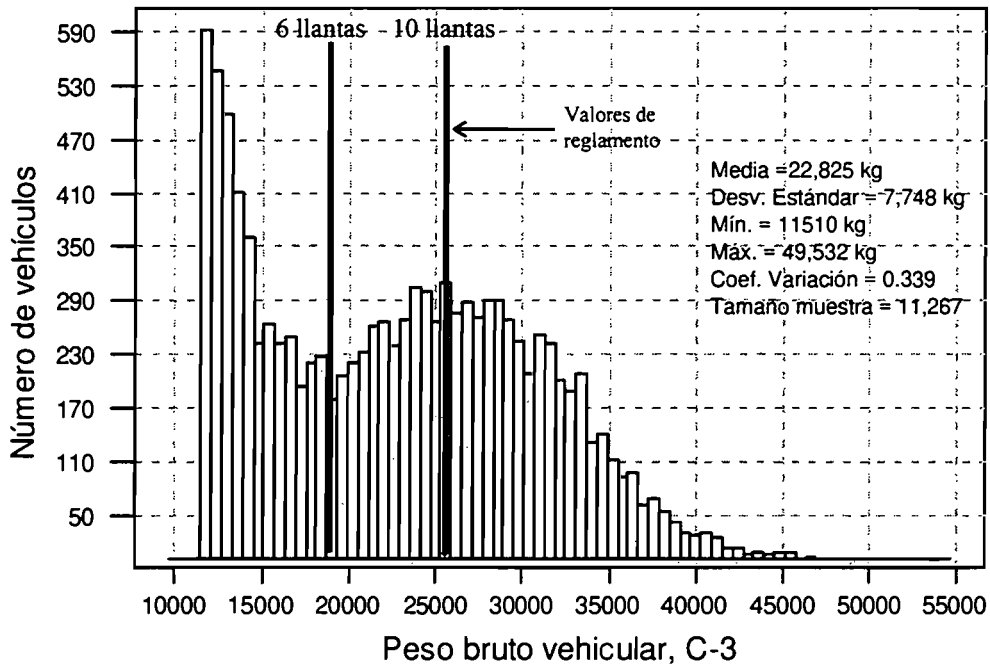


Figura 7.4 Peso bruto vehicular de vehículos cargados C-3, en kg

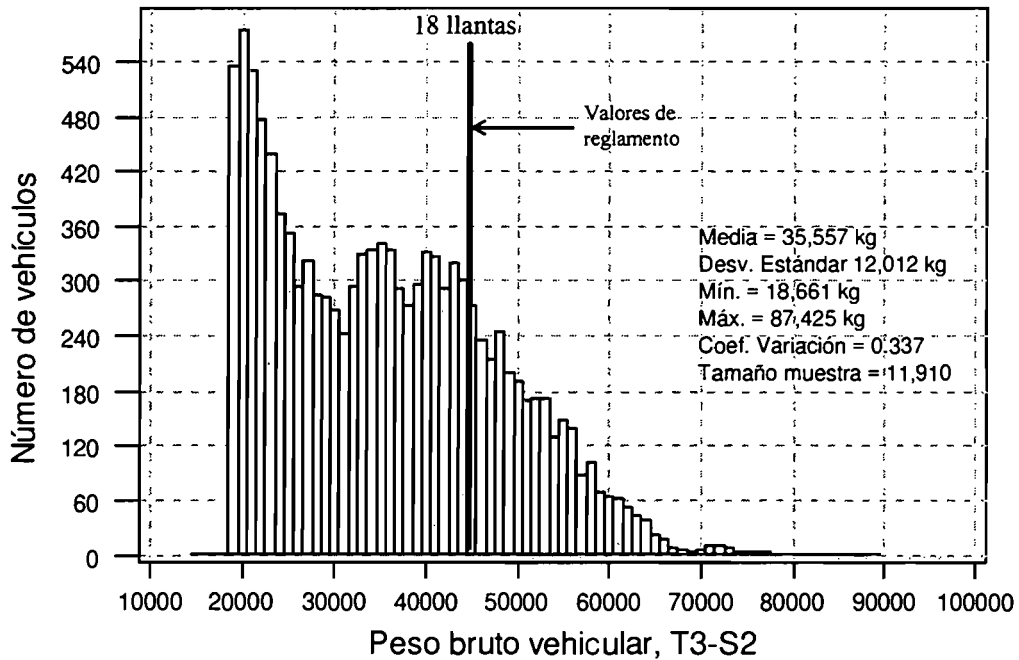


Figura 7.5 Peso bruto vehicular de vehículos cargados T3-S2, en kg

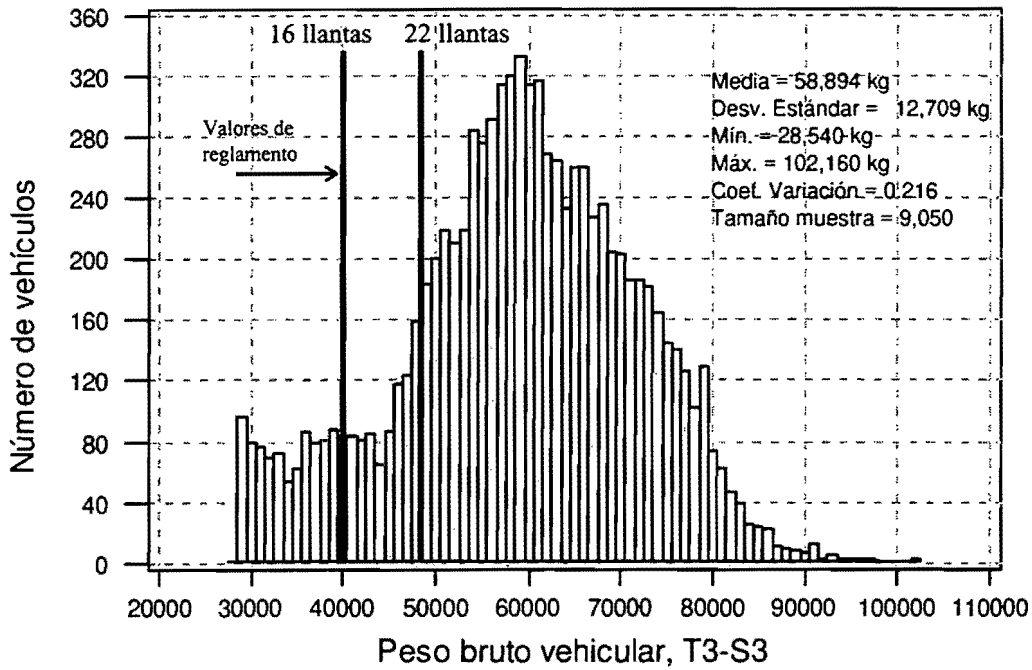


Figura 7.6 Peso bruto vehicular de vehículos cargados T3-S3, en kg

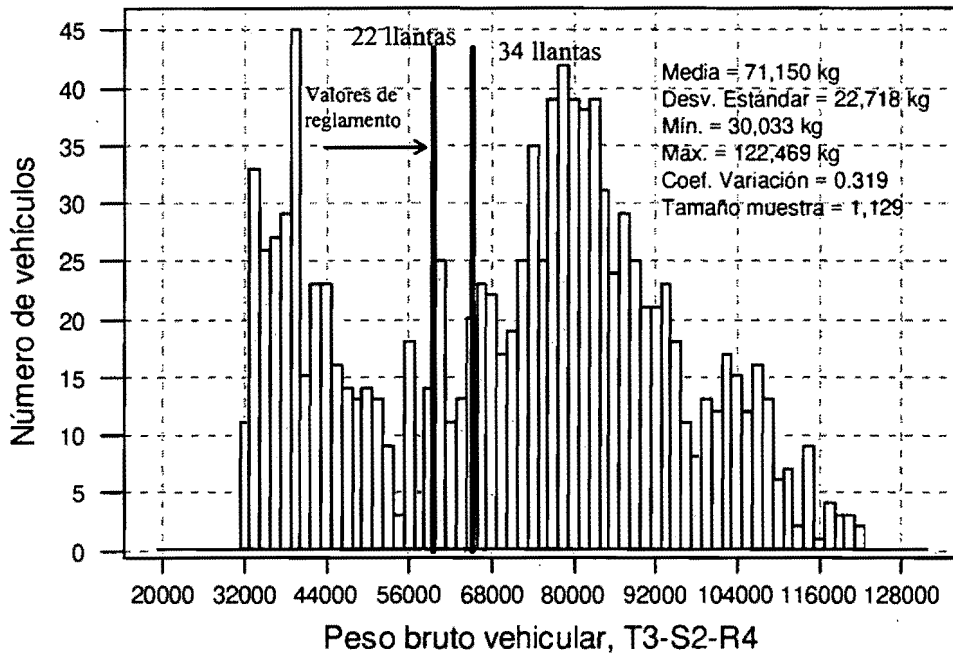


Figura 7.7 Peso bruto vehicular de vehículos cargados T3-S2-R4, en kg

7.4 Cargas por eje

Una de las variables más importantes para analizar el daño 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 vehículo. En la tabla 7.2 se muestra 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) ¹	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)	8,345 (0.403)	8,481 (0.420)

¹ 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 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 valor 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.

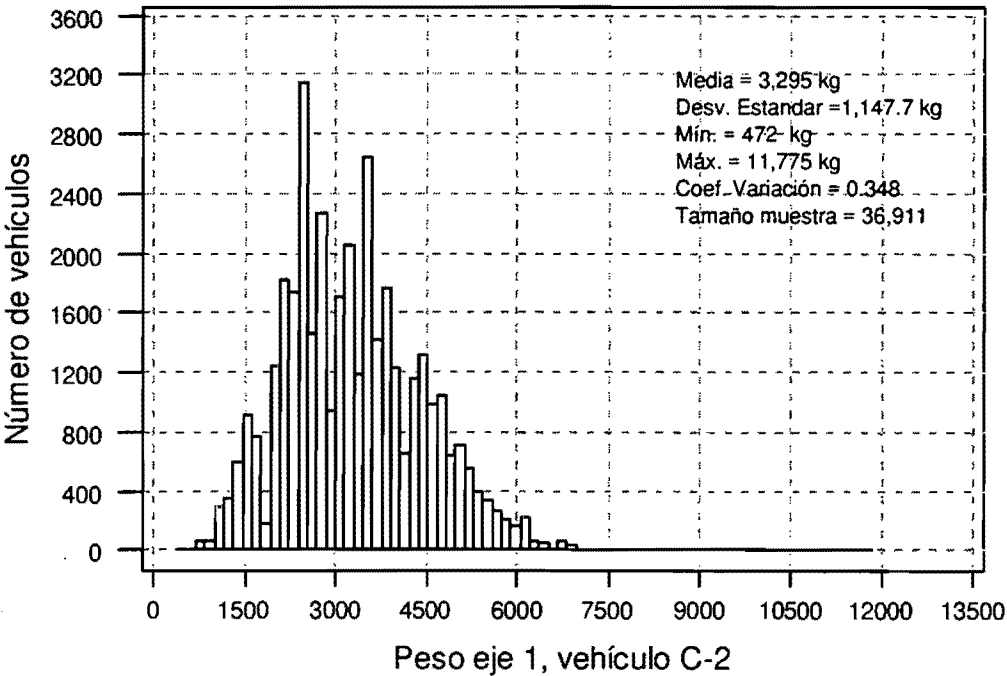


Figura 7.8 Peso primer eje vehículo C-2, en kg

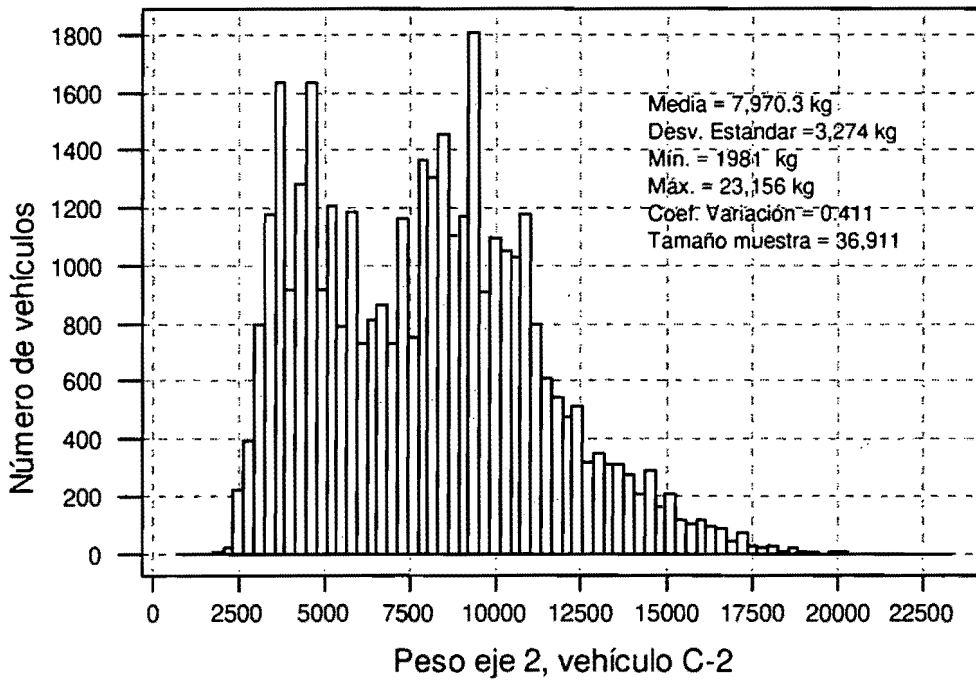


Figura 7.9 Peso segundo eje vehículo C-2, en kg

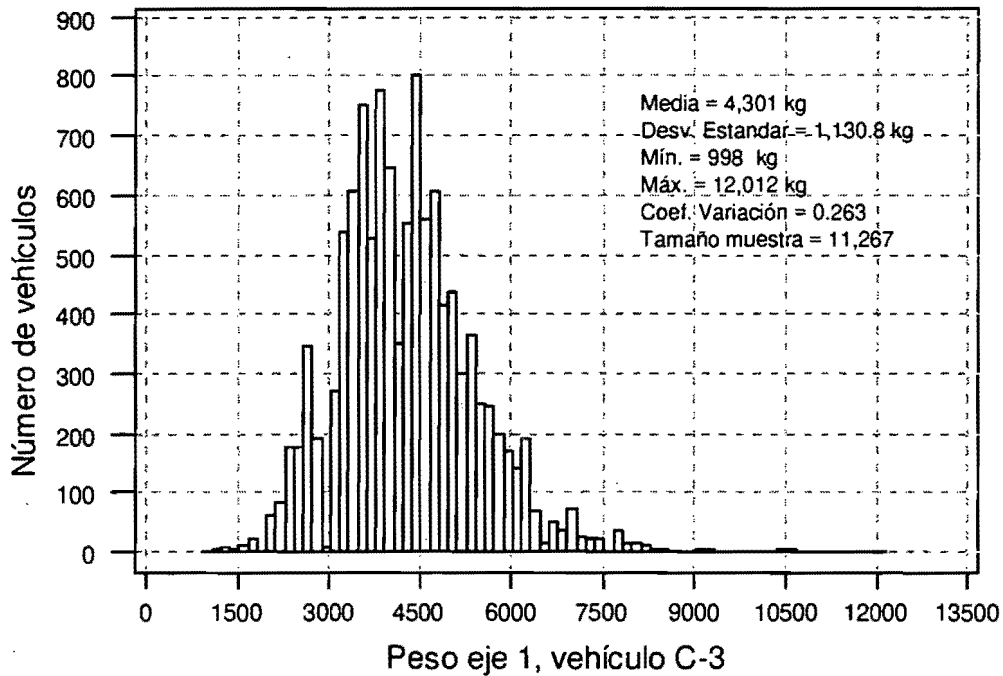


Figura 7.10 Peso primer eje vehículo C-3, en kg

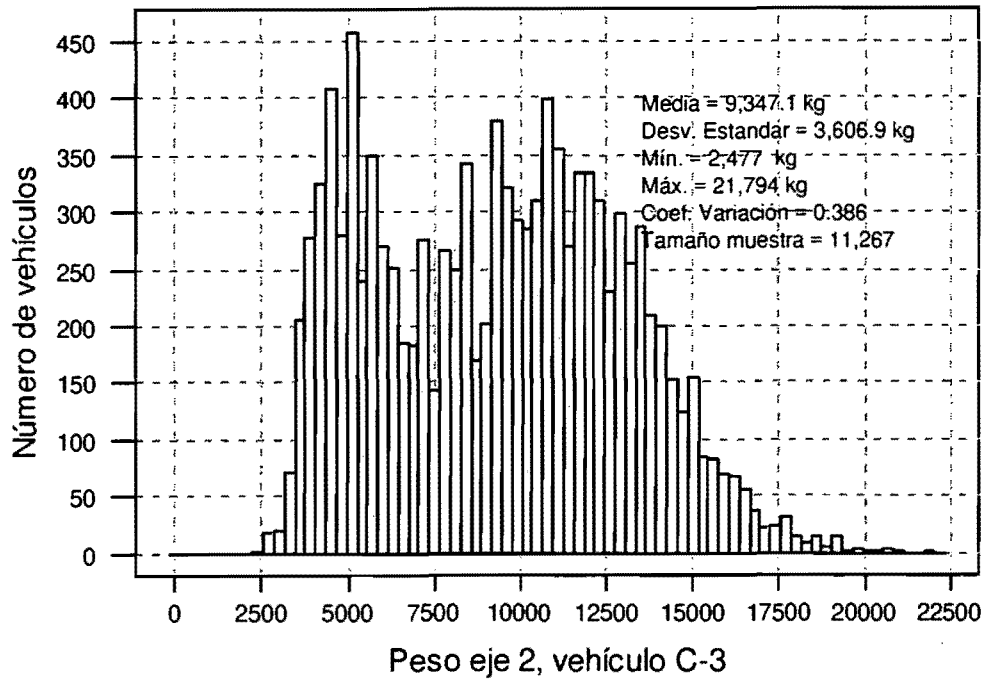


Figura 7.11 Peso segundo eje vehículo C-3, en kg

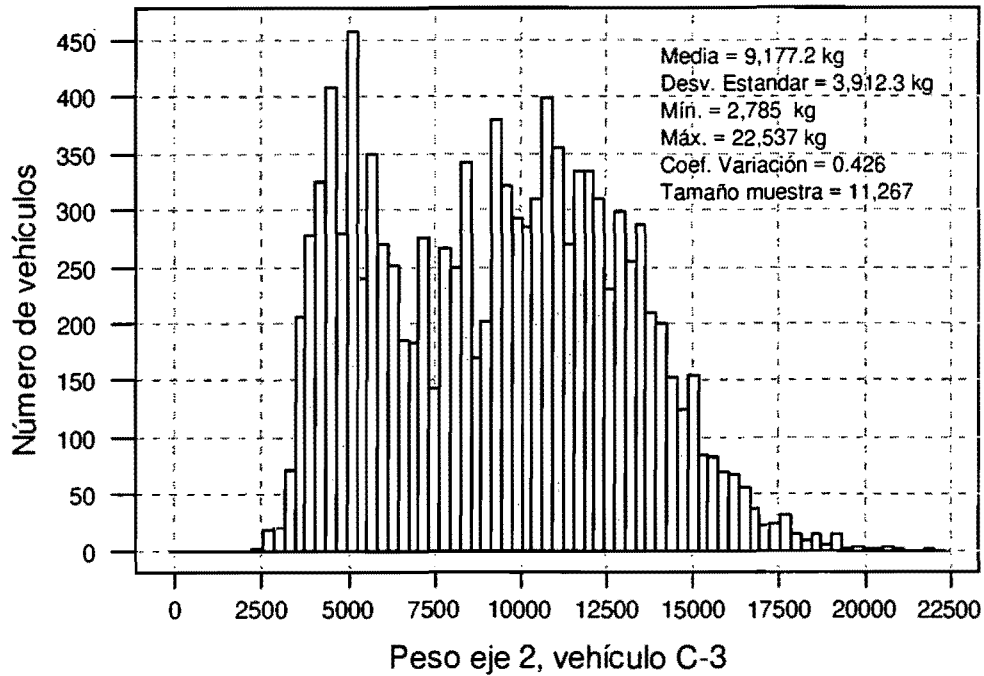


Figura 7.12 Peso tercer eje vehículo C-3, en kg

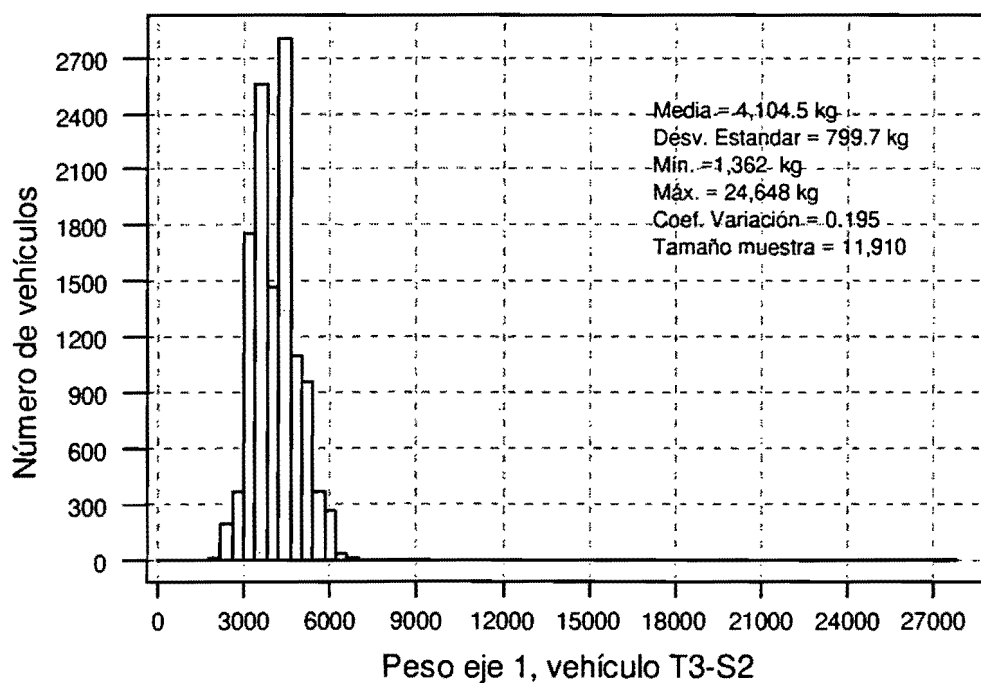


Figura 7.13 Peso primer eje vehículo T3-S2, en kg

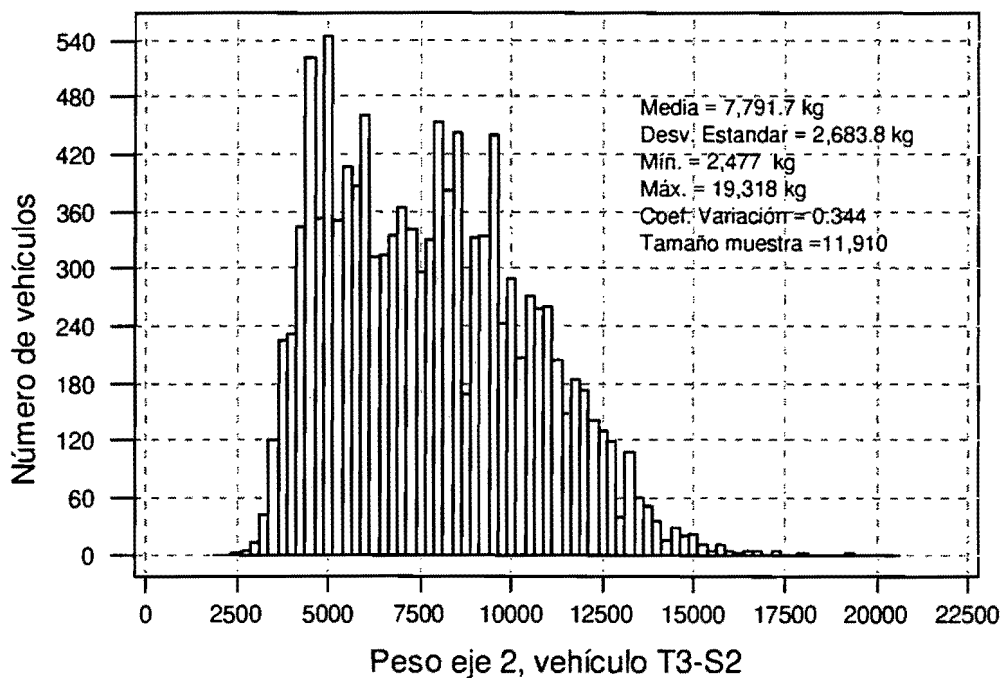


Figura 7.14 Peso segundo eje vehículo T3-S2, en kg

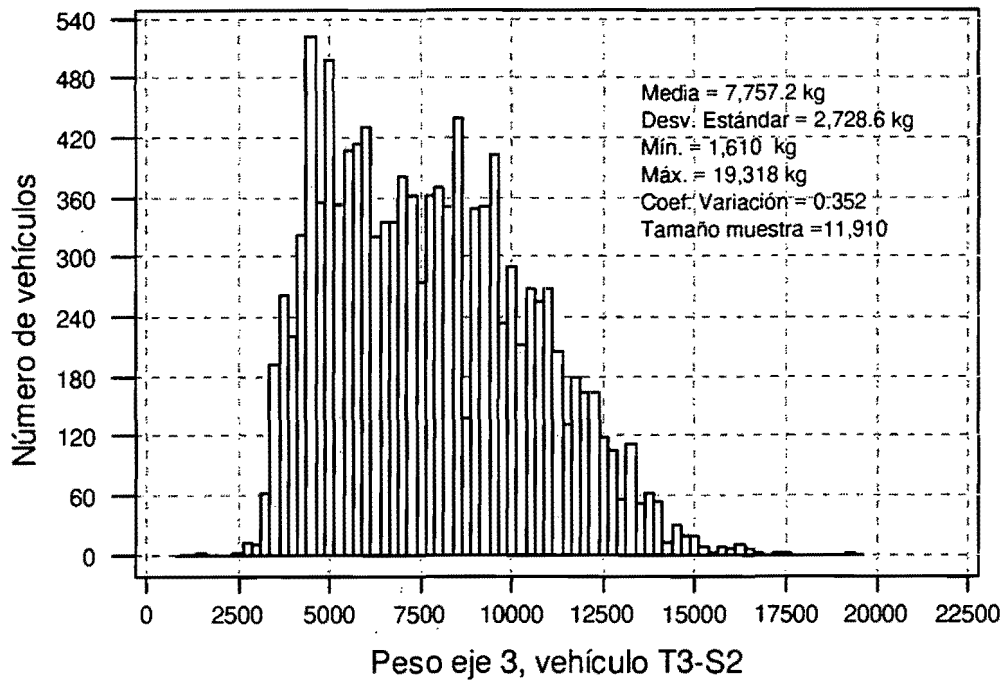


Figura 7.15 Peso tercer eje vehículo T3-S2, en kg

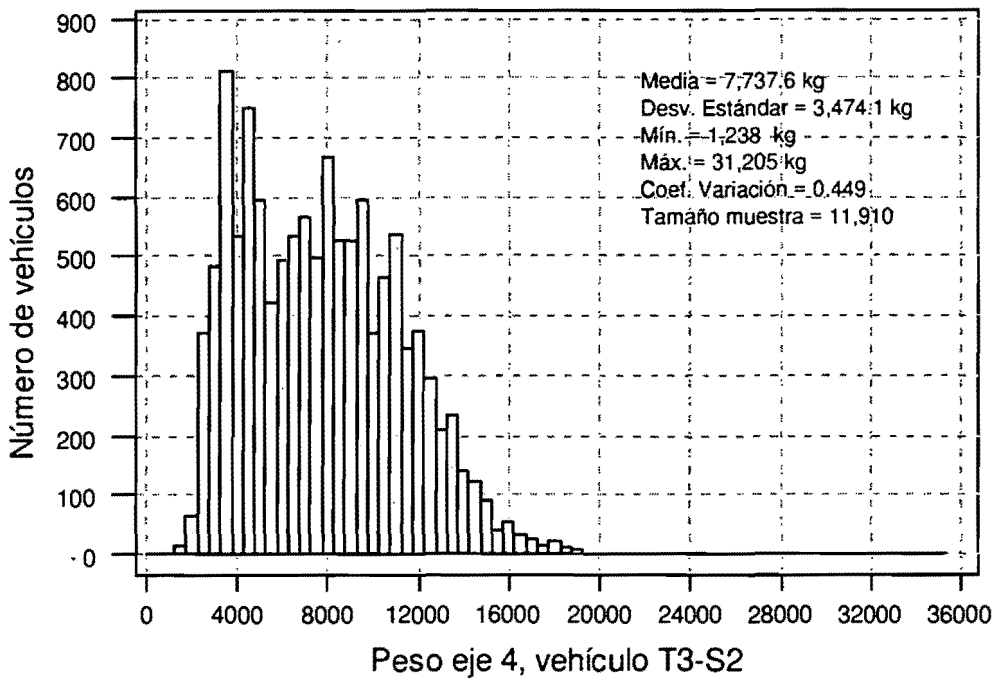


Figura 7.16 Peso cuarto eje vehículo T3-S2, en kg

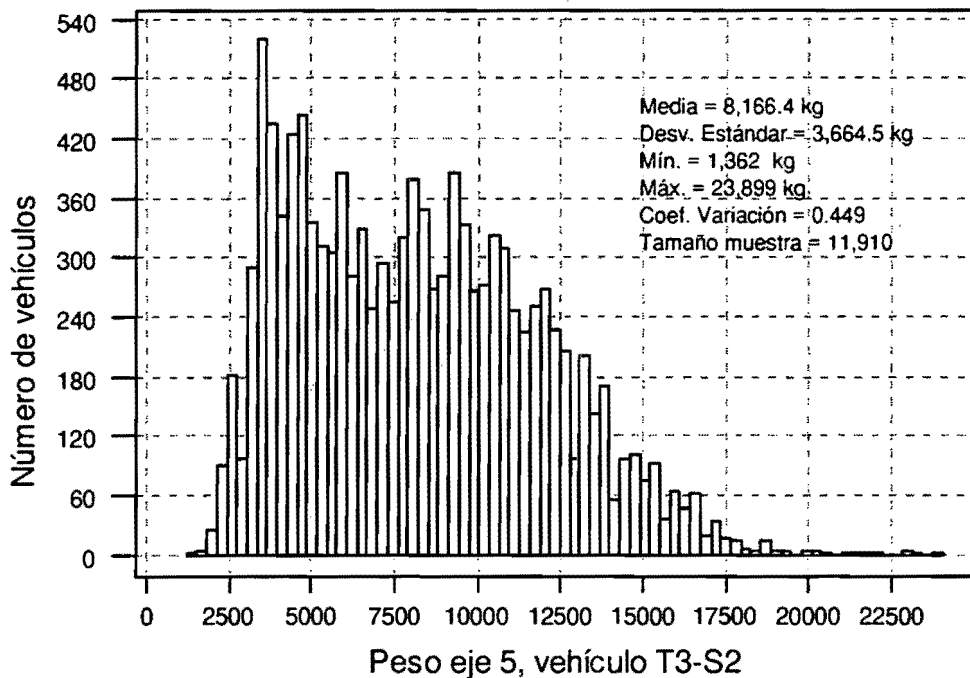


Figura 7.17 Peso quinto eje vehículo T3-S2, en kg

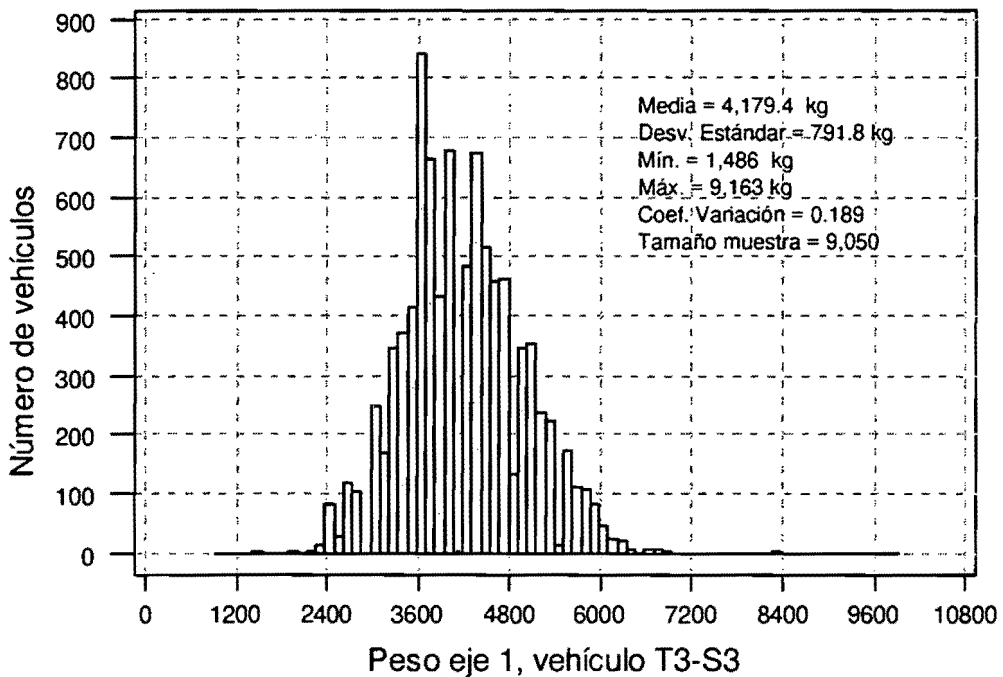


Figura 7.18 Peso primer eje vehículo T3-S3, en kg

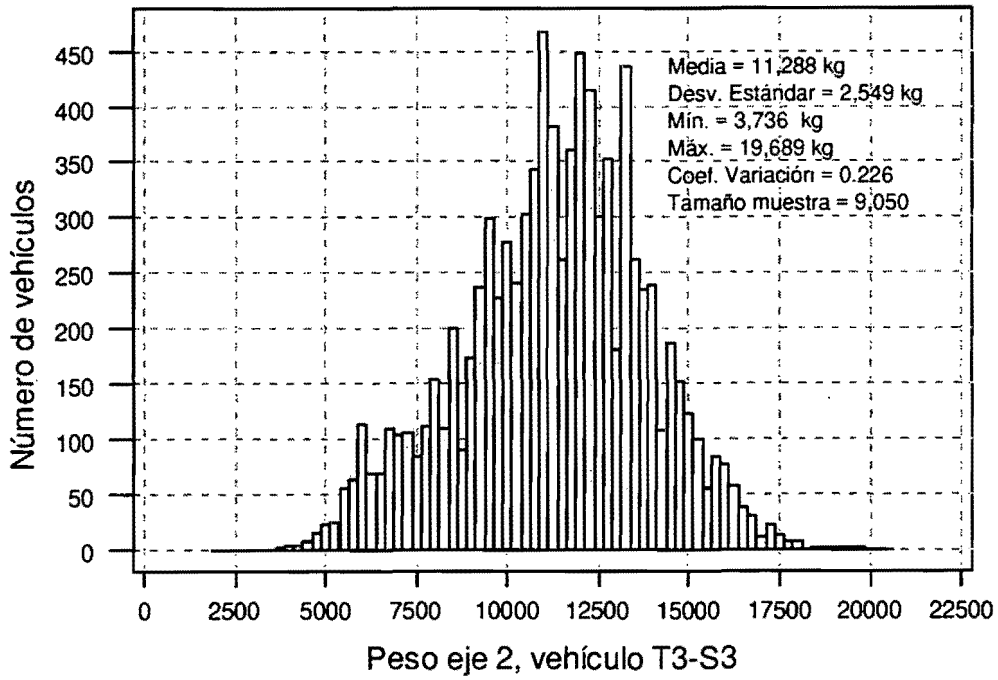


Figura 7.19 Peso segundo eje vehículo T3-S3, en kg

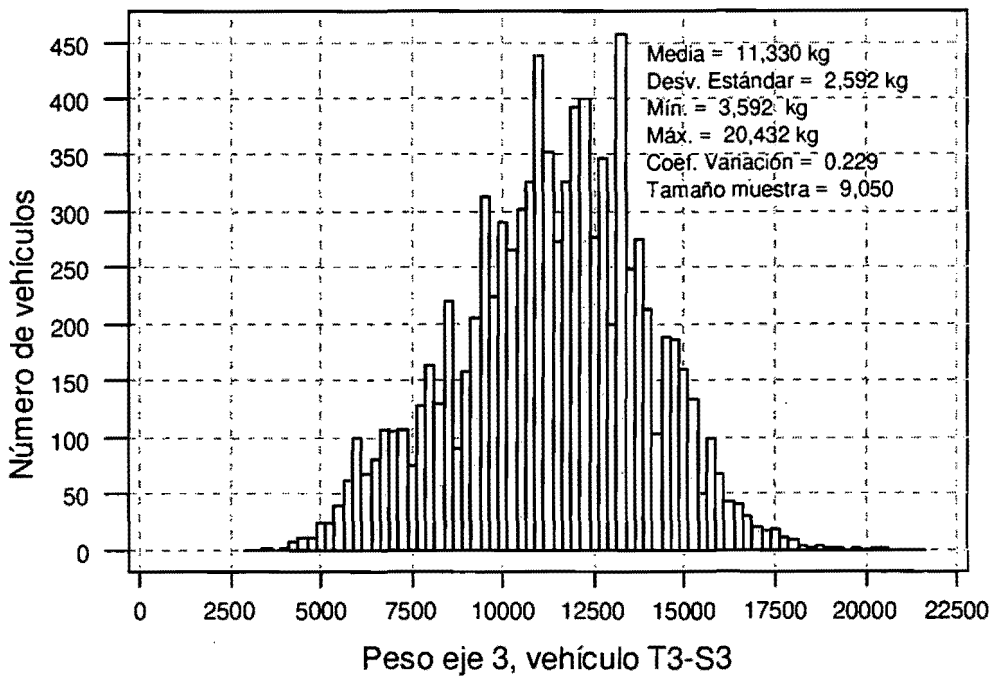


Figura 7.20 Peso tercer eje vehículo T3-S3, en kg

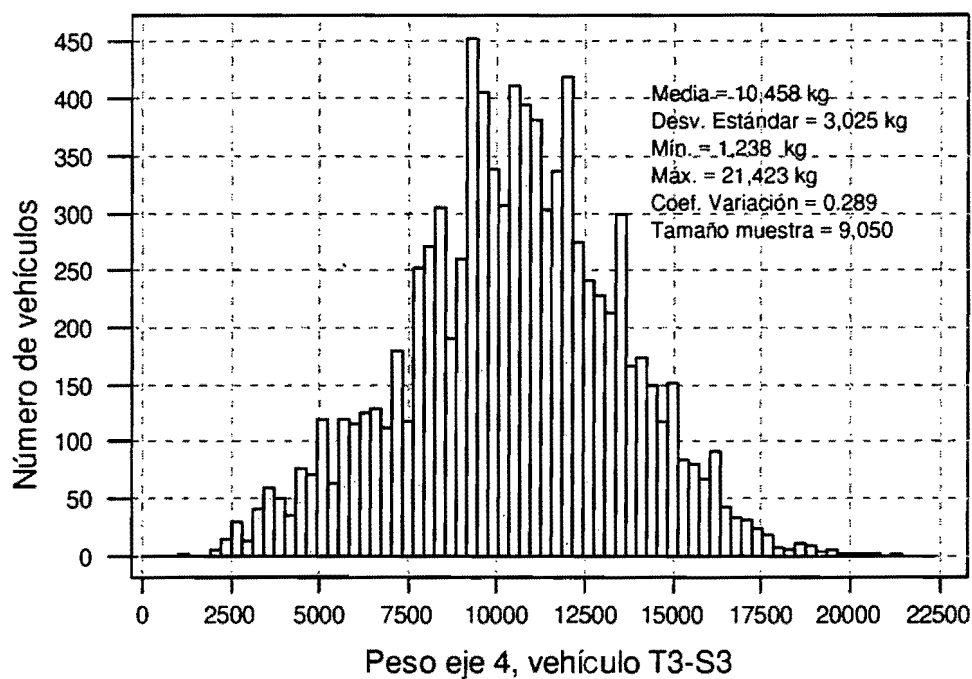


Figura 7.21 Peso cuarto eje vehículo T3-S3, en kg

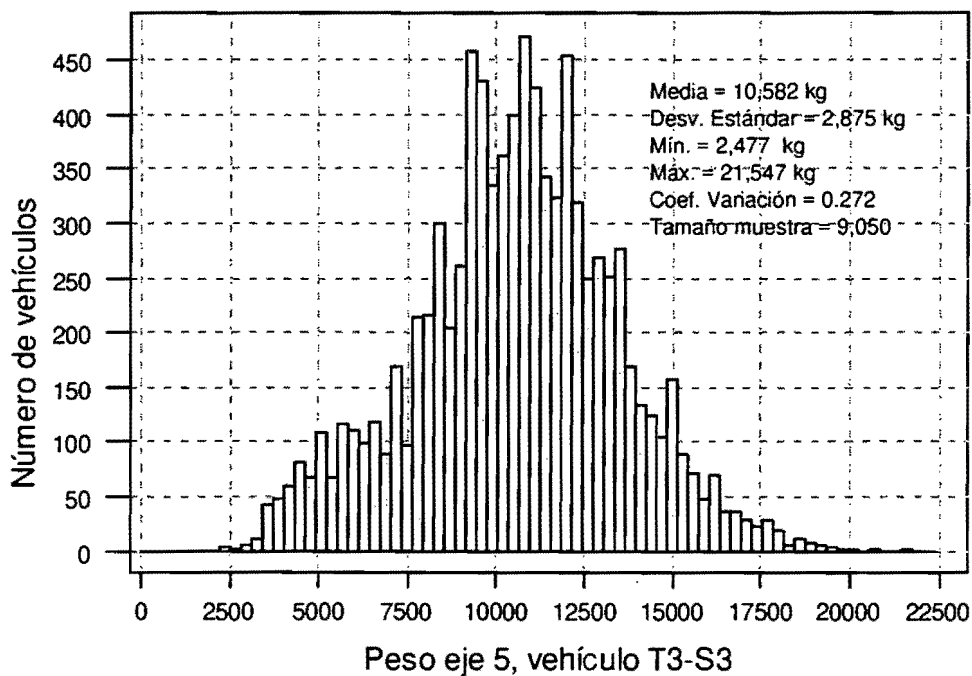


Figura 7.22 Peso quinto eje vehículo T3-S3, en kg

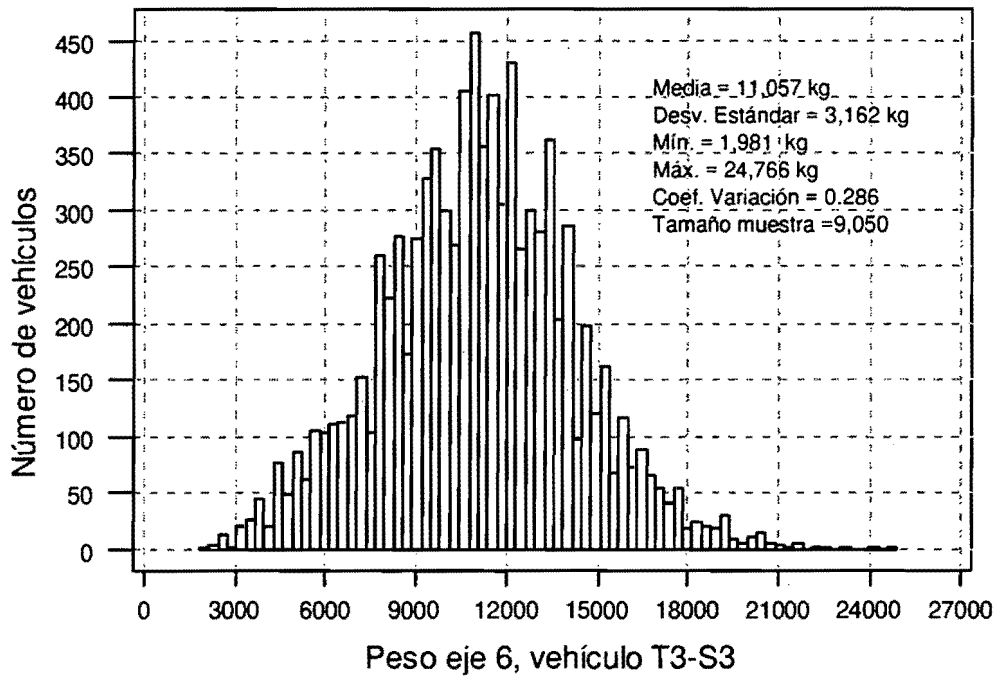


Figura 7.23 Peso sexto eje vehículo T3-S3, en kg

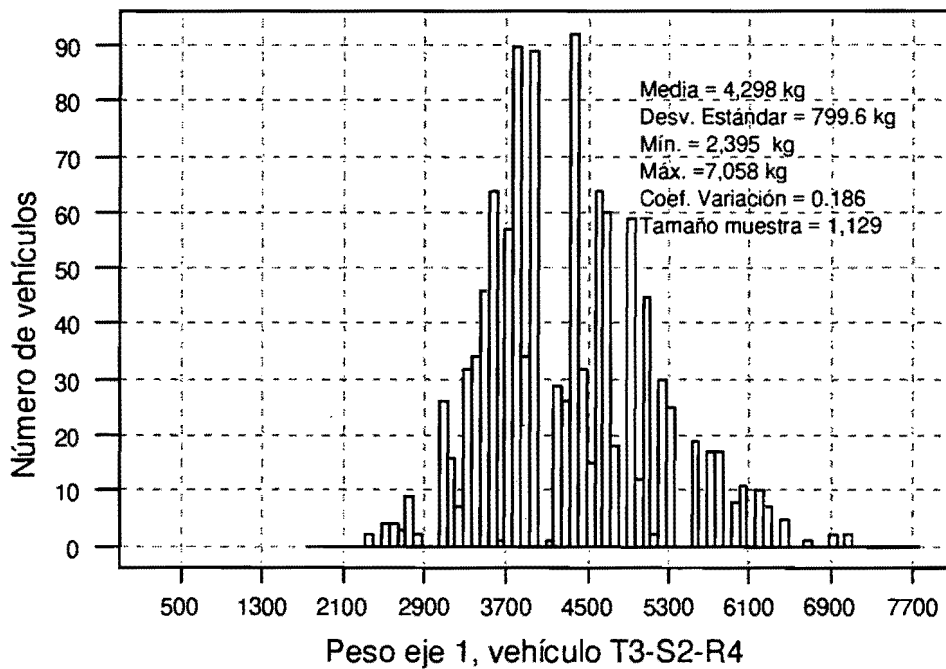


Figura 7.24 Peso primer eje vehículo T3-S2-R4, en kg

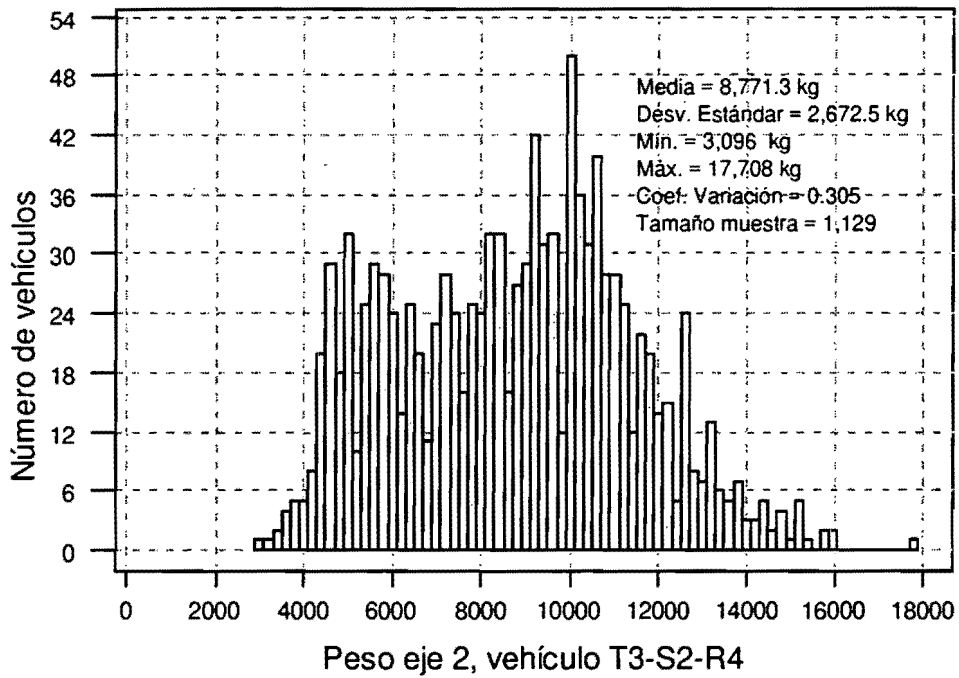


Figura 7.25 Peso segundo eje vehículo T3-S2-R4, en kg

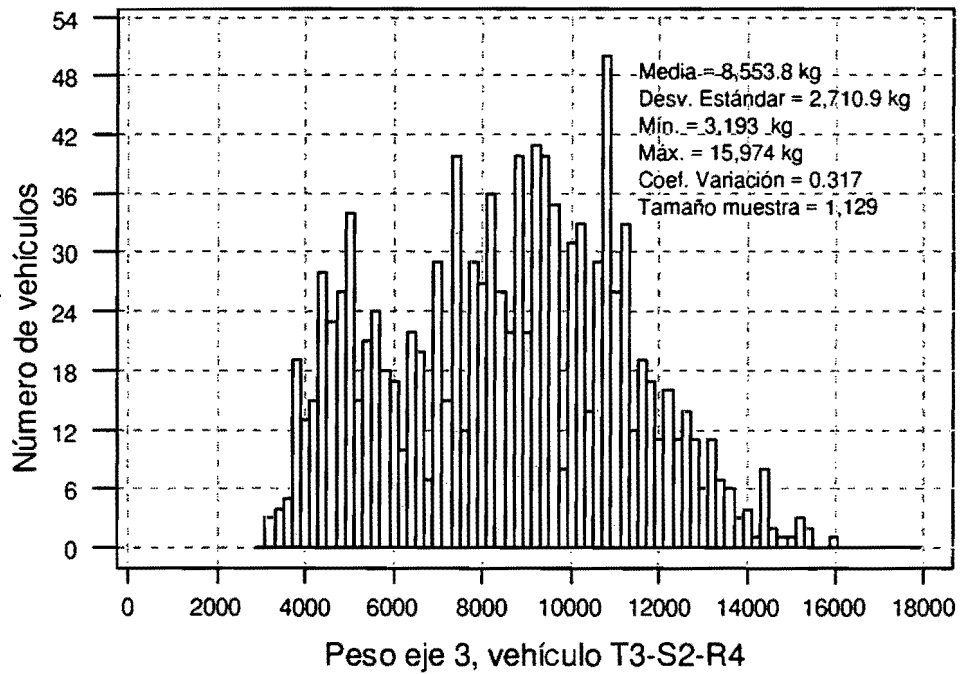


Figura 7.26 Peso tercer eje vehículo T3-S2-R4, en kg

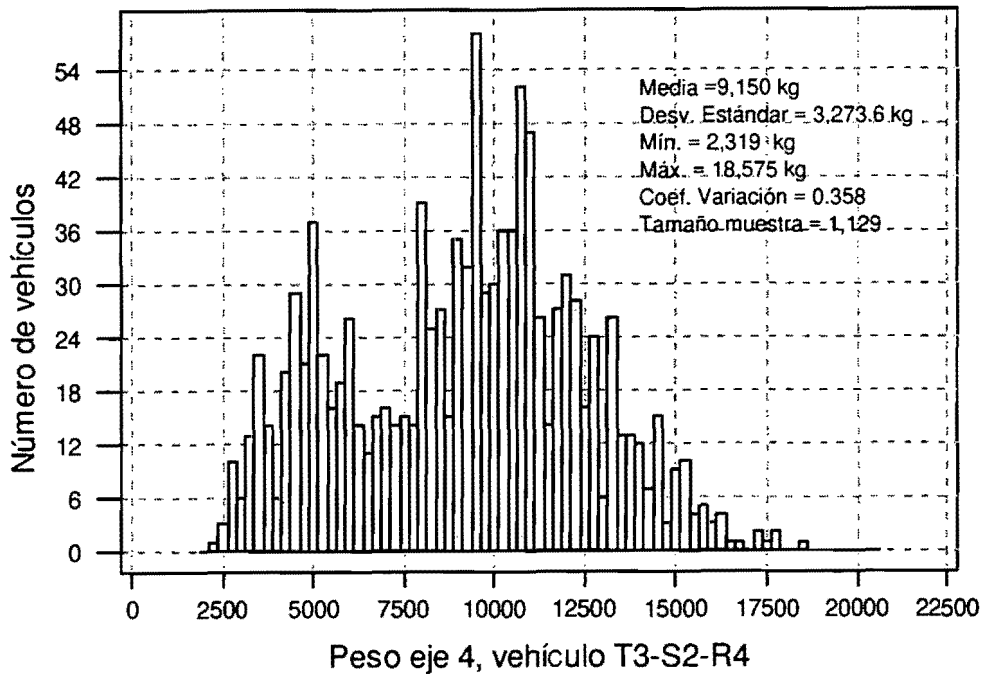


Figura 7.27 Peso cuarto eje vehículo T3-S2-R4, en kg

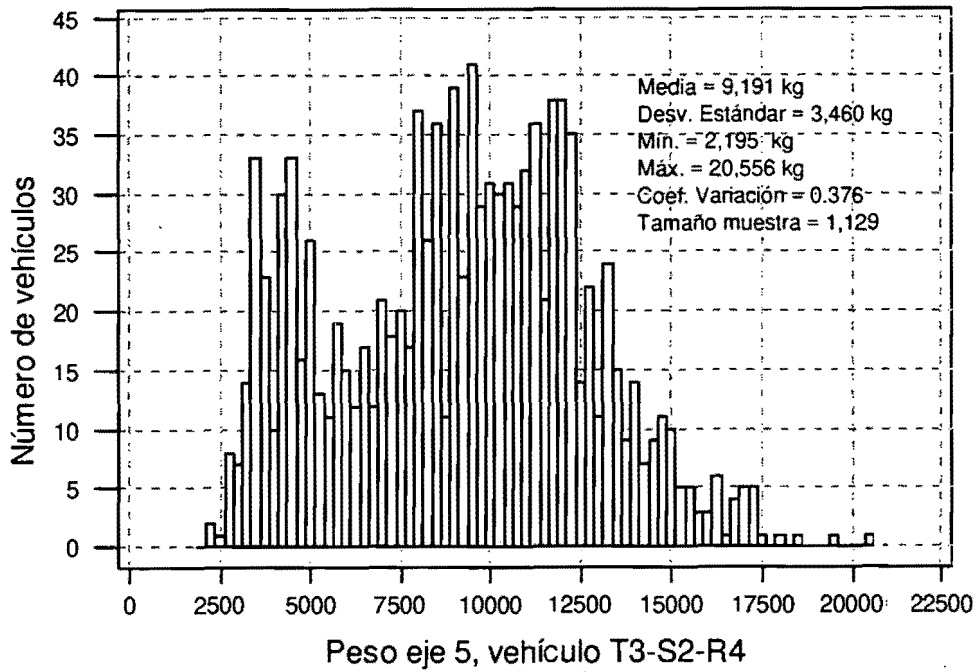


Figura 7.28 Peso quinto eje vehículo T3-S2-R4, en kg

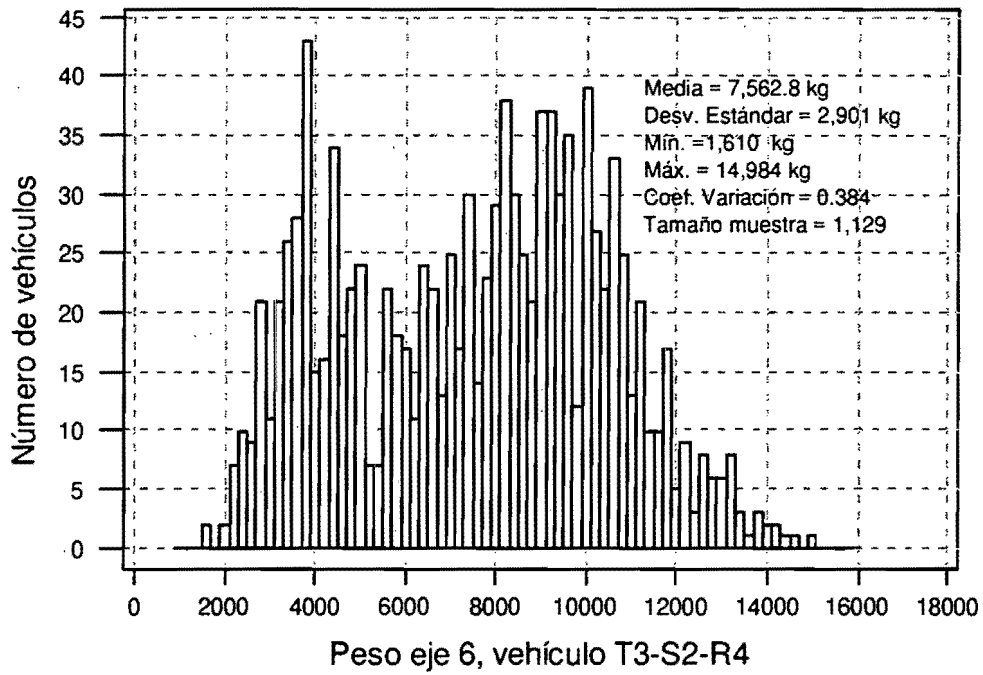


Figura 7.29 Peso sexto eje vehículo T3-S2-R4, en kg

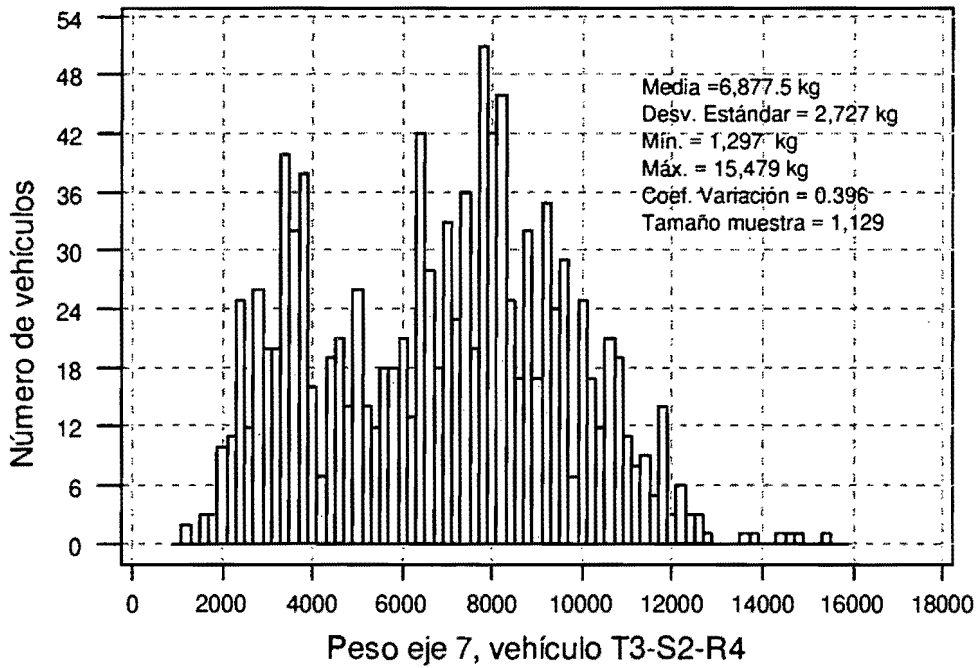


Figura 7.30 Peso séptimo eje vehículo T3-S2-R4, en kg

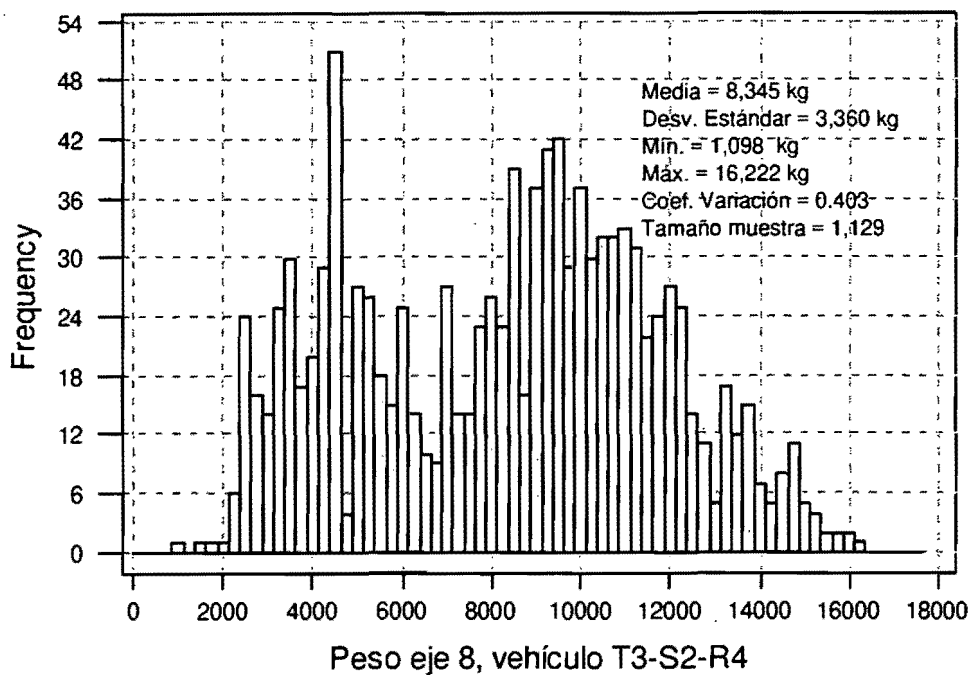


Figura 7.31 Peso octavo eje vehículo T3-S2-R4, en kg

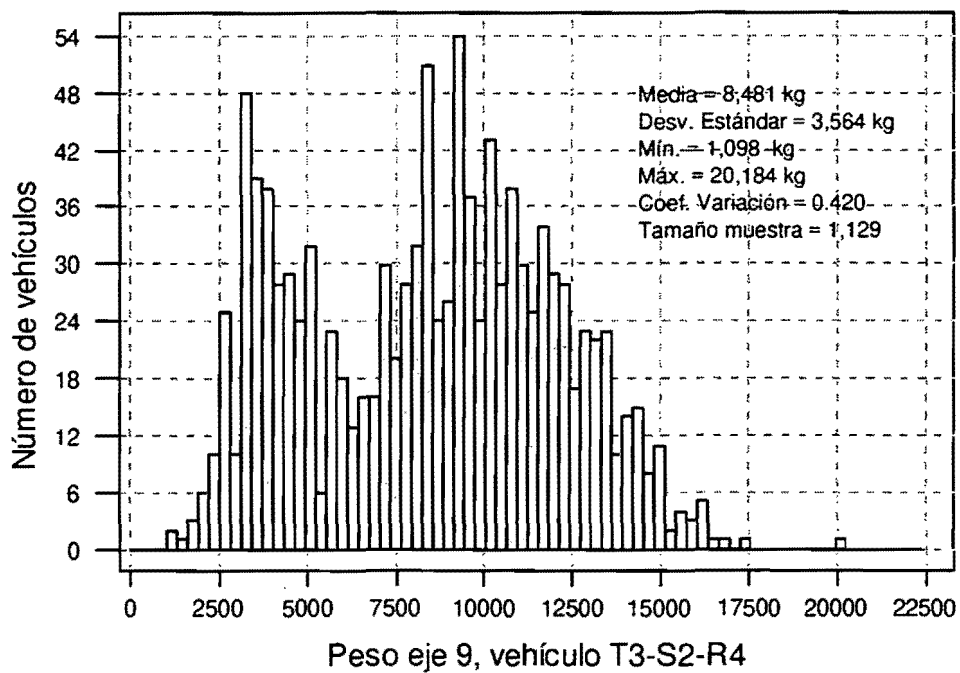


Figura 7.32 Peso noveno eje vehículo T3-S2-R4, en kg

7.5 Longitud total entre ejes

Otra variable que resulta significativa en el análisis y diseño de 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.3), 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

En la tabla 7.3 se muestran los valores promedios 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 indicios de que en México la política de limitación de cargas no ha considerado el daño a puentes y sólo se basa en cuidar el daño a los pavimentos.

En la figura 7.33, se muestra el histograma correspondiente al vehículo C-2, en el 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 desde camiones de volteo con longitud entre eje corta (longitud entre eje de catálogo de 3.40 m), y vehículos de carga con diversas distancias entre eje según sea el tipo de carga que se maneja.

**Tabla 7.3 LONGITUDES TOTALES PROMEDIO
ENTRE EJES, EN CMS**

Tipo de vehículo	Longitud total entre eje en cm.	PBV en kg obtenido con la formula puente	PBV promedio en kg
C-2	528.12 (0.172) ¹	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

¹ 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 variedad de arreglos que existen para este tipo de vehículo.

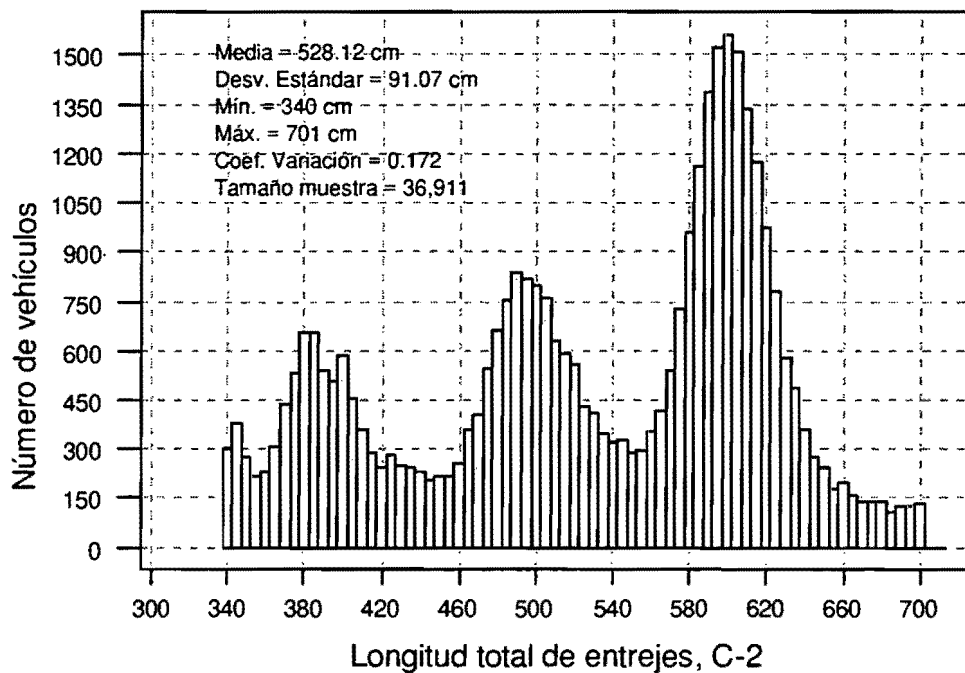


Figura 7.33 Longitud total entre ejes en cm, vehículo C-2

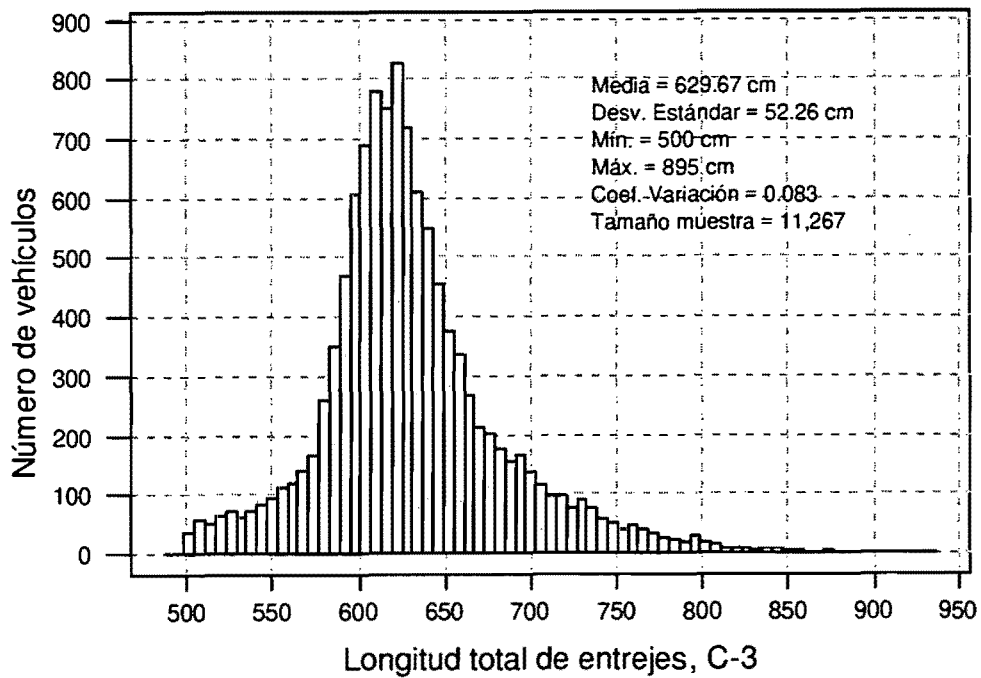


Figura 7.34 Longitud total entre ejes en cm, vehículo C-3

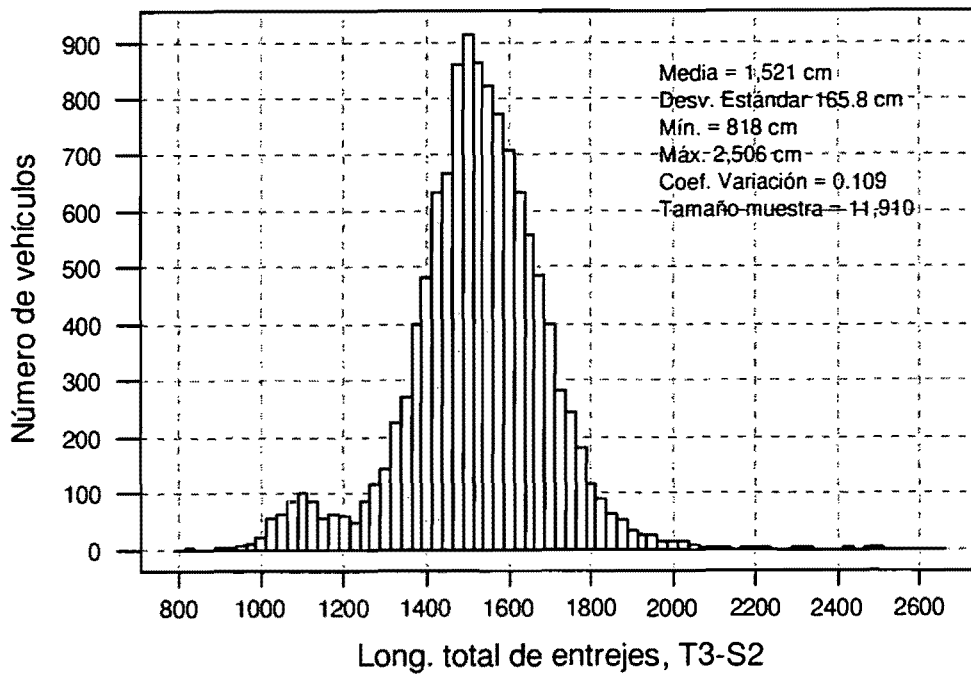


Figura 7.35 Longitud total entre ejes en cm, vehículo T3-S2

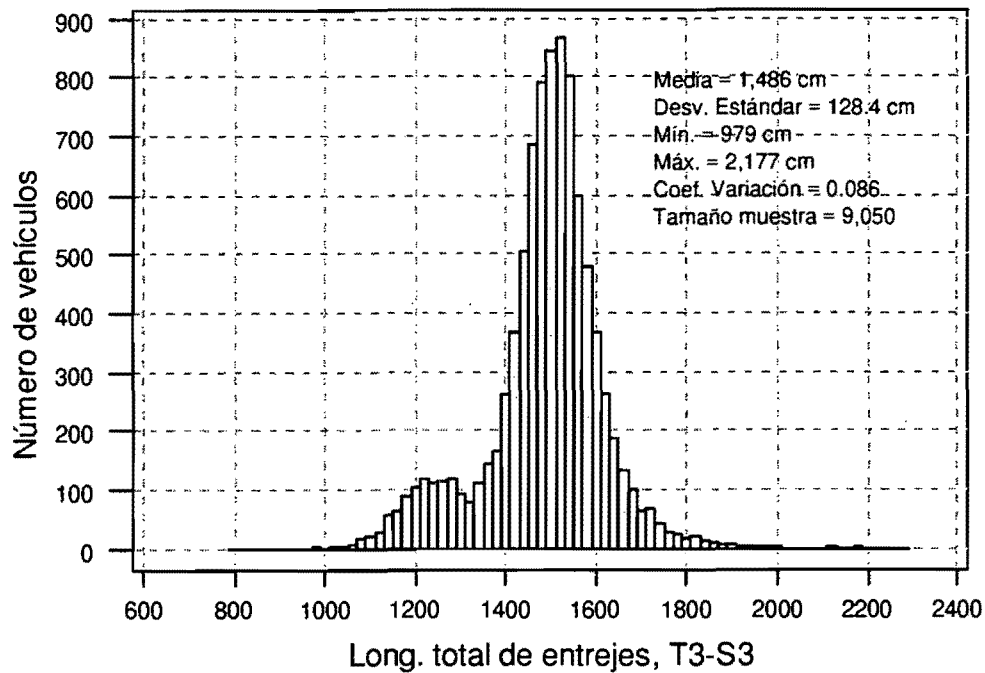


Figura 7.36 Longitud total entre ejes en cm, vehículo T3-S3

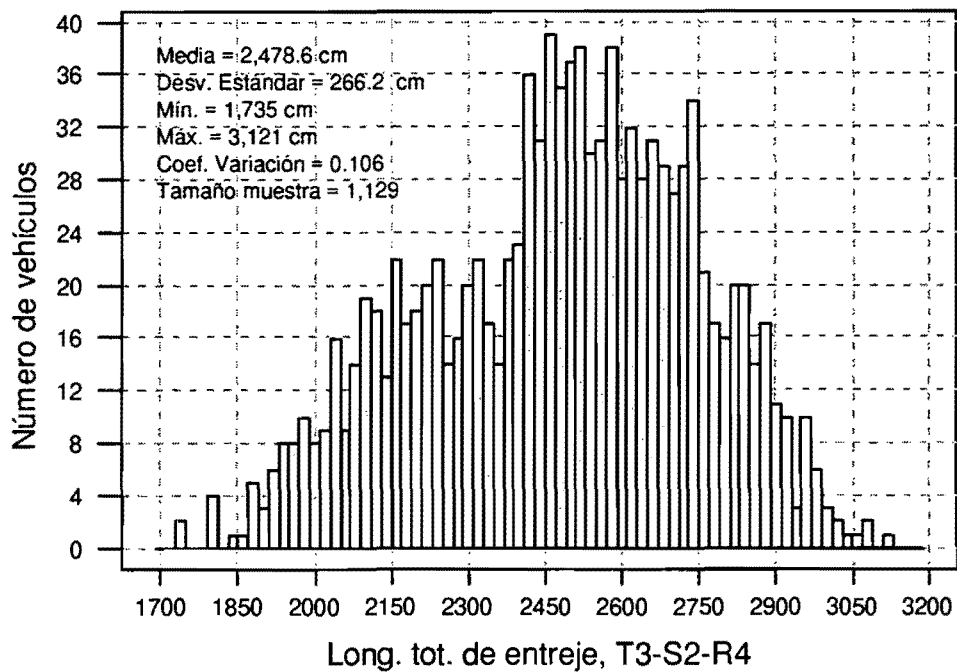


Figura 7.37 Longitud total entre ejes en cm, vehículo T3-S2-R4

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 tipo de vehículo.

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 (0.172)							
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)

¹ 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 entreje 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 entrejes. 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.

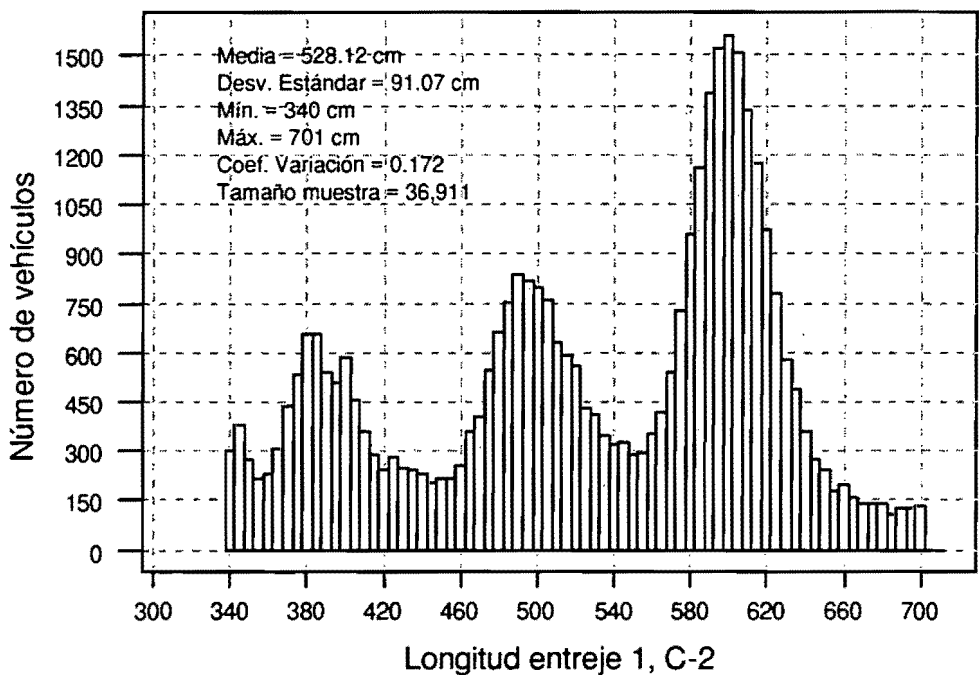


Figura 7.38 Longitud entre eje 1 en cm, vehículo C-2

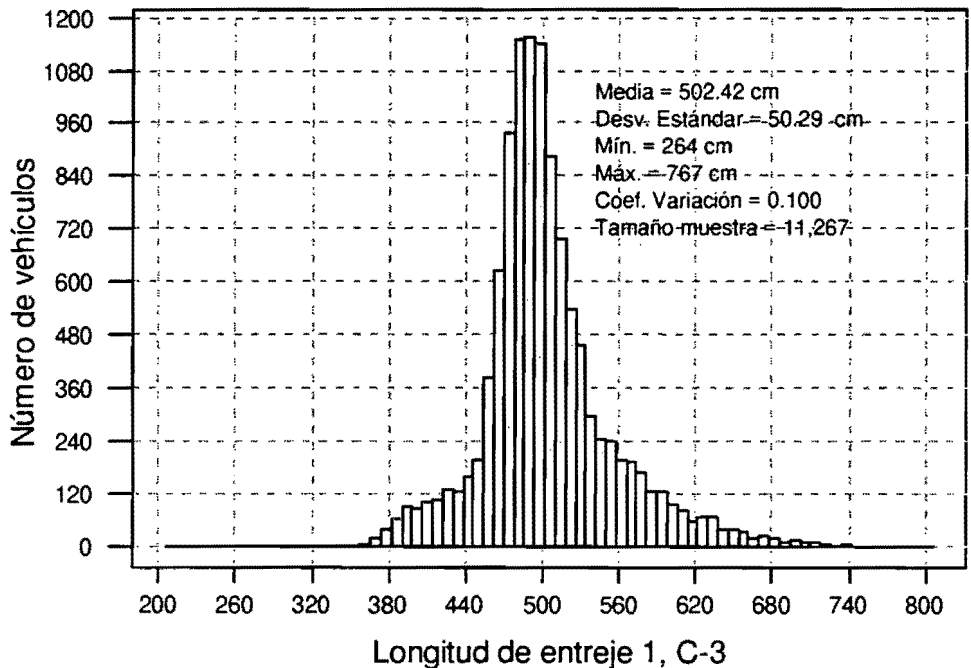


Figura 7.39 Longitud entre eje 1 en cm, vehículo C-3

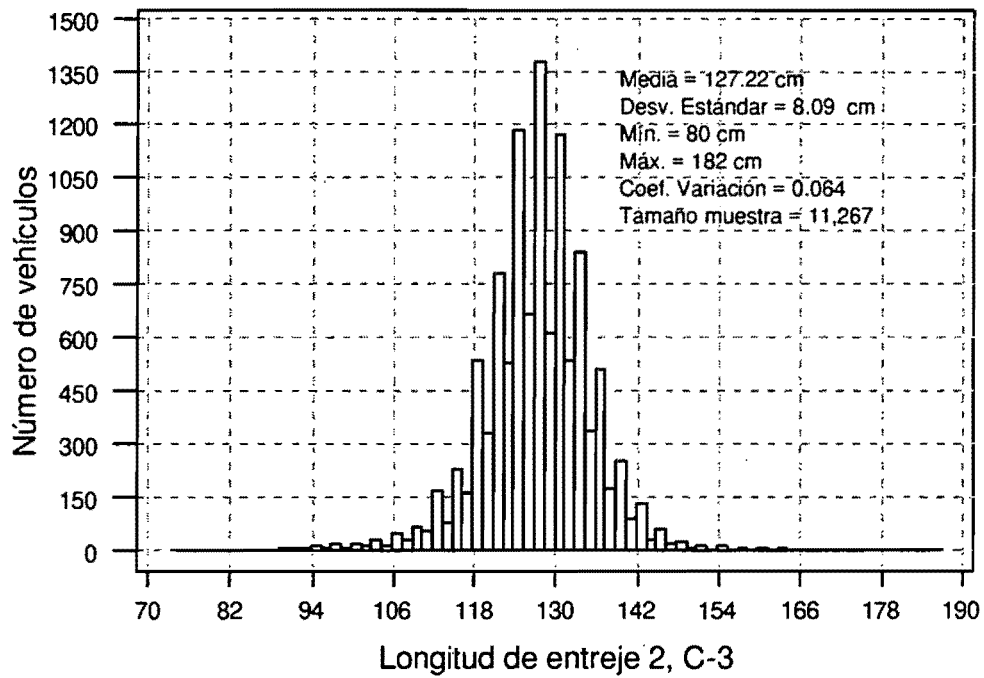


Figura 7.40 Longitud entre eje 2 en cm, vehículo C-3

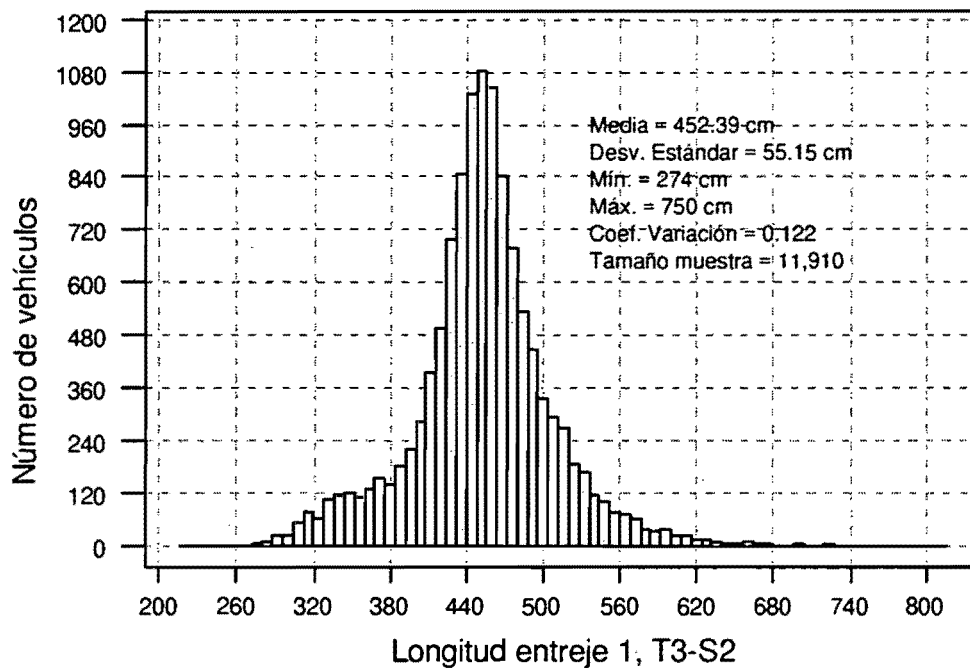


Figura 7.41 Longitud entre eje 1 en cm, vehículo T3-S2

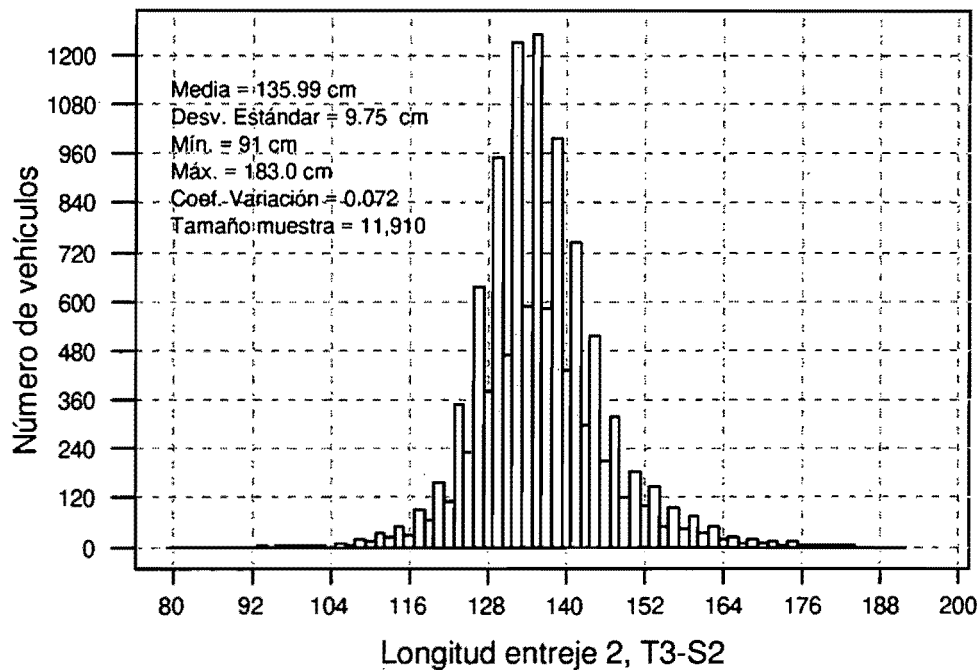


Figura 7.42 Longitud entre eje 2 en cm, vehículo T3-S2

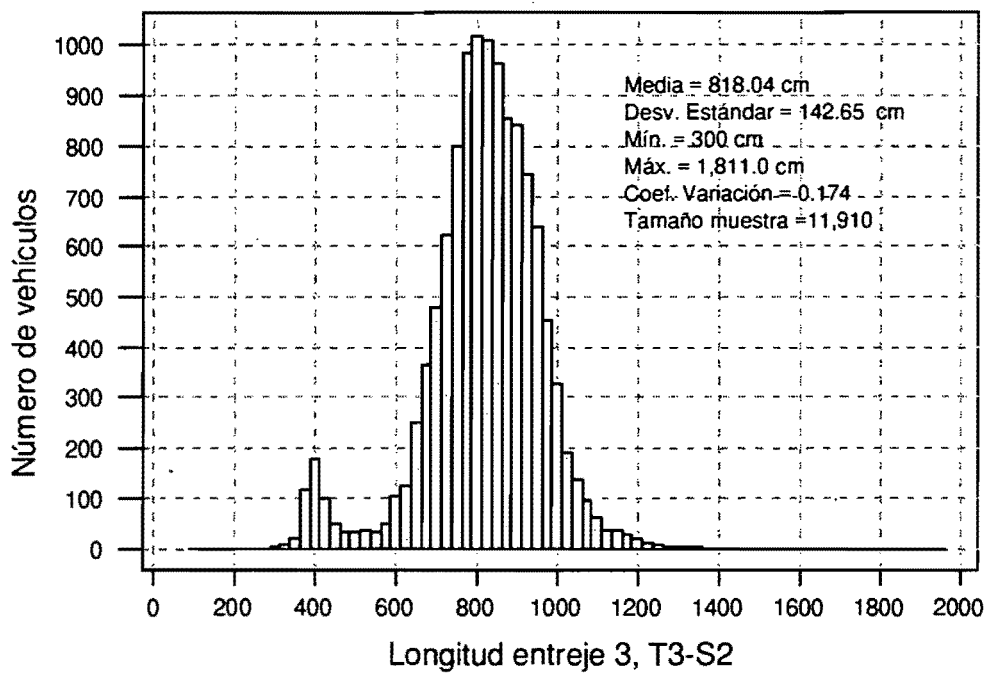


Figura 7.43 Longitud entre eje 3 en cm, vehículo T3-S2

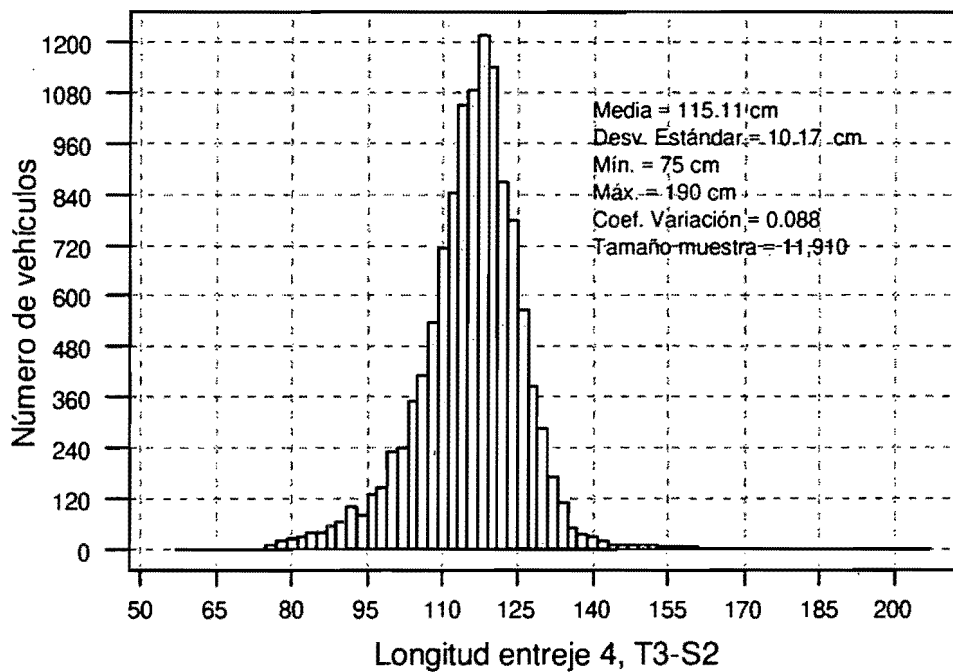


Figura 7.44 Longitud entre eje 4 en cm, vehículo T3-S2

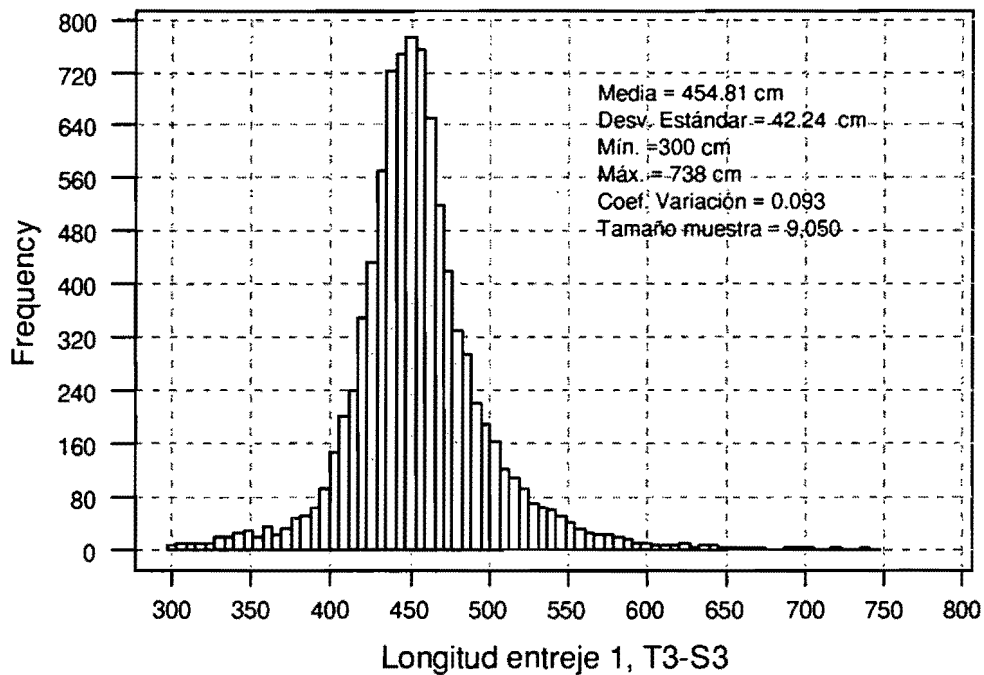


Figura 7.45 Longitud entre eje 1 en cm, vehículo T3-S3

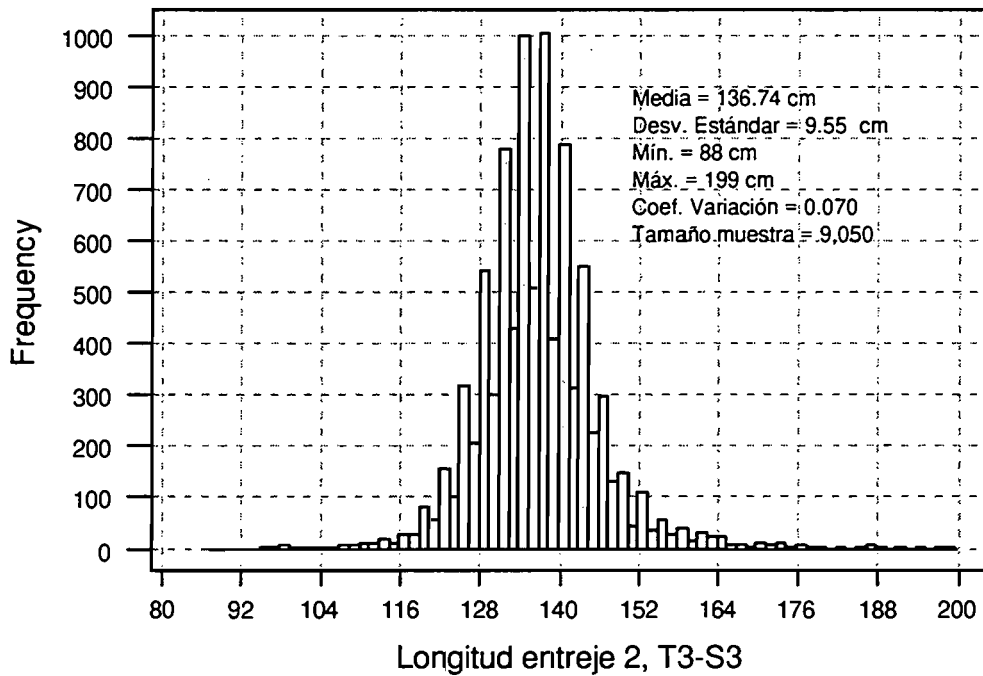


Figura 7.46 Longitud entre eje 2 en cm, vehículo T3-S3

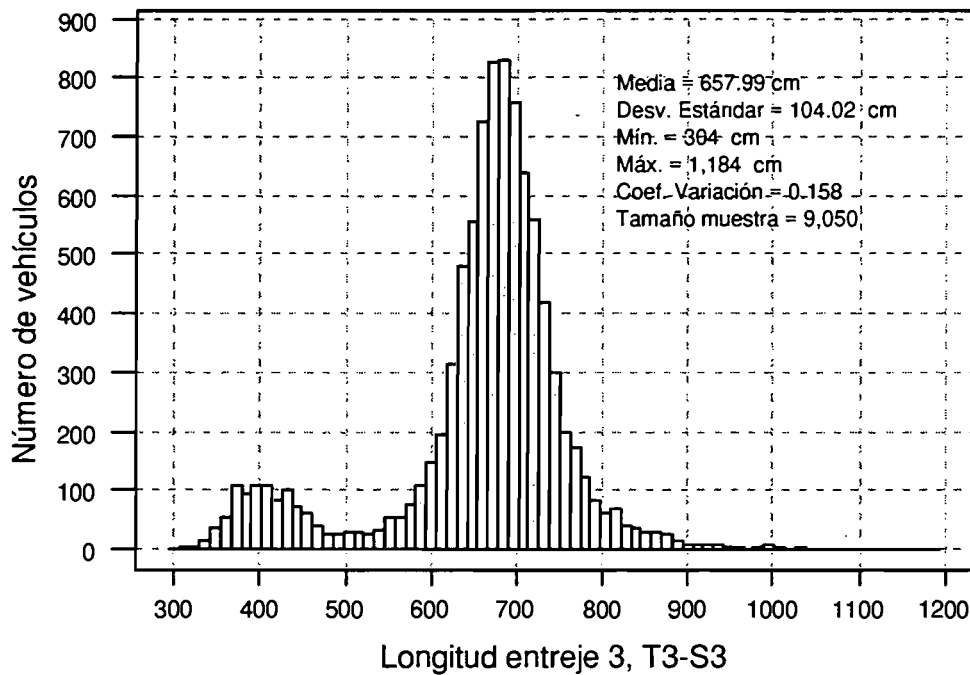


Figura 7.47 Longitud entre eje 3 en cm, vehículo T3-S3

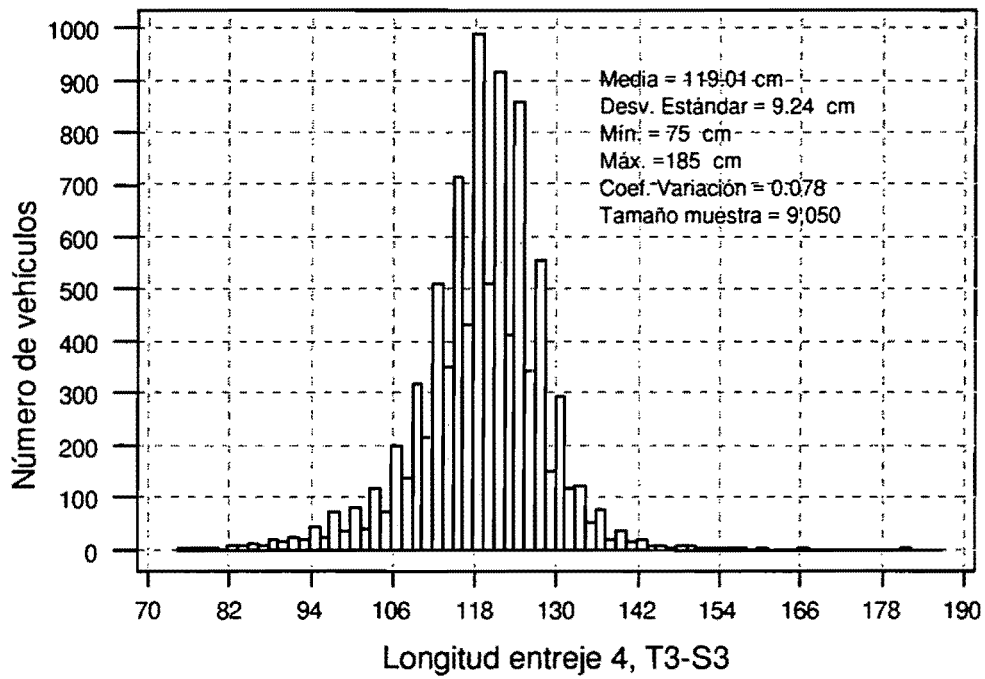


Figura 7.48 Longitud entre eje 4 en cm, vehículo T3-S3

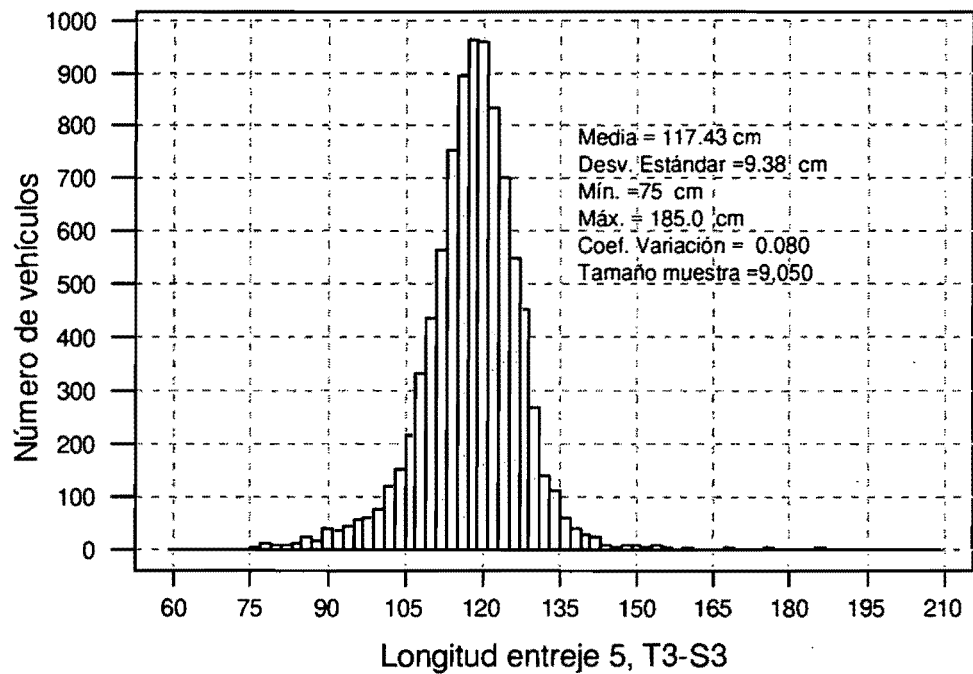


Figura 7.49 Longitud entre eje 5 en cm, vehículo T3-S3

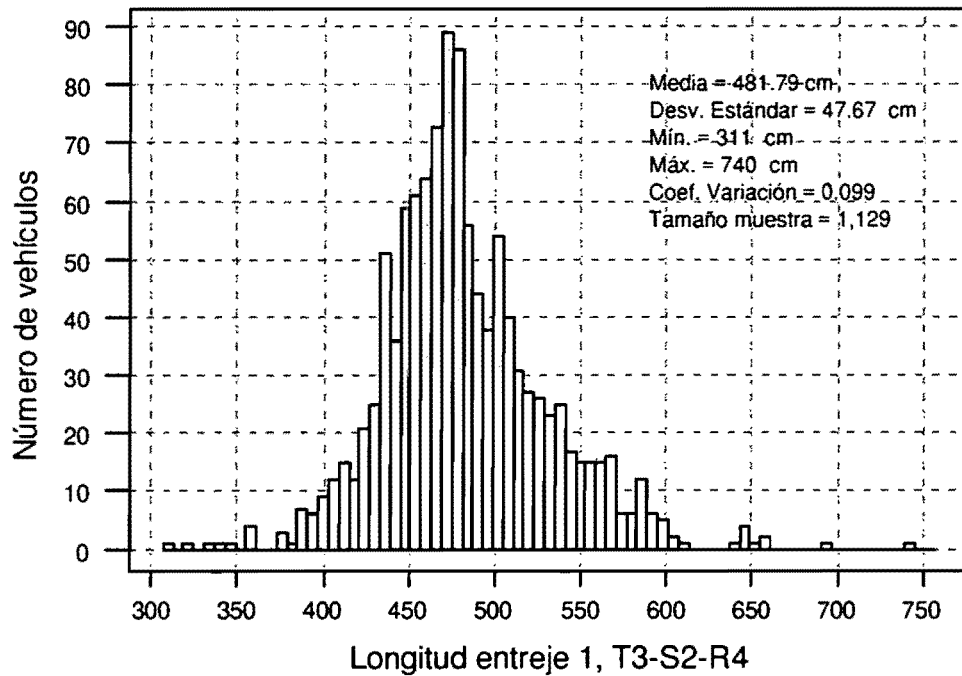


Figura 7.50 Longitud entre eje 1 en cm, vehículo T3-S2-R4

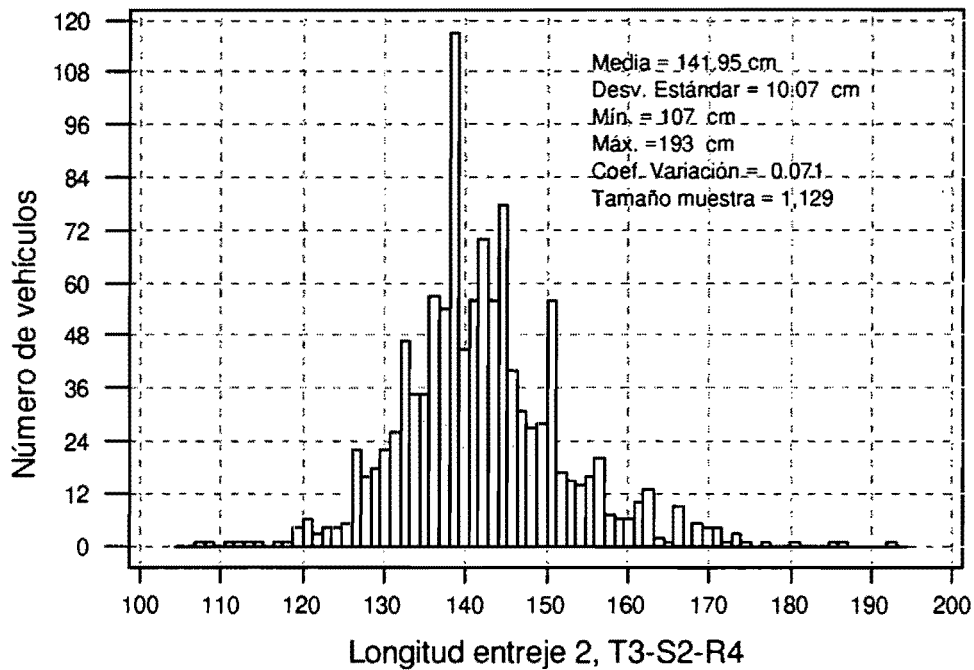


Figura 7.51 Longitud entre eje 2 en cm, vehículo T3-S2-R4

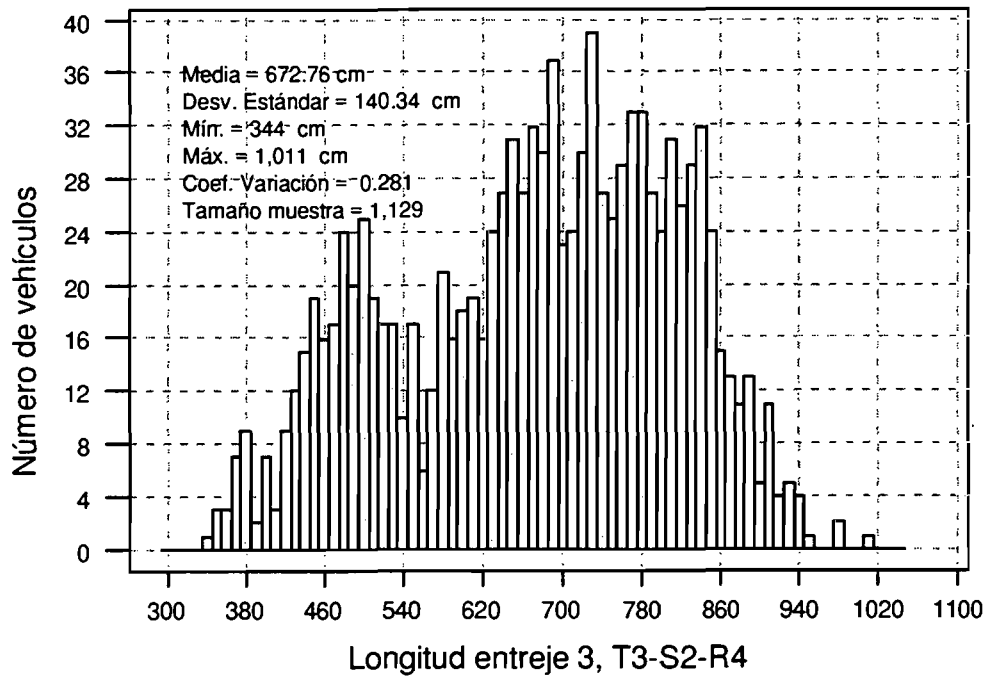


Figura 7.52 Longitud entre eje 3 en cm, vehículo T3-S2-R4

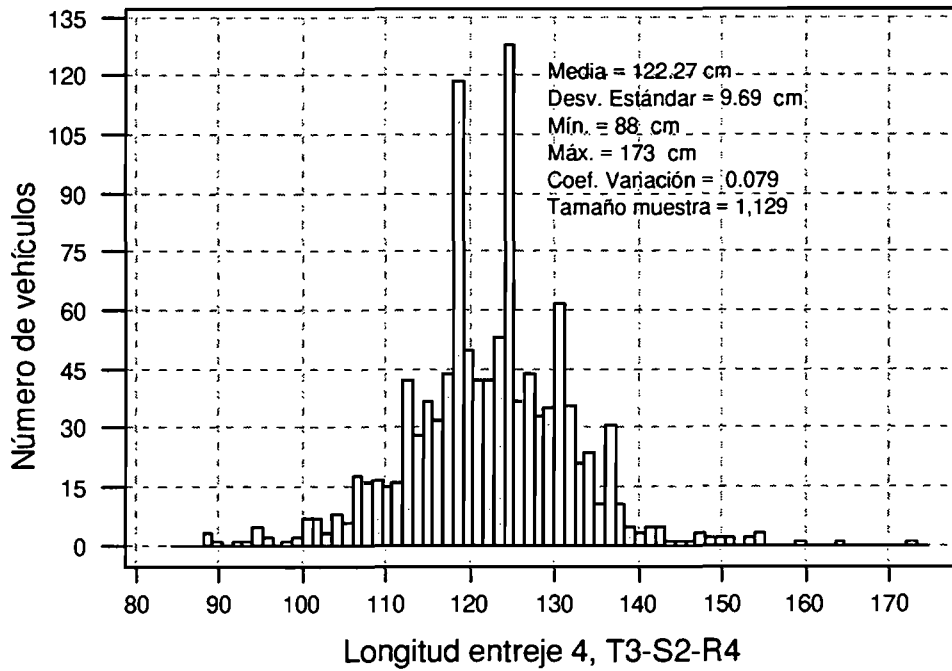


Figura 7.53 Longitud entre eje 4 en cm, vehículo T3-S2-R4

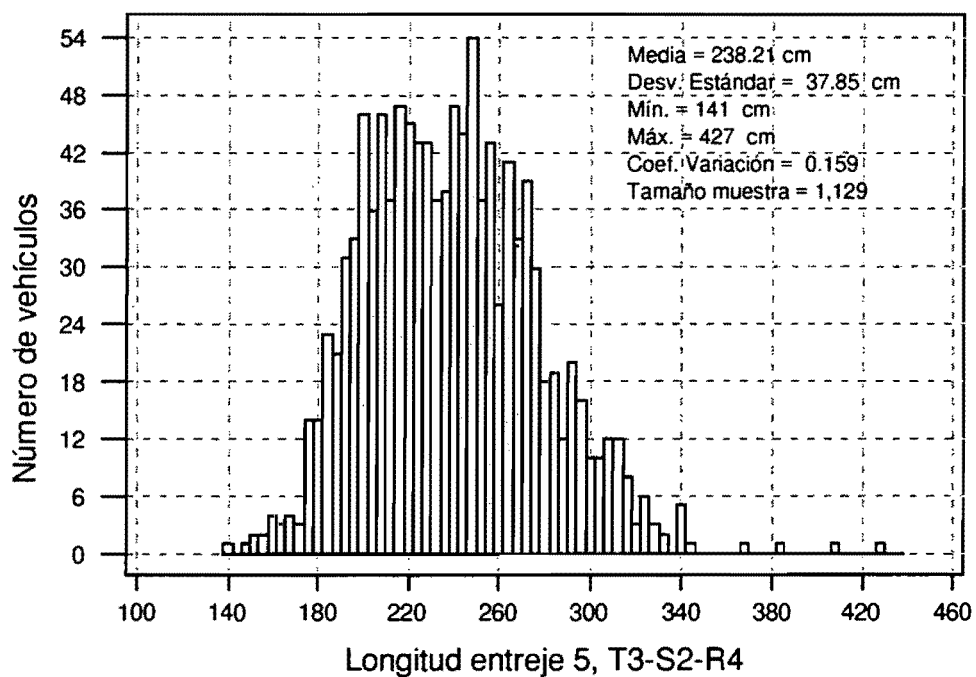


Figura 7.54 Longitud entre eje 5 en cm, vehículo T3-S2-R4

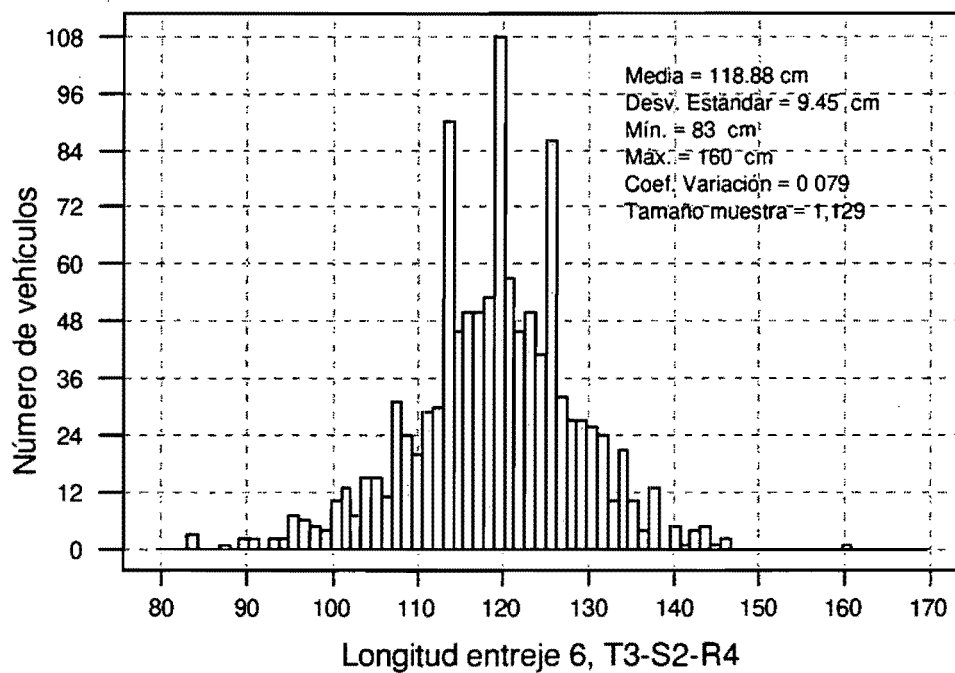


Figura 7.55 Longitud entre eje 6 en cm, vehículo T3-S2-R4

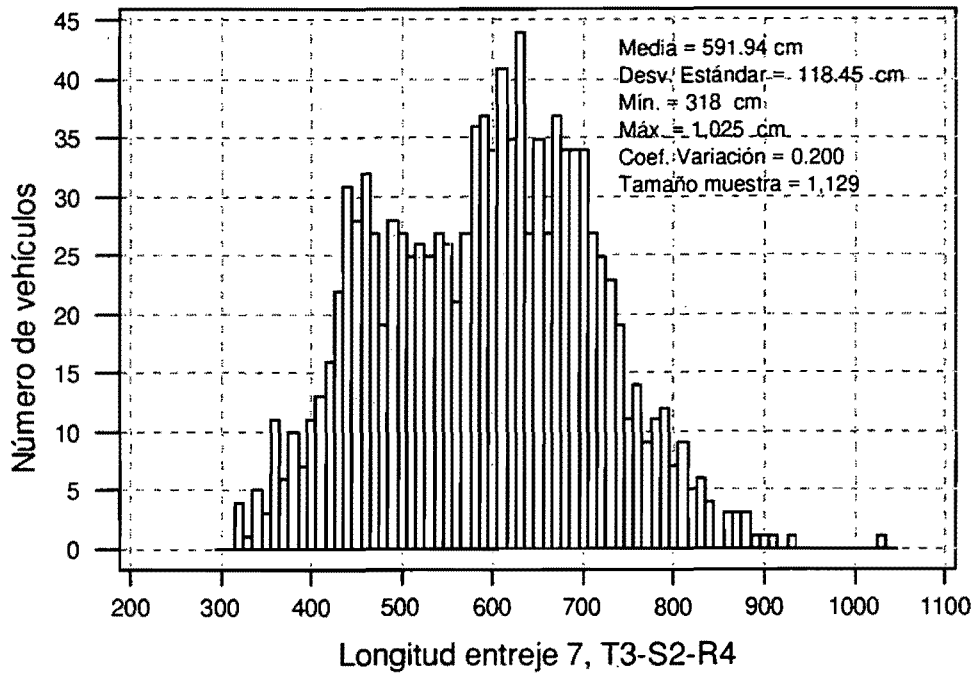


Figura 7.56 Longitud entre eje 7 en cm, vehículo T3-S2-R4

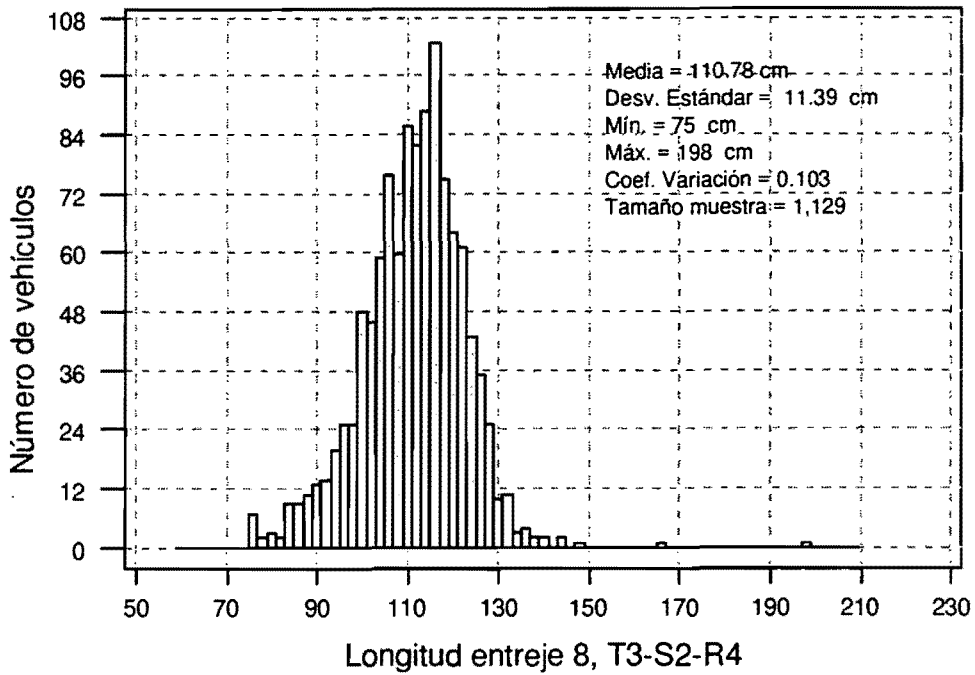


Figura 7.57 Longitud entre eje 8 en cm, vehículo T3-S2-R4

8. ANALISIS DE ELEMENTOS MECANICOS

8.1 Momentos y cortantes máximos

Para tres claros de puentes simplemente apoyados; 15, 30 y 45 m, se calculó el momento y cortante máximo correspondientes a los 70,267 vehículos considerados en el análisis estadístico.

El algoritmo para el cálculo de momentos y cortantes se describe a continuación.

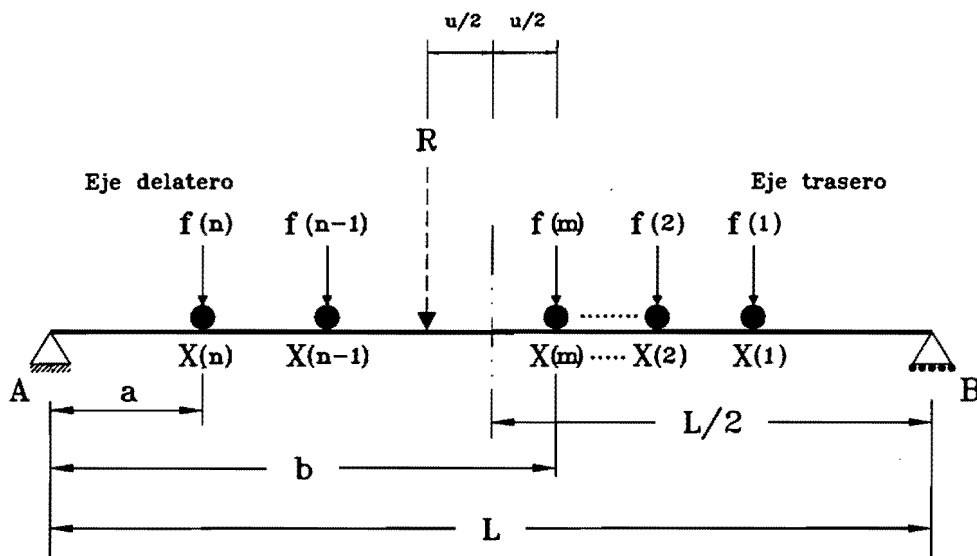


Figura 8.1 Viga simplemente apoyada con cargas móviles

El significado de las variables mostradas en la figura 8.1 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 8.1, el eje trasero es la llanta "1", y así sucesivamente, hasta la enésima 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 base 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:

$$\frac{R(L - b + u)b}{L} - \text{mom. de las llantas 1 a m-1, con respecto a la llanta m} \quad (8.1)$$

Nótese que los momentos relativos a la llanta "m" (segundo miembro de la ecuación 8.1) 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 8.1 con respecto a b, se iguala a cero y se despeja la variable b, el resultado se presenta en la ecuación 8.2 y 8.3.

$$L - 2b + u = 0 \quad (8.2)$$

$$b = \frac{L}{2} + \frac{u}{2} \quad (8.3)$$

De aquí y con ayuda de la figura 8.1, 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 nos 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.

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.

El cortante máximo es más sencillo 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:

Lee datos básicos; coordenadas de los entrejes y las cargas asociadas.
 $X(i)$ y $f(i)$

Si el vehículo no cabe en el puente, el programa genera todos los posibles arreglos de ejes que queden dentro del puente.

Calcula en cuál llanta el cortante cambia de signo.

$$v(i) = \sum f(i) + v(i-1)$$
$$\text{criterio} = (0.5 \cdot R - v(i))(0.5 \cdot R - v(i))$$

Calcula la posición de la resultante R y la posición del camión.

$$xg = \sum x(i) \cdot f(i) / R$$
$$a = (l - x(m) - xg) / 2$$
$$b = a + x(m)$$

Calcula las reacciones correspondientes a la posición del momento máximo.

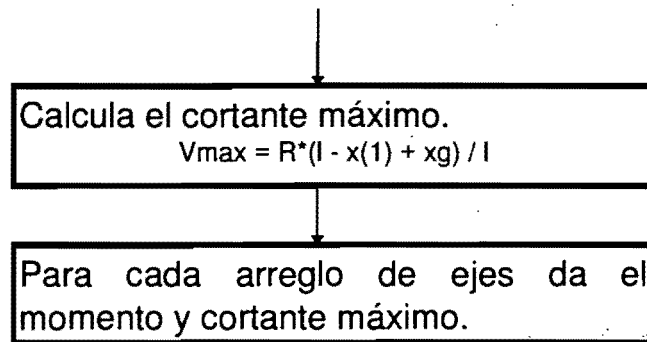
$$FA = R \cdot (xg + a) / l$$
$$FB = R - FA$$

Calcula el momento máximo.

$$m1 = \sum f(i) \cdot (x(i) - x(m))$$
$$M_{\max} = FB \cdot (l - x(1) + xg) / l - m1$$



Para cada arreglo de ejes



En las figuras 8.2 a 8.31 se muestran los histogramas de los elementos mecánicos para cada tipo de vehículo y para los tres tipos de claros analizados. 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.

Un resumen de los valores medios de los momentos y, el cociente entre el momento que produce un vehículo HS-20-44 y la media del momento calculado, se presenta en la tabla 8.1. 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 se provocan son mayores.

De esto se puede concluir, que las cargas actuales, cada vez mayores, representan sobrecargas importantes no consideradas en el diseño de muchos de los puentes existentes y que, de seguir con políticas de permitir cargas mayores, se pueden provocar problemas serios, sobretodo en los puentes cortos y flexibles, donde la carga viva representa un porcentaje alto de los elementos mecánicos de diseño.

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, en puentes cortos no cabe y, además, las distancias entre ejes son mayores, por lo cual produce elementos mecánicos menores.

En la tabla 8.2 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 8.1 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) ¹	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

¹ 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 8.2 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) ¹	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

¹ 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 8.3, 8.4 y 8.5 se presentan los porcentajes de vehículos que exceden el momento y el cortante que producen los reglamentos a los que se hace referencia.

En la tabla 8.3, están 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.

La situación anterior se va agravando conforme se aumenta el claro del puente (tablas 8.4 y 8.5), 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 8.3 PORCENTAJE DE VEHICULOS EXCEDIDOS CON RESPECTO A VARIOS MODELOS 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 ¹	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

¹ 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 8.4 PORCENTAJE DE VEHICULOS EXCEDIDOS CON RESPECTO A VARIOS MODELOS DE CARGA VIVA. PUNTES 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 ¹	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

¹ 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 8.5 PORCENTAJE DE VEHICULOS EXCEDIDOS CON RESPECTO A VARIOS MODELOS DE CARGA VIVA. PUNTES 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 ¹	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

¹ 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

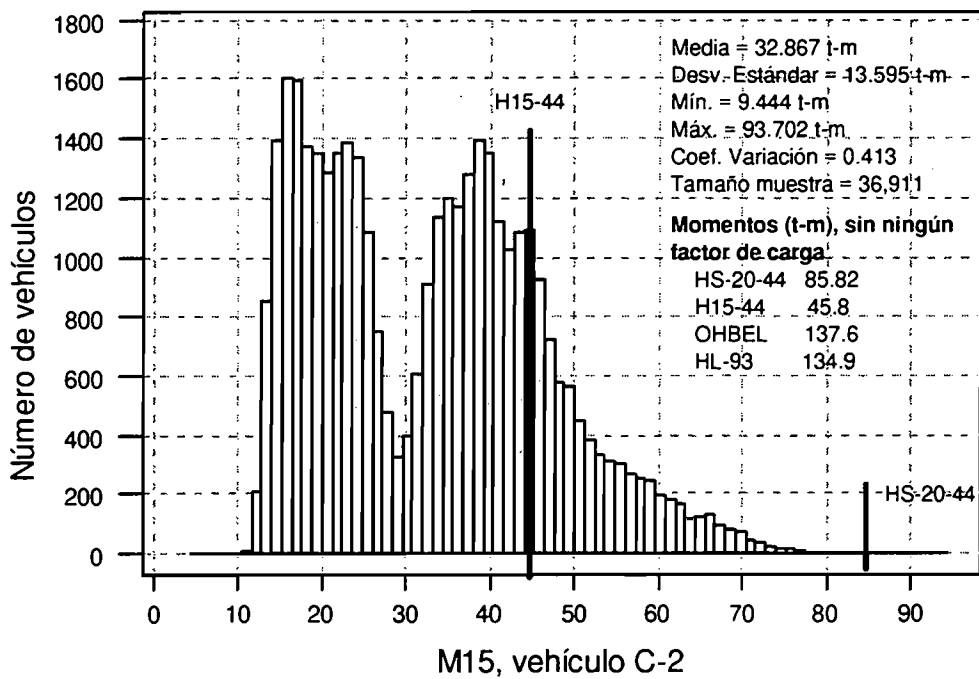


Figura 8.2 Momento longitudinal en t-m, vehículo C-2 y claro de 15 m

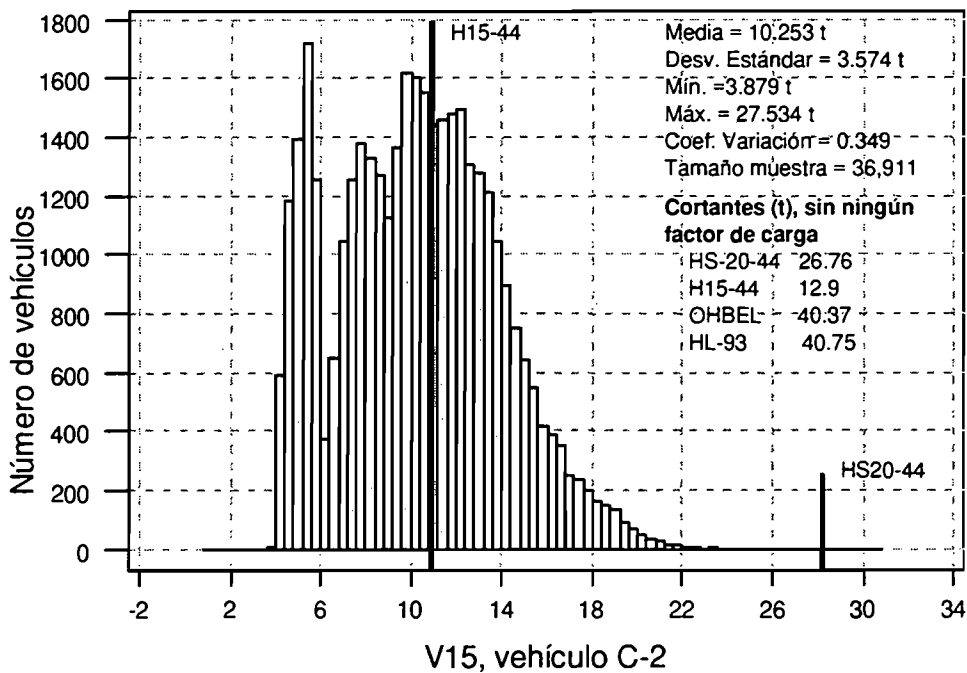


Figura 8.3 Cortante longitudinal en ton, vehículo C-2 y claro de 15 m

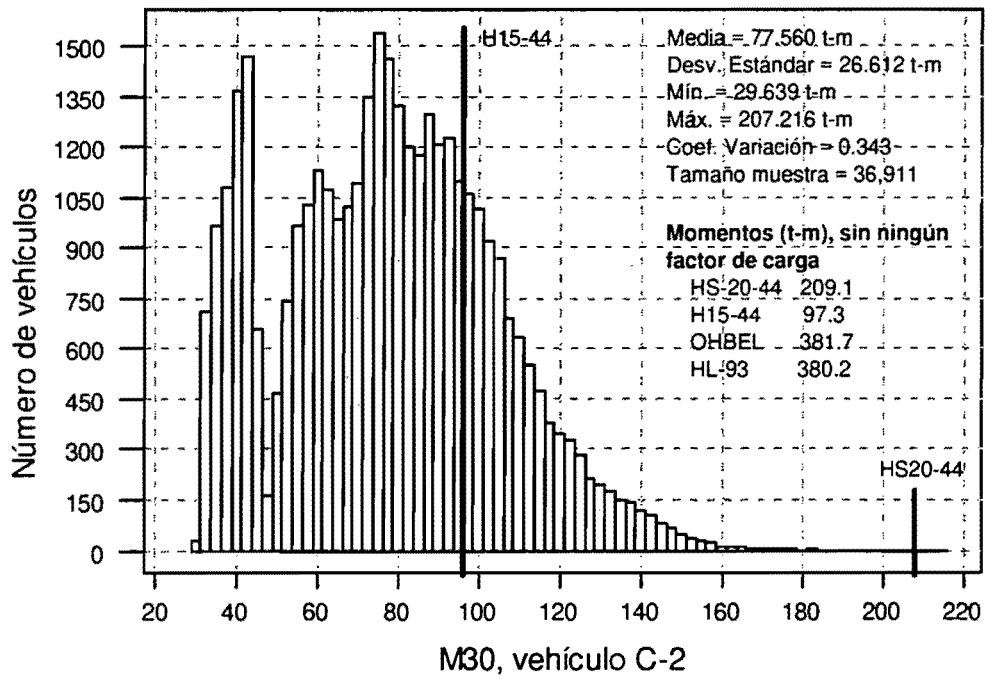


Figura 8.4 Momento longitudinal en t-m, vehículo C-2 y claro de 30 m

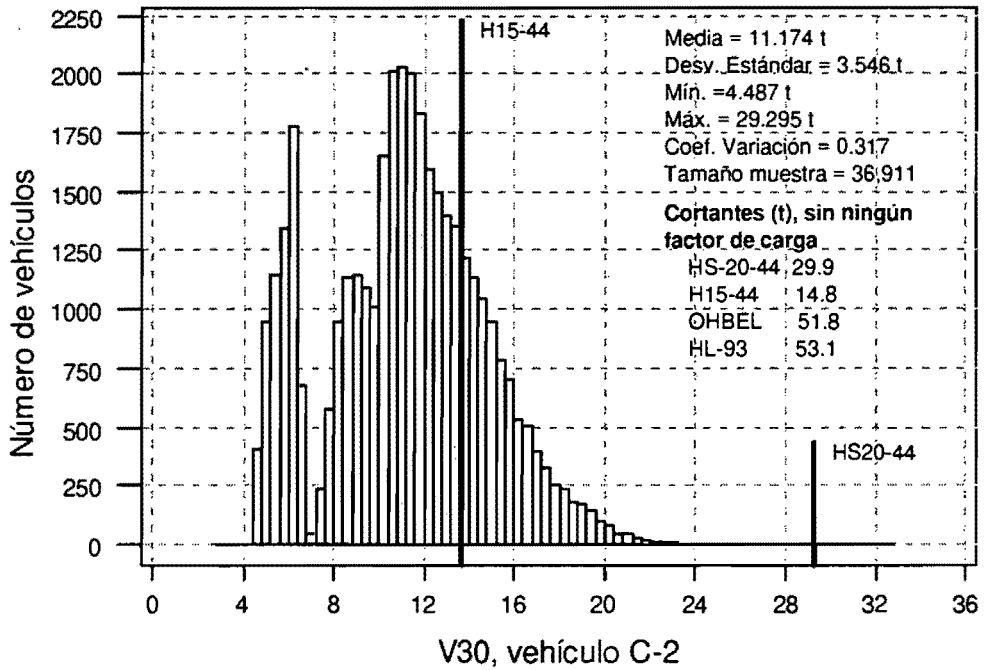


Figura 8.5 Cortante longitudinal en ton, vehículo C-2 y claro de 30 m

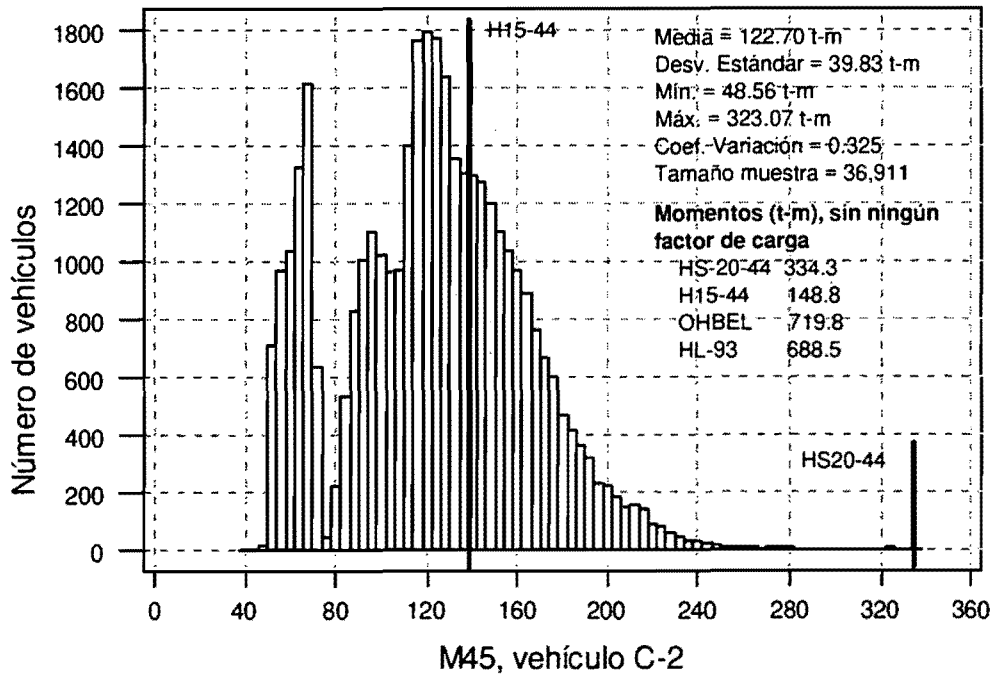


Figura 8.6 Momento longitudinal en t-m, vehículo C-2 y claro de 45 m

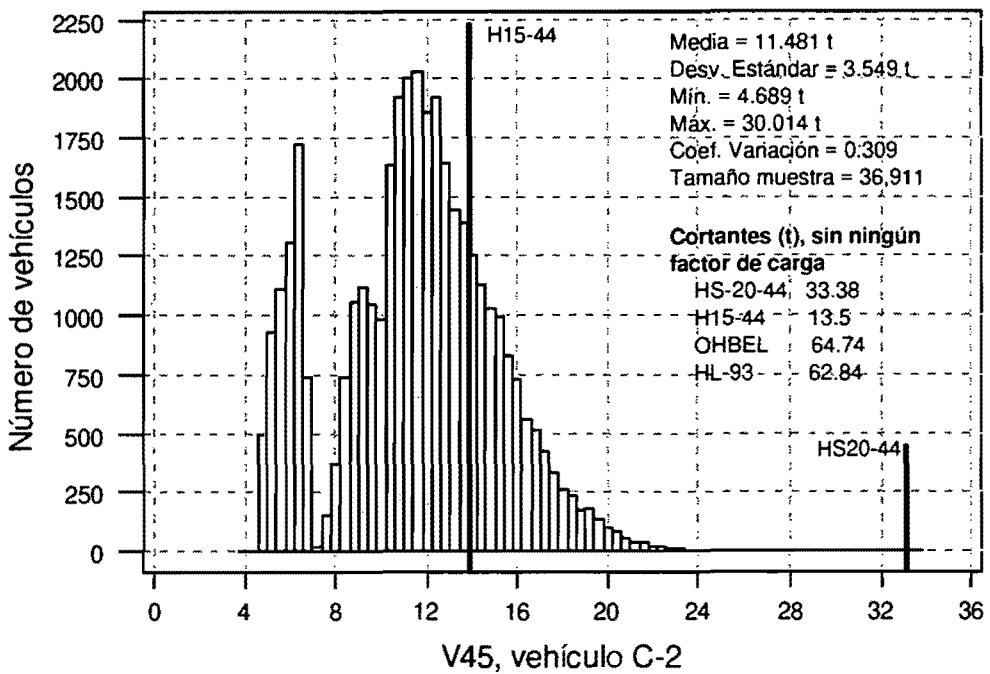


Figura 8.7 Cortante longitudinal en ton, vehículo C-2 y claro de 45 m

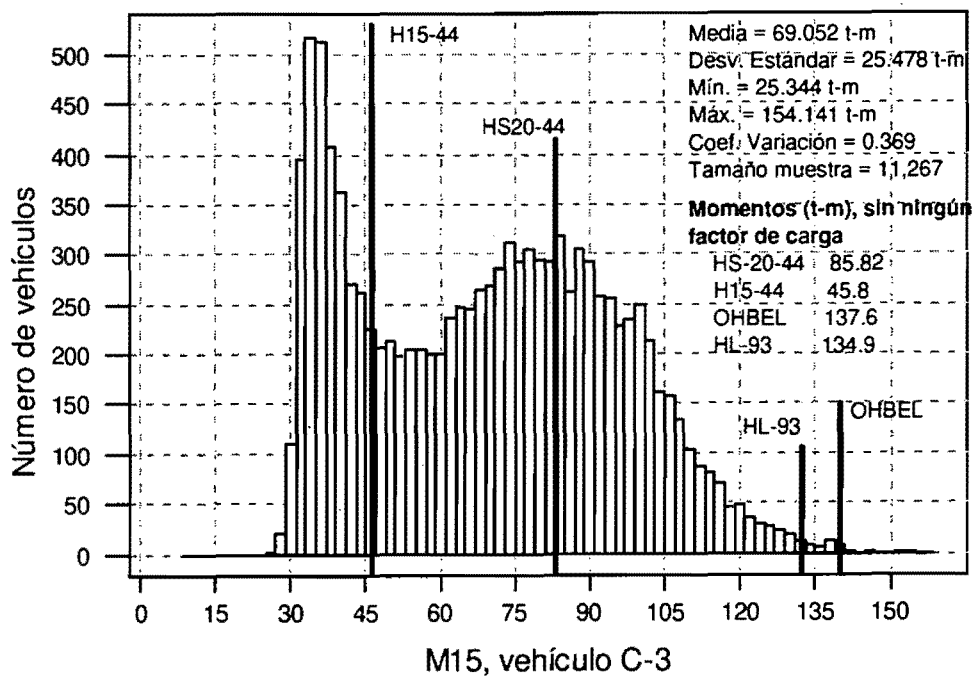


Figura 8.8 Momento longitudinal en t-m, vehículo C-3 y claro de 15 m

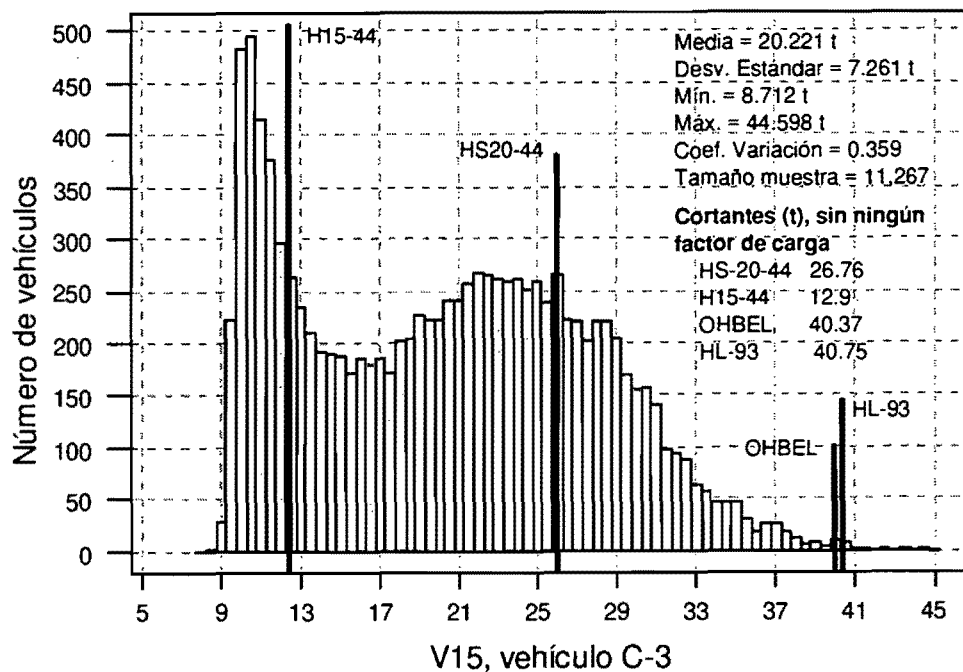


Figura 8.9 Cortante longitudinal en ton, vehículo C-3 y claro de 15 m

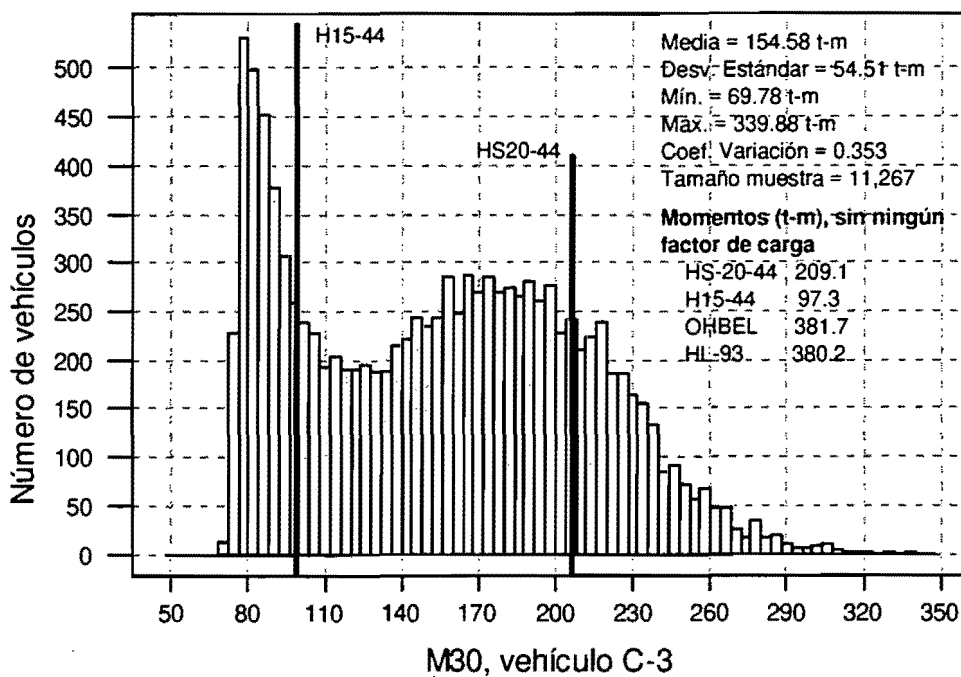


Figura 8.10 Momento longitudinal en t-m, vehículo C-3 y claro de 30 m

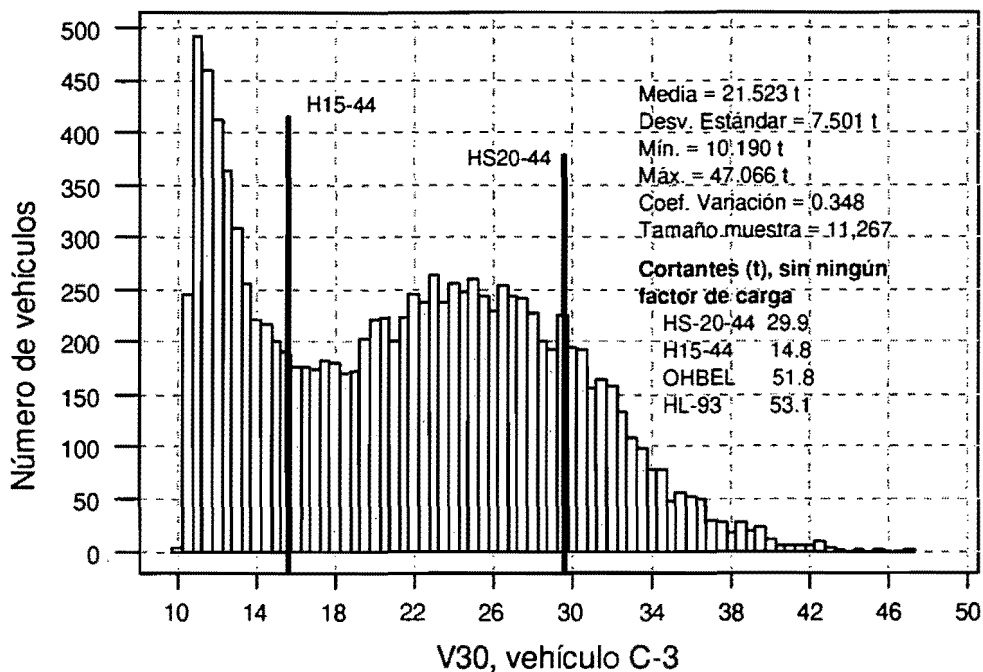


Figura 8.11 Cortante longitudinal en ton, vehículo C-3 y claro de 30 m

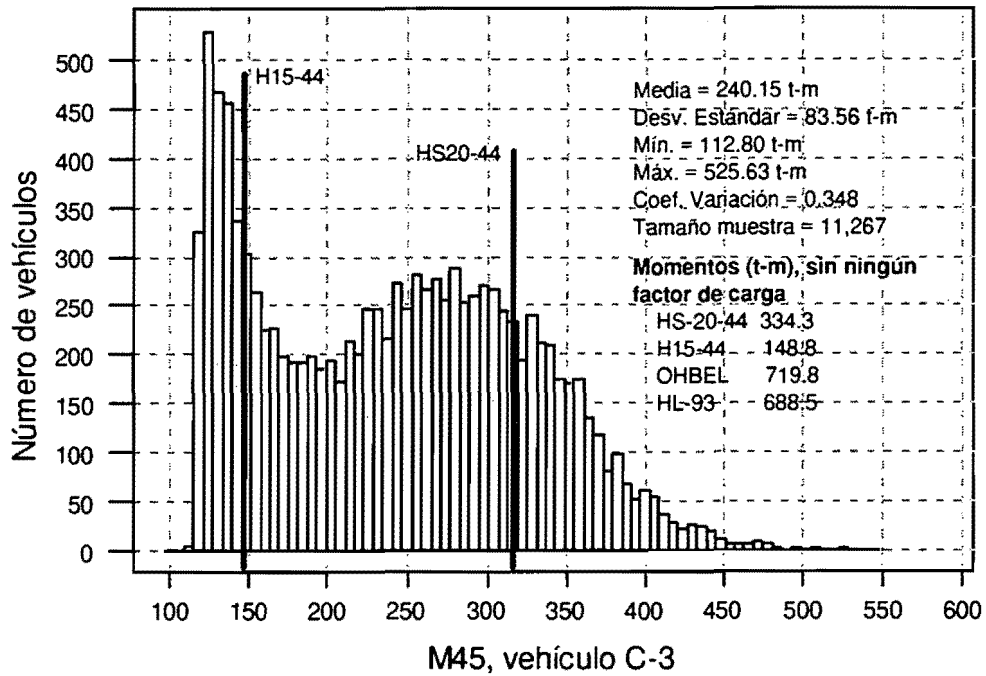


Figura 8.12 Momento longitudinal en t-m, vehículo C-3 y claro de 45 m

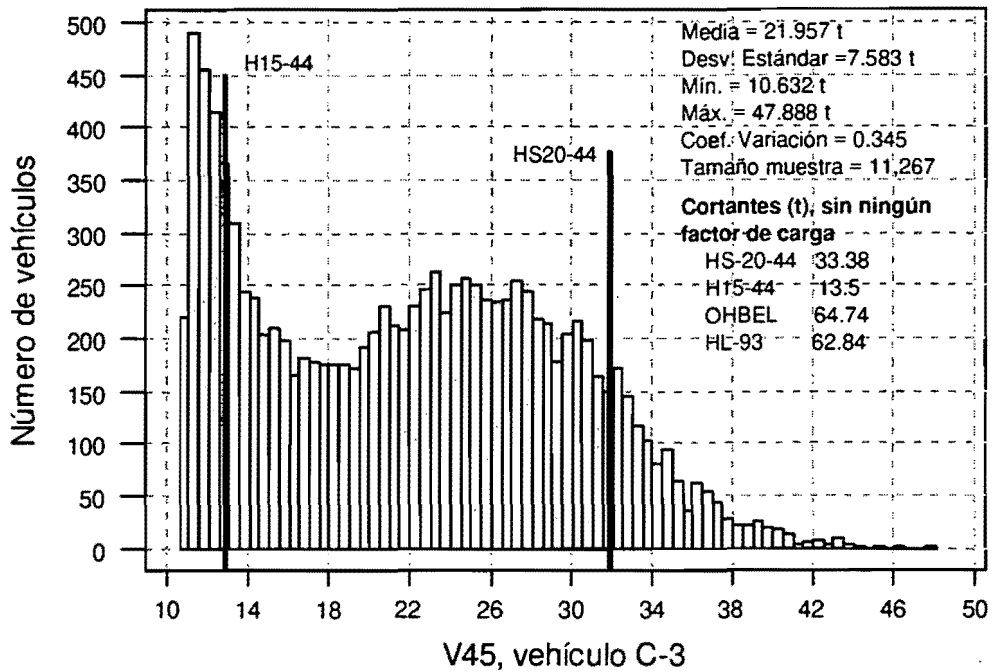


Figura 8.13 Cortante longitudinal en ton, vehículo C-3 y claro de 45 m

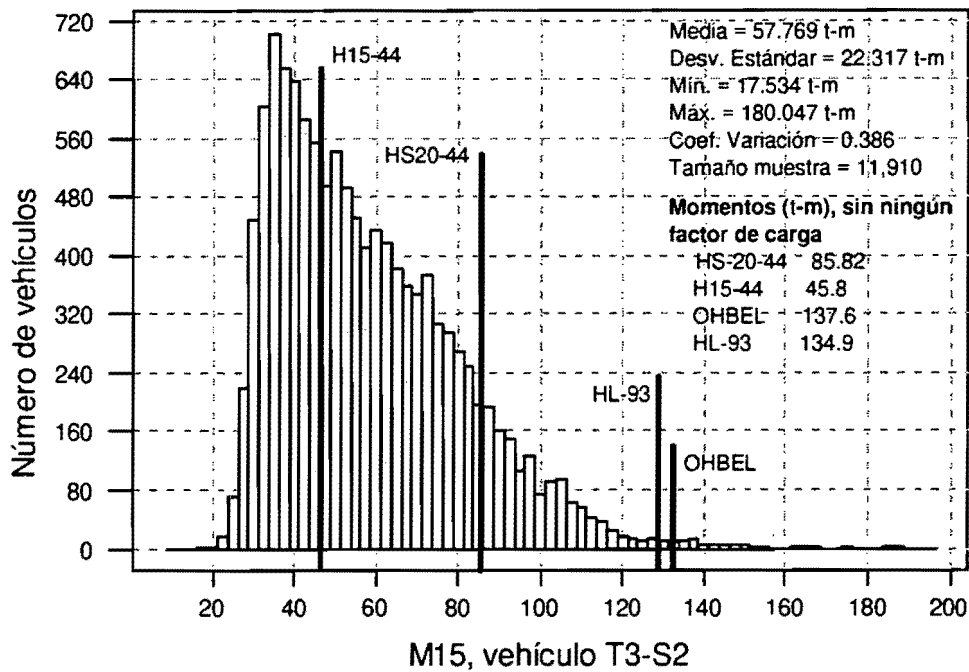


Figura 8.14 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S2 y claro de 15 m

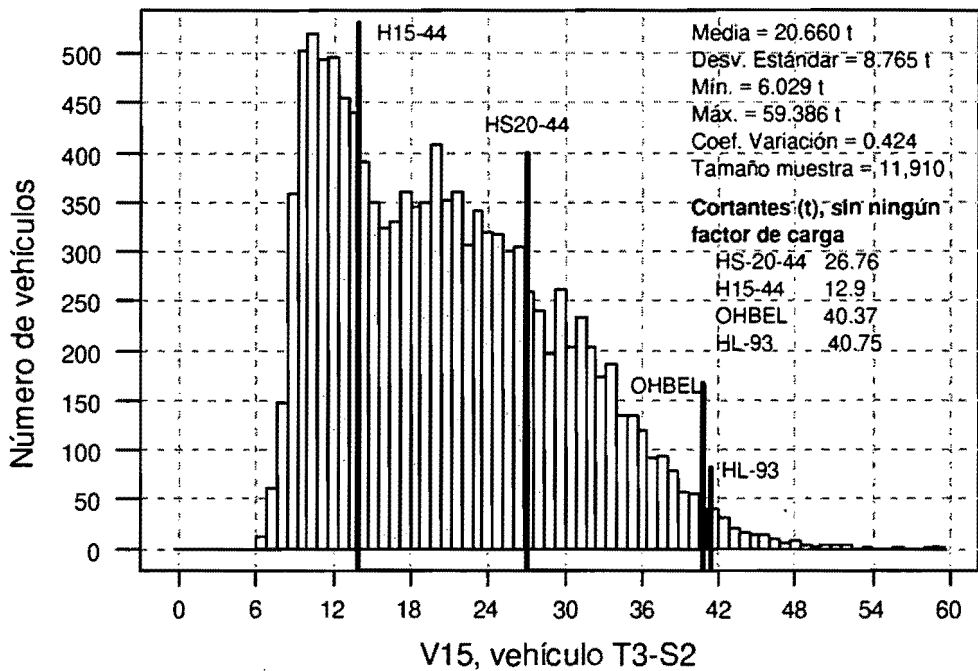


Figura 8.15 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S2 y claro de 15 m

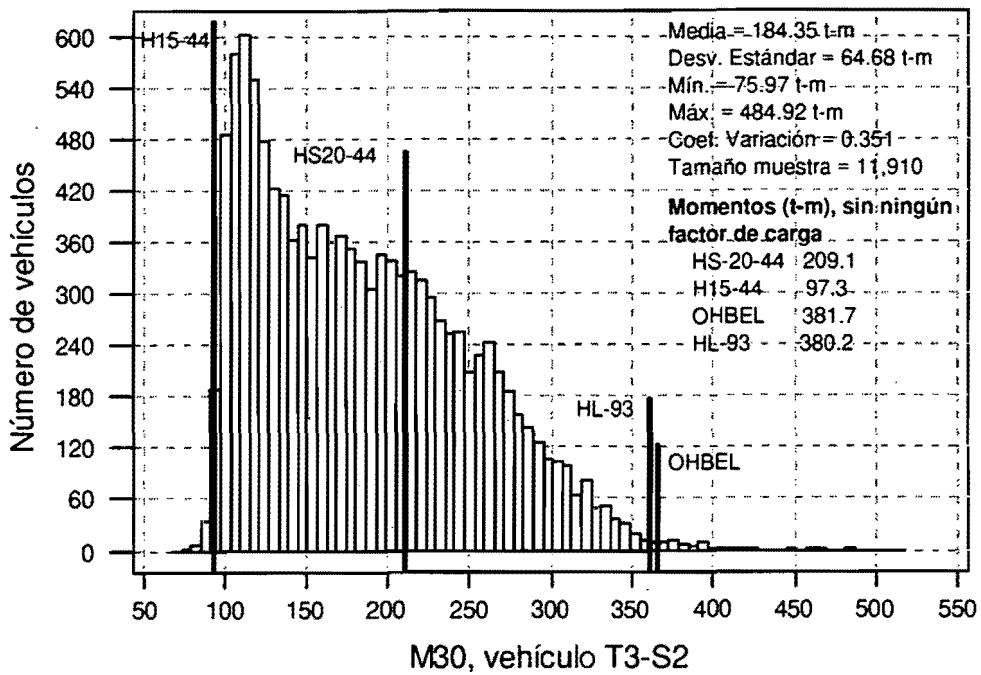


Figura 8.16 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S2 y claro de 30 m

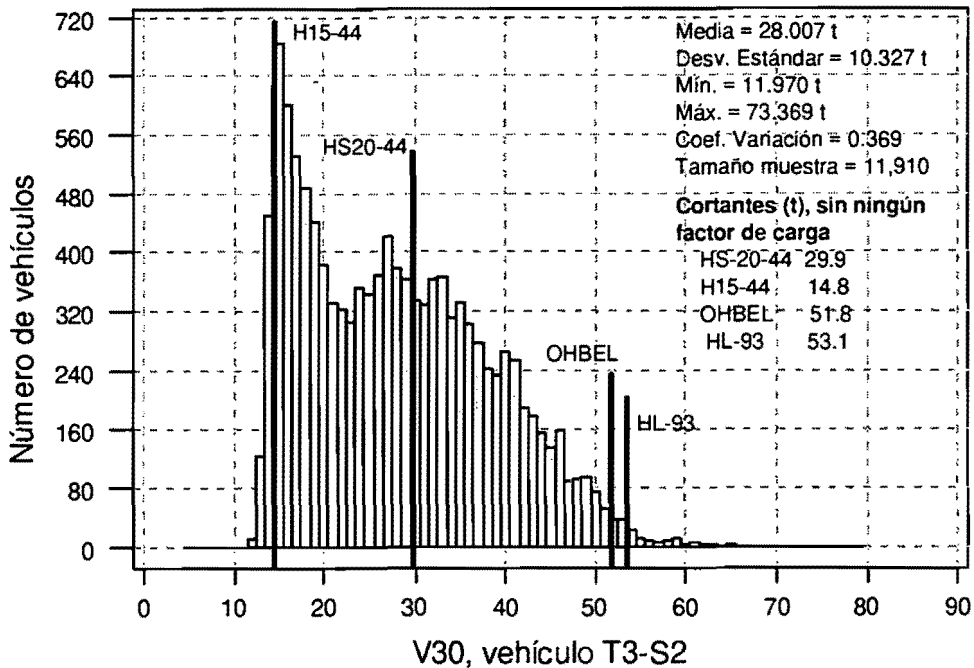


Figura 8.17 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S2 y claro de 30 m

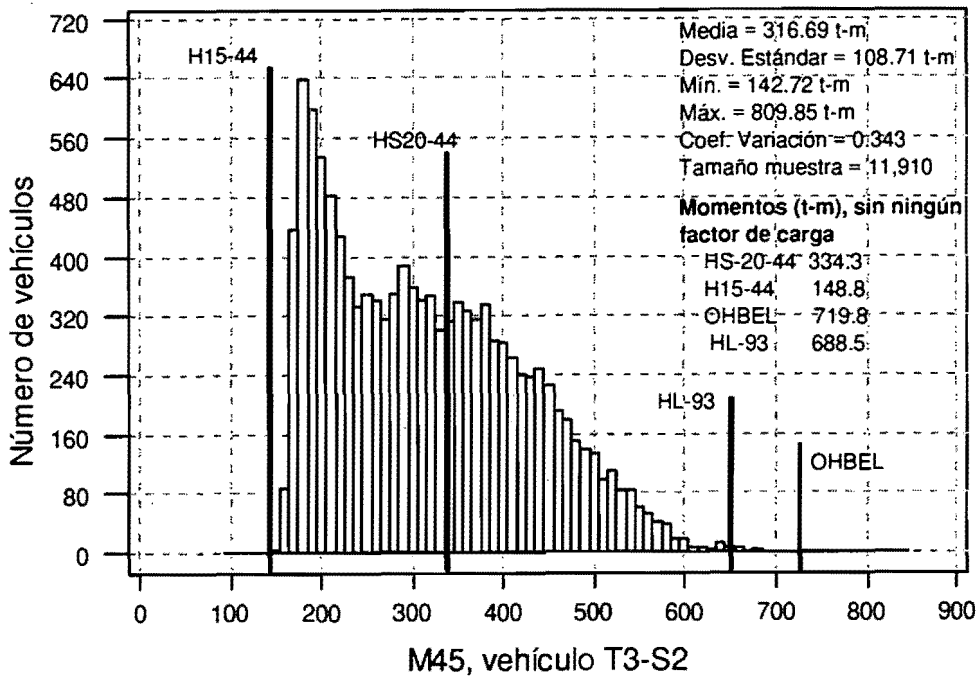


Figura 8.18 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S2 y claro de 45 m

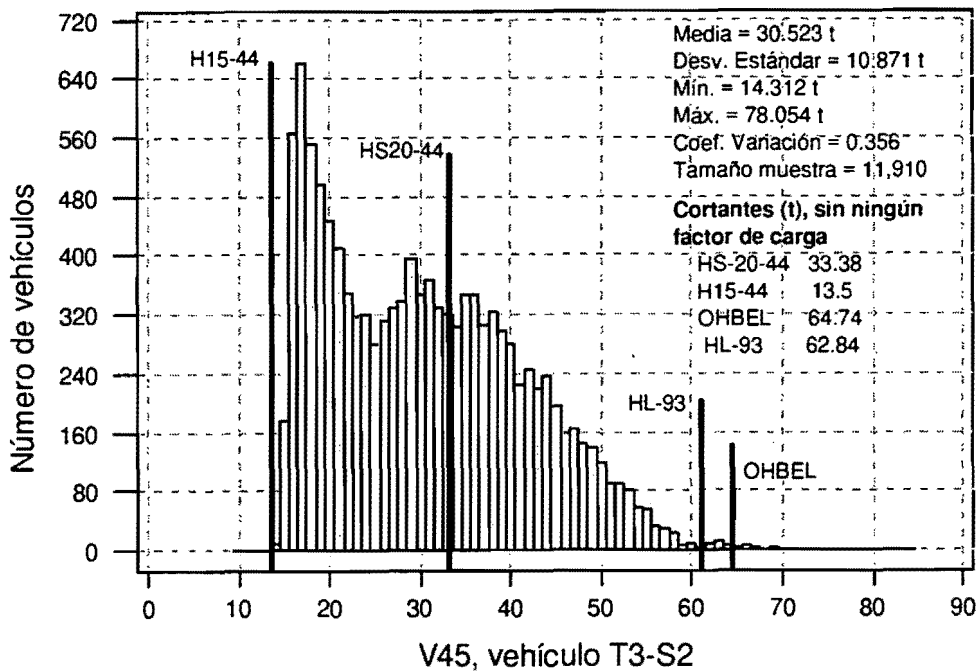


Figura 8.19 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S2 y claro de 45 m

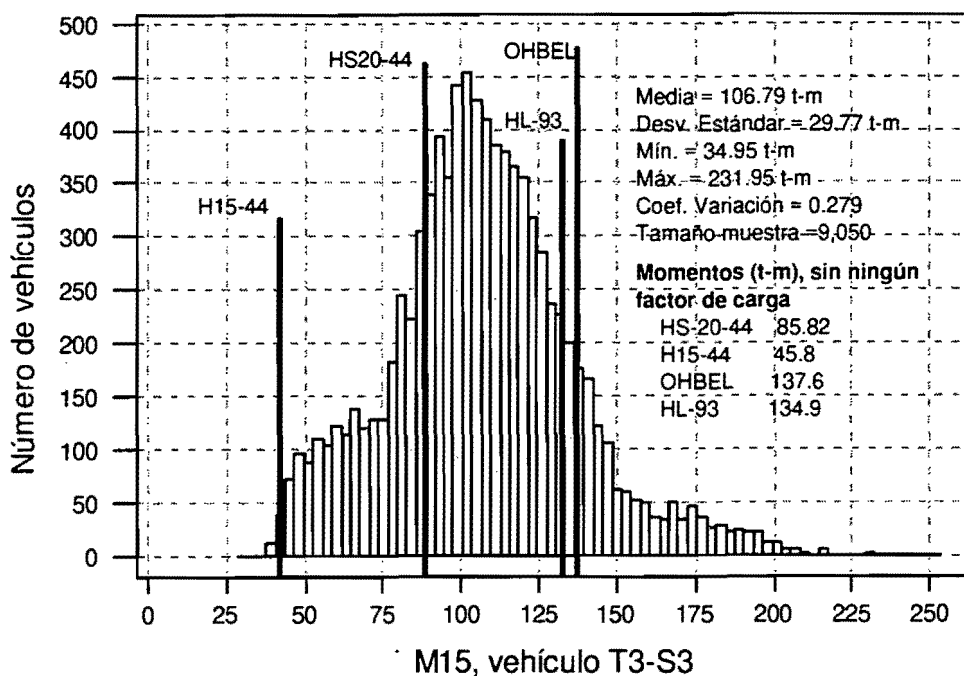


Figura 8.20 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S3 y claro de 15 m

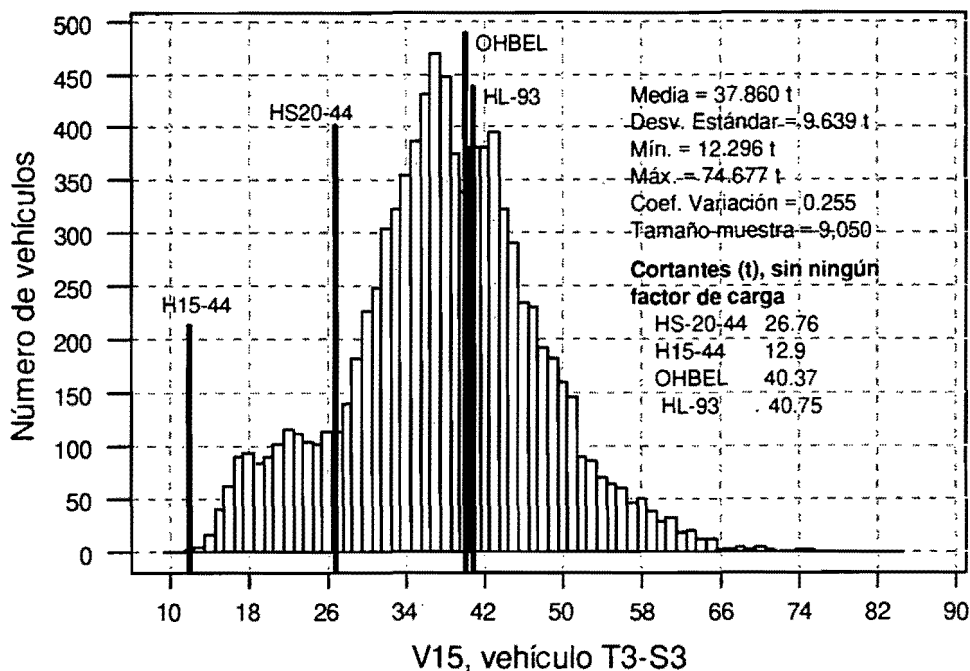


Figura 8.21 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S3 y claro de 15 m

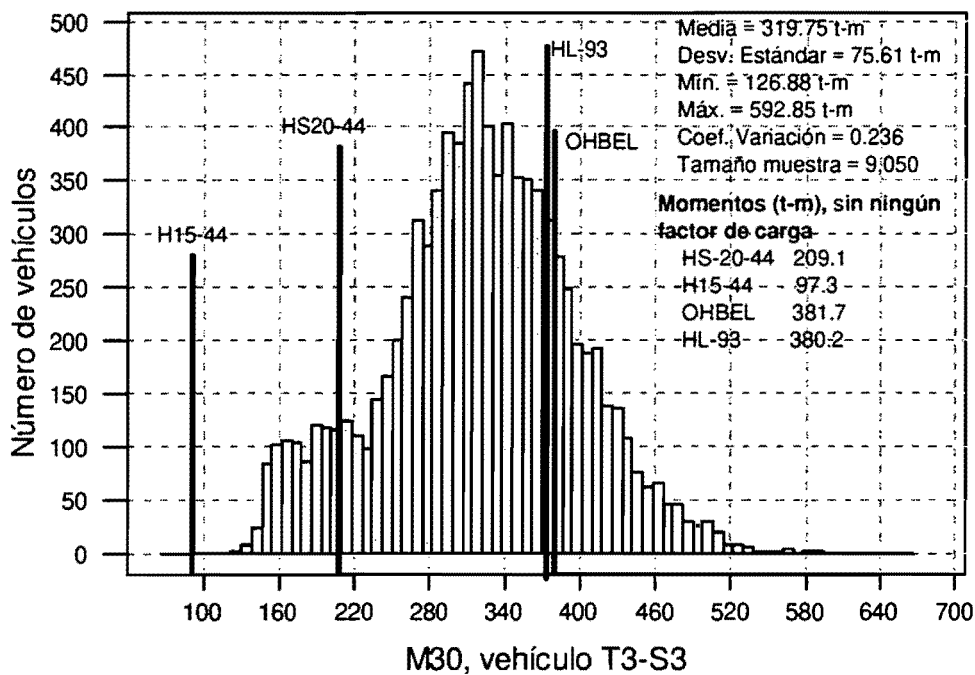


Figura 8.22 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S3 y claro de 30 m

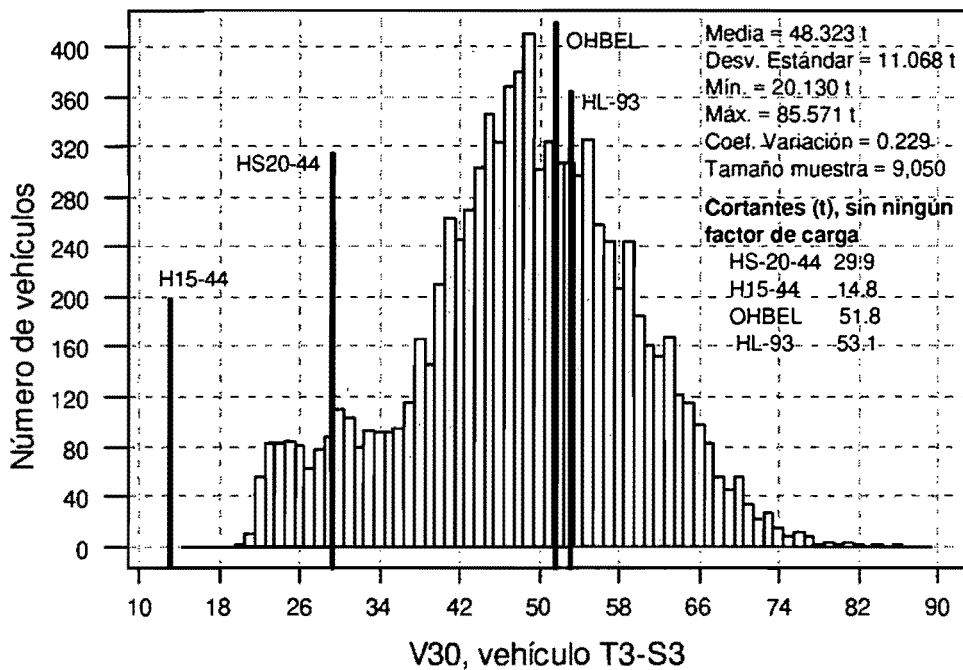


Figura 8.23 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S3 y claro de 30 m

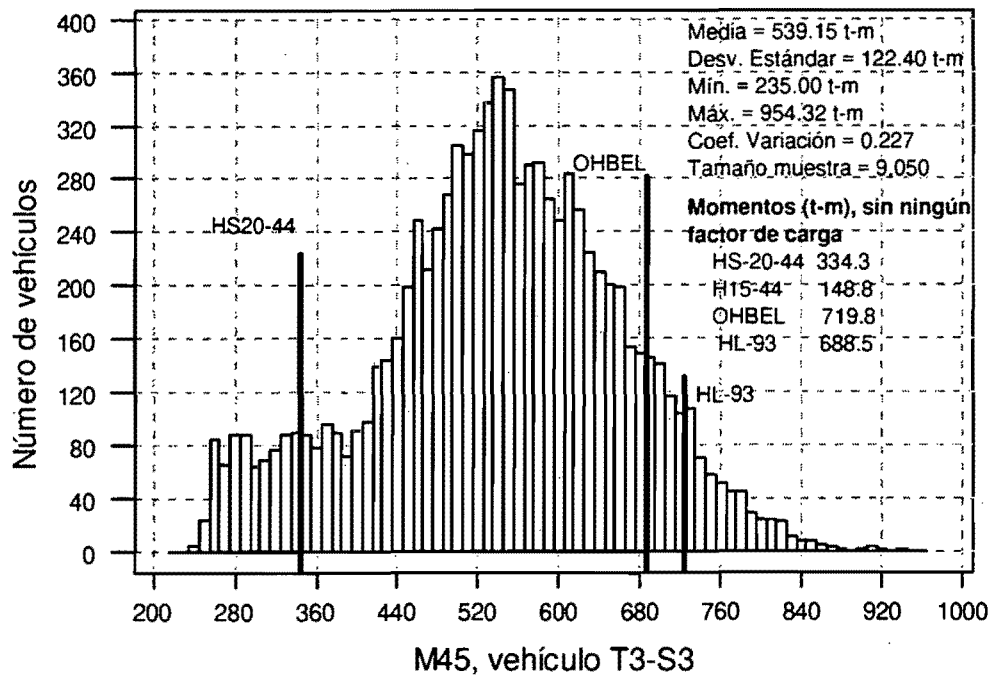


Figura 8.24 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S3 y claro de 45 m

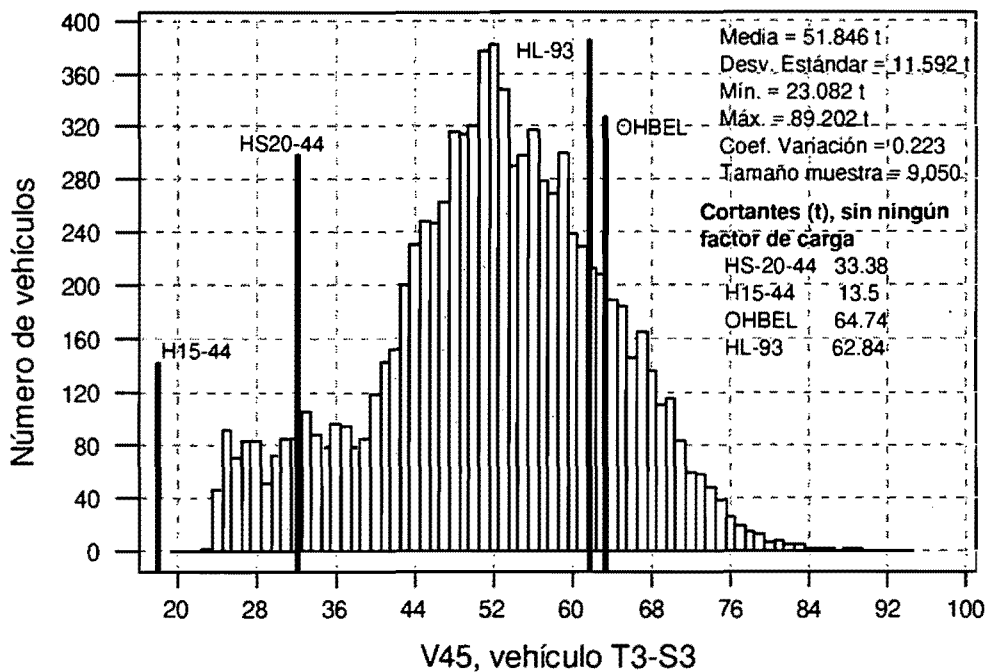


Figura 8.25 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S3 y claro de 45 m

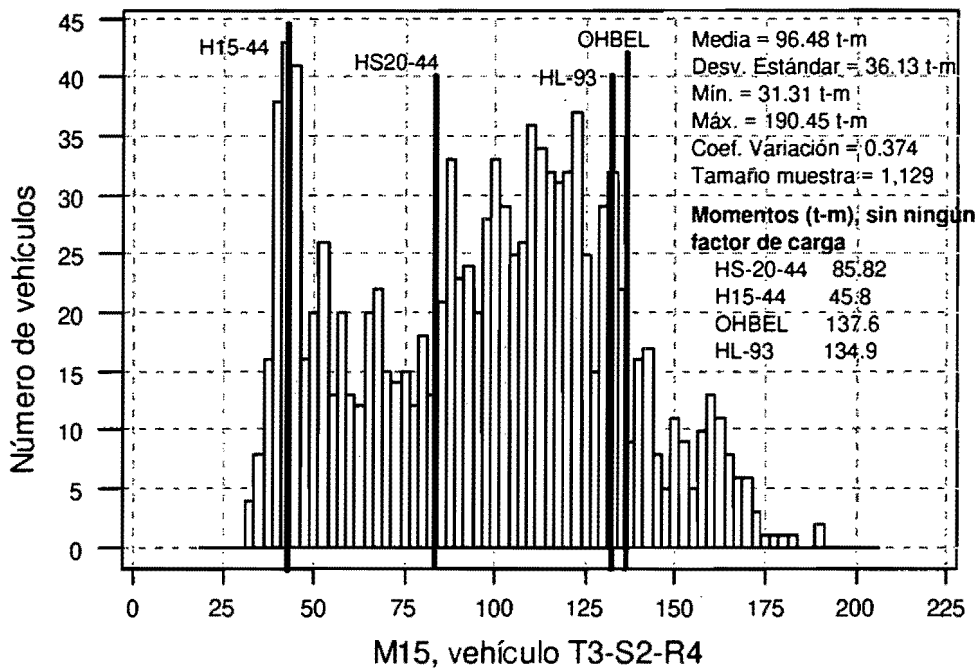


Figura 8.26 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S2-R4 y claro de 15 m

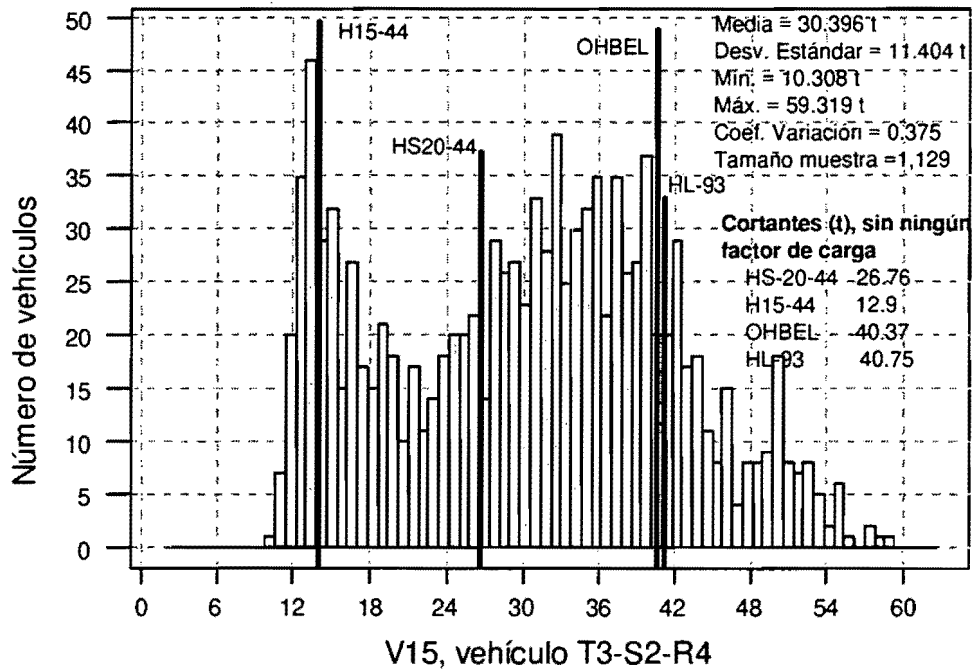


Figura 8.27 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S2-R4 y claro de 15 m

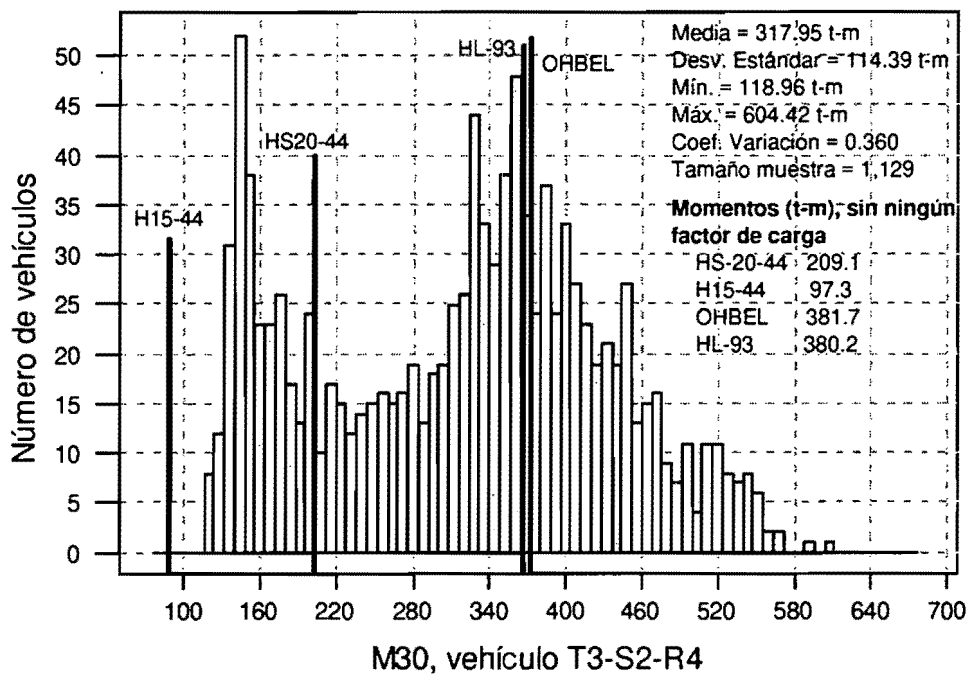


Figura 8.28 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S2-R4 y claro de 30 m

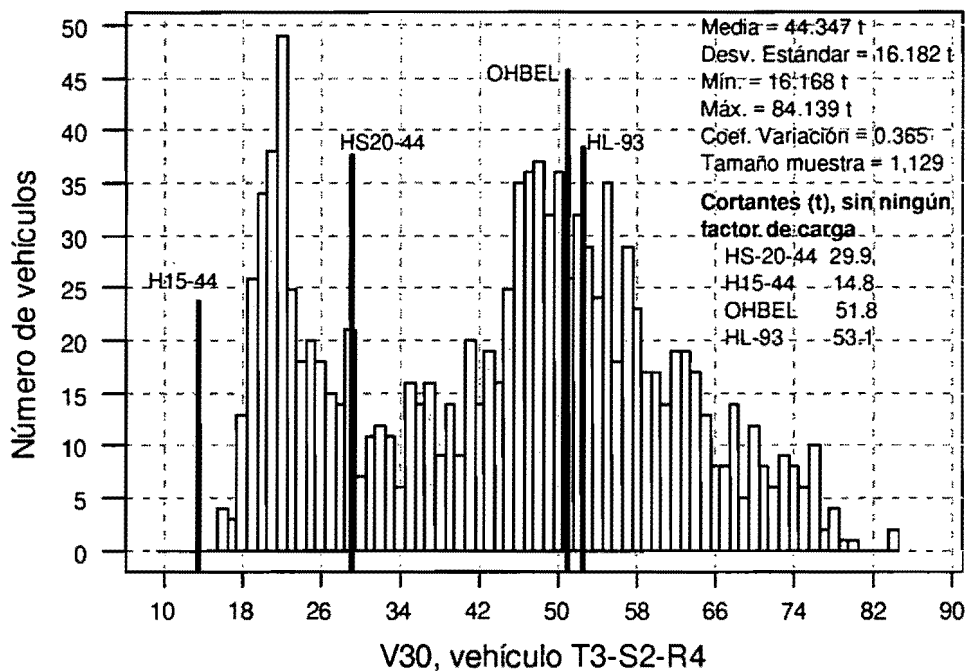


Figura 8.29 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S2-R4 y claro de 30 m

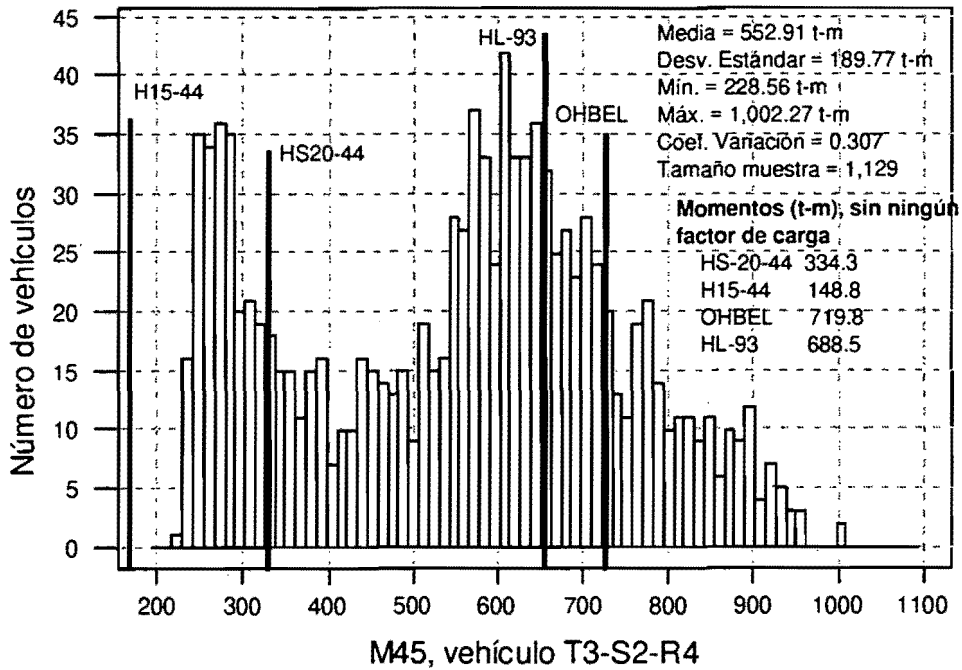


Figura 8.30 Momento longitudinal en t-m, vehículo T3-S2-R4 y claro de 45 m

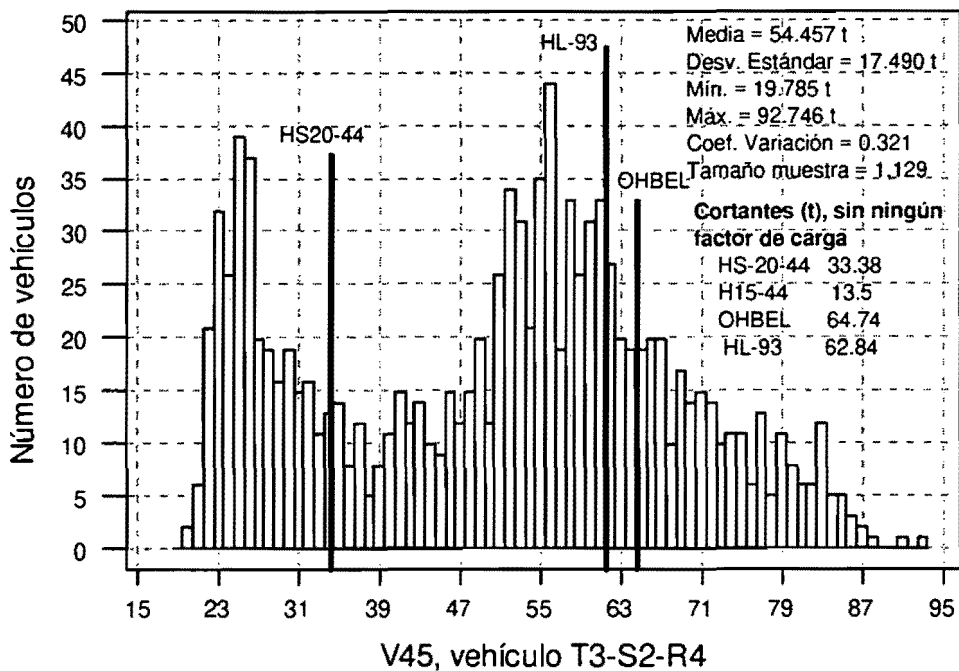


Figura 8.31 Cortante longitudinal en ton, vehículo T3-S2-R4 y claro de 45 m

8.2 Elementos mecánicos usando el Reglamento de Ontario

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

Estudiando la gráfica 8.32 se observa que de los 18 m a los 30 m tienen una tendencia lineal y después su variación se vuelve curva la gráfica; esto obedece a que en tramos chicos 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 mas pequeño que la longitud del puente, pero hasta los 30 m rigen las cargas puntuales, y después rige la combinación cargas puntuales con uniformemente distribuida.

Lo mismo sucede para los cortantes (figura 8.33), con los mismos tres intervalos, antes de los 18 m, de los 18 m a los 30 m y después de los 30 m.

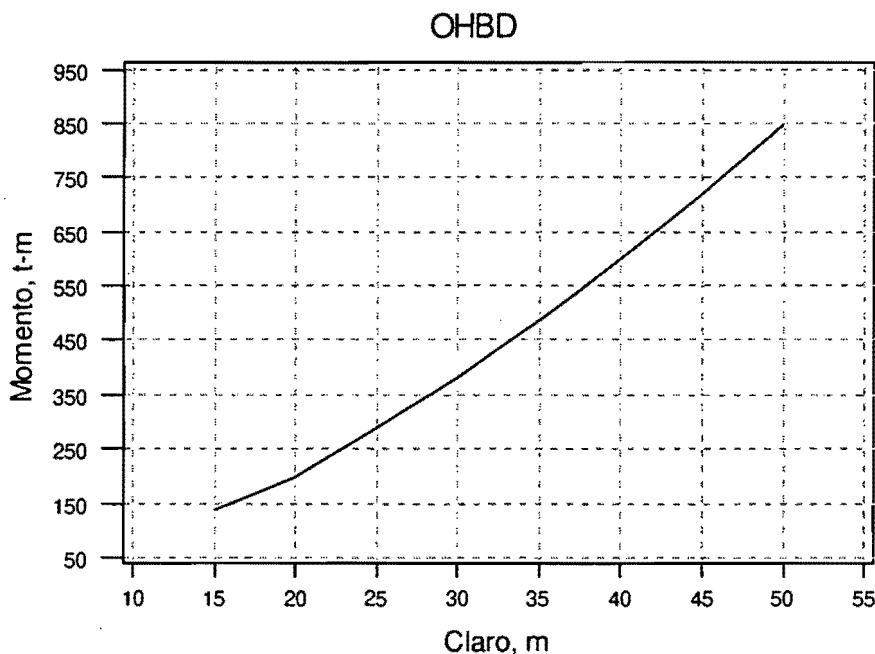


Figura 8.32 Momentos máximos, sin ningún factor de carga, de acuerdo al reglamento OHBEL

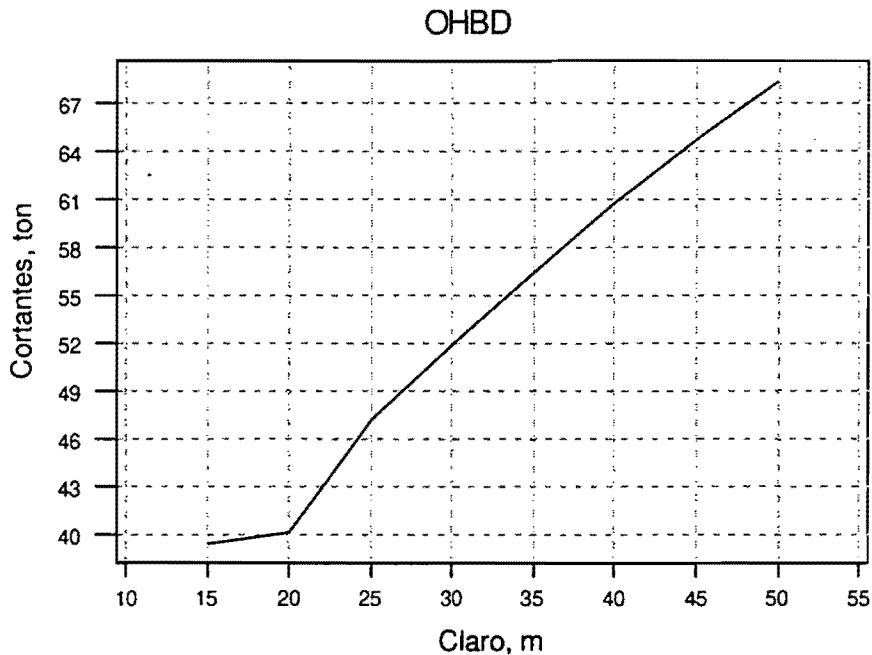


Figura 8.33 Cortantes máximos, sin ningún factor de carga, de acuerdo al reglamento OHBEL

8.3 Elementos mecánicos usando el Reglamento AASHTO

Las gráficas 8.34 y 8.35 muestran los “momentos flexionantes máximos vs. longitud” y “cortante máximo vs. longitud”, debidos a 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 8.36 y 8.37 correspondientes a la carga “HL-93”:

Observando las figuras 8.34 y 8.35, se nota que existen dos tramos bien definidos, el primero recto y el segundo curvo, en los momentos flexionantes la forma de la curva cambia a los 42 m, en los cortantes el cambio aparece a los 36 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 producirá mayores efectos.

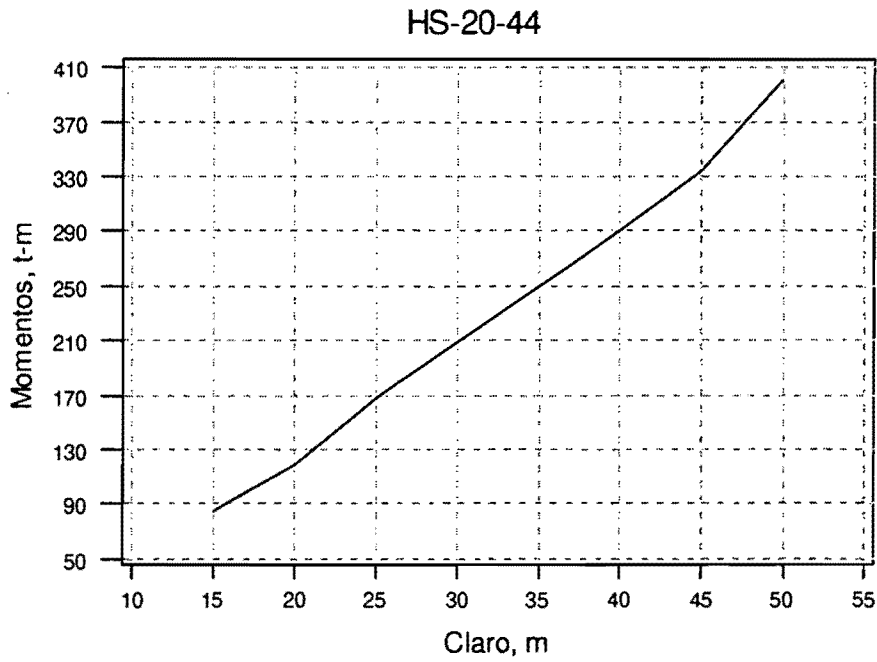


Figura 8.34 Momentos máximos, sin ningún factor de carga, de acuerdo al reglamento AASHTO, vehículo HS20-44

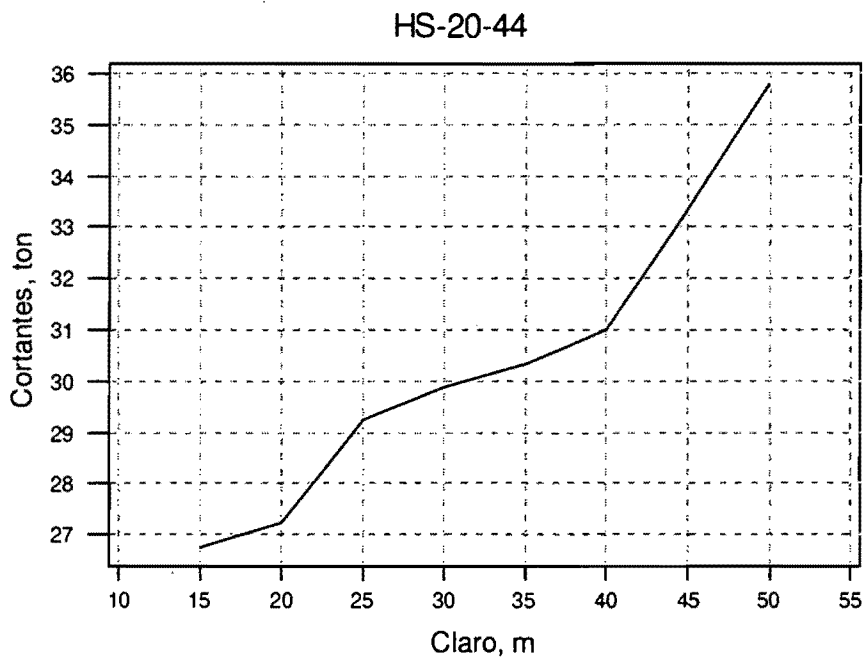


Figura 8.35 Cortantes máximos, sin ningún factor de carga, de acuerdo al reglamento ASHTO, vehículo HS20-44

Pasando a las figuras 8.36 y 8.37 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.

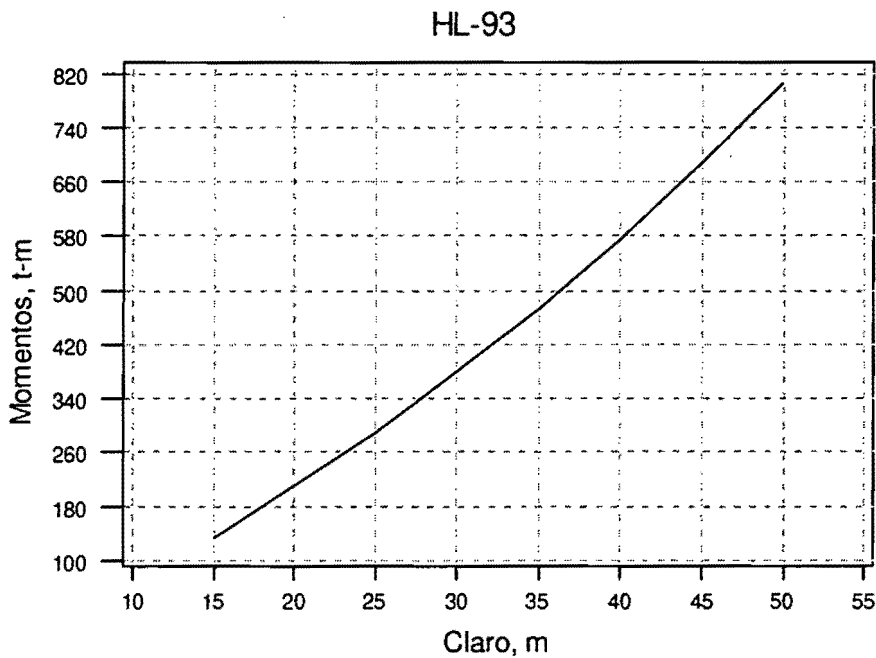


Figura 8.36 Momentos máximos, sin ningún factor de carga, de acuerdo al reglamento AASHTO-93

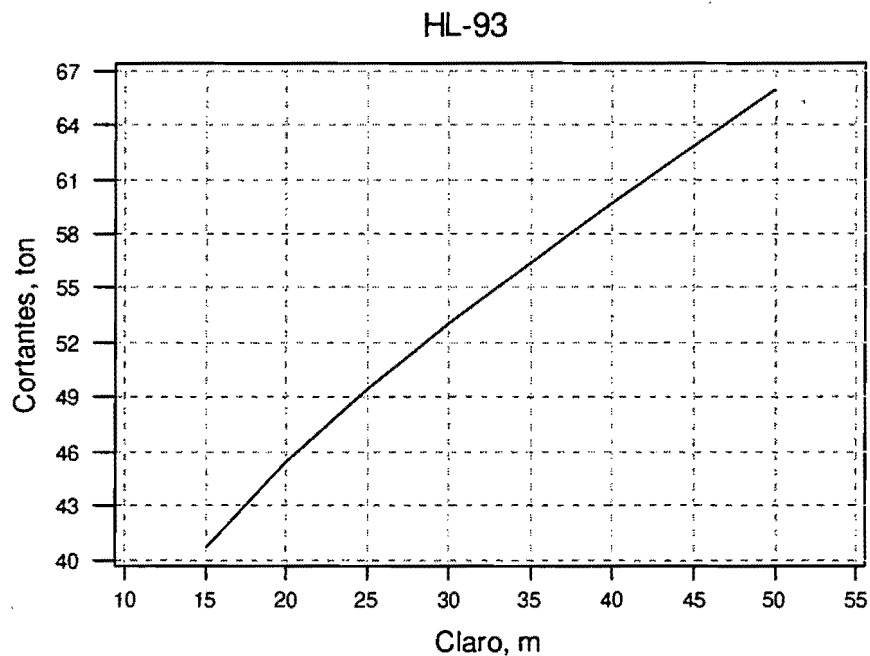


Figura 8.37 Cortantes máximos, sin ningún factor de carga, de acuerdo al reglamento AASHTO-93

8.4 Elementos mecánicos usando pesos y dimensiones reglamentarios

Existen en Pesos y Dimensiones una variedad de vehículos, por lo que el primer paso es encontrar cuál de todos produce los mayores efectos. A continuación se presentan con resultados de varias simulaciones para puentes simplemente apoyados de un claro. Para estos análisis se utilizaron las distancias entre ejes definidas en el reglamento de pesos y dimensiones.

Por simplicidad, se nombrarán por orden de mayor a menor momento los vehículos simulados.

Tabla 8.6 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 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 en las figuras 8.38 y 8.39.

Se puede observar que al corresponder la carga producida por el T3-S2-R4 a un sistema de cargas puntuales, la gráfica es lineal.

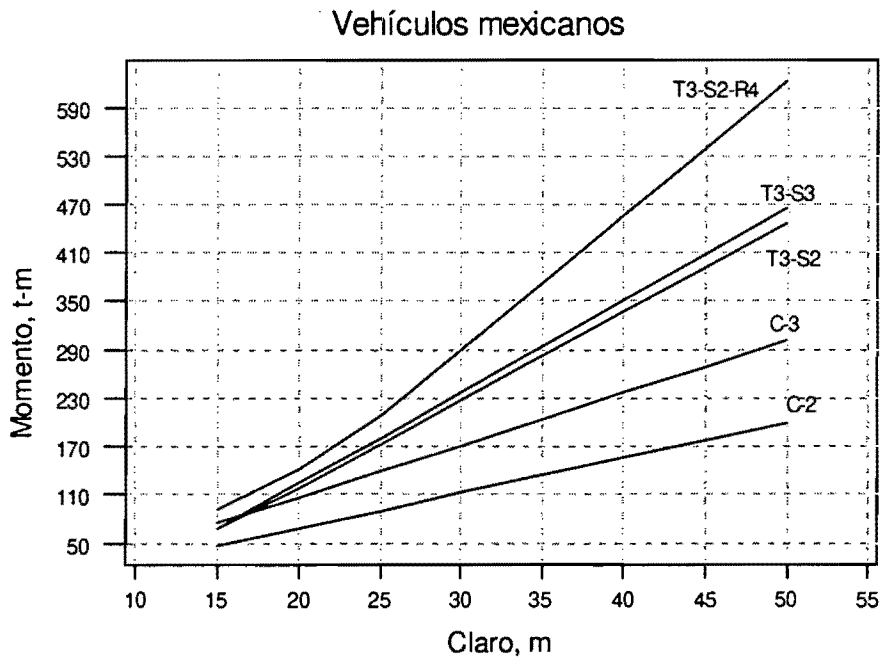


Figura 8.38 Momentos máximos, sin ningún factor de carga, utilizando vehículos mexicanos

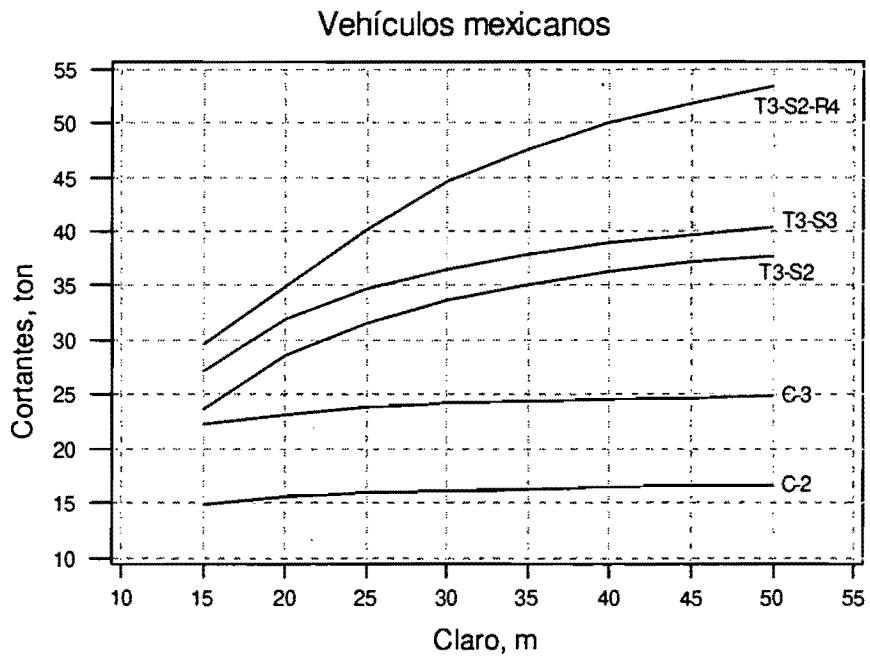


Figura 8.39 Cortantes máximos, sin ningún factor de carga, utilizando vehículos mexicanos

8.5 Elementos mecánicos usando el Eurocódigo

La carga que en este reglamento se denomina “modelo de carga 1” es una curva continua, que representan los elementos mecánicos con factor de impacto. Las curvas se muestran en las figuras 8.40 y 8.41, siendo válidas para puentes de un claro simplemente apoyados.

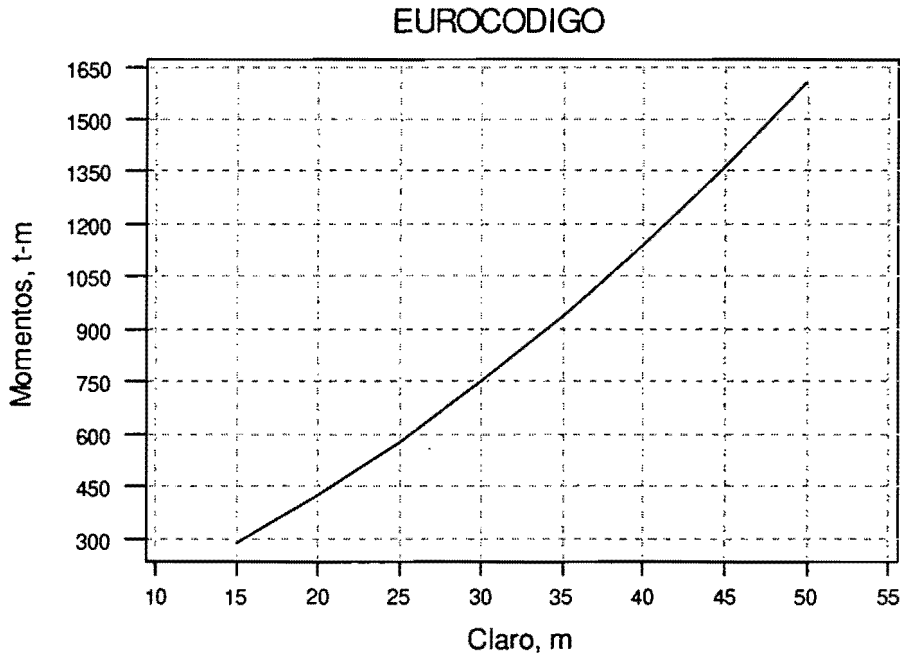


Figura 8.40 Momentos máximos, sin ningún factor de carga, EUROCODIGO

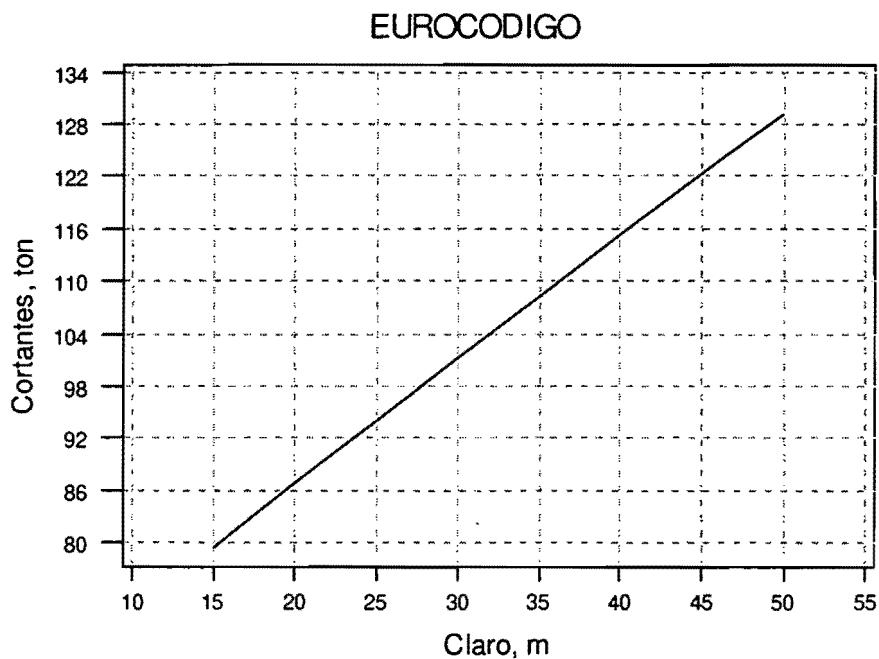


Figura 8.41 Cortantes máximos, sin ningún factor de carga, EUROCODIGO

8.6 Comparación de elementos mecánicos provocados por las cargas del OHBDC, AASHTO y Pesos y Dimensiones.

Las figuras 8.42 y 8.43 muestran los momentos flexionante máximos y cortantes máximos, respectivamente, usando las cargas de los reglamentos canadienses, estadounidense, eurocódigo y mexicano, sin factor de carga alguno. En estas se aprecia que, en general, el reglamento anterior del AASTHO da los valores mas pequeños, los intermedios son los del camión T3-S2-R4 y los valores mayores son producidos en primer término por el vehículo reglamentario canadiense, seguido por la correspondiente a la nueva carga del AASHTO "HL-93". Los factores de carga, tal como se verá mas adelante, serán grandes para el AASHTO y moderados para el OHBEL. Actualmente en México no se tienen factores de carga, por lo que en los subsiguientes análisis no se incluirá este vehículo mexicano.

En las gráficas 8.44 y 8.45 se presentan los momentos y cortantes máximos incluyendo factor de impacto y factores de carga. Para la versión anterior del AASTHO y en el intervalo de 15m a 30m (puentes pequeños), las diferencias no son muy marcadas, pero a medida que aumenta la longitud del claro de longitud, prácticamente no amplifican los elementos mecánicos por impacto, alejándose de su tendencia inicial. Es importante recordar que tanto el reglamento Canadiense como la nueva versión del AASHTO conservan la misma tendencia, ya que no aplican el mismo valor de factor de impacto a las cargas puntuales que a la uniformemente repartida; a diferencia de los dos reglamentos antes citados, en el Eurocódigo se aplica la misma carga para todas las longitudes.

Por último en las figuras 8.46 y 8.47, las cuales están escaladas con respecto a la carga HL-93 del nuevo reglamento AASHTO y correspondientes a momento flexionante y cortante, respectivamente. Se observa que el Eurocódigo se comporta muy parecido el reglamento canadiense y la nueva versión del AASHTO, aunque para claros mayores de 30 m la carga OHBEL es ligeramente mayor que la carga HL-93.

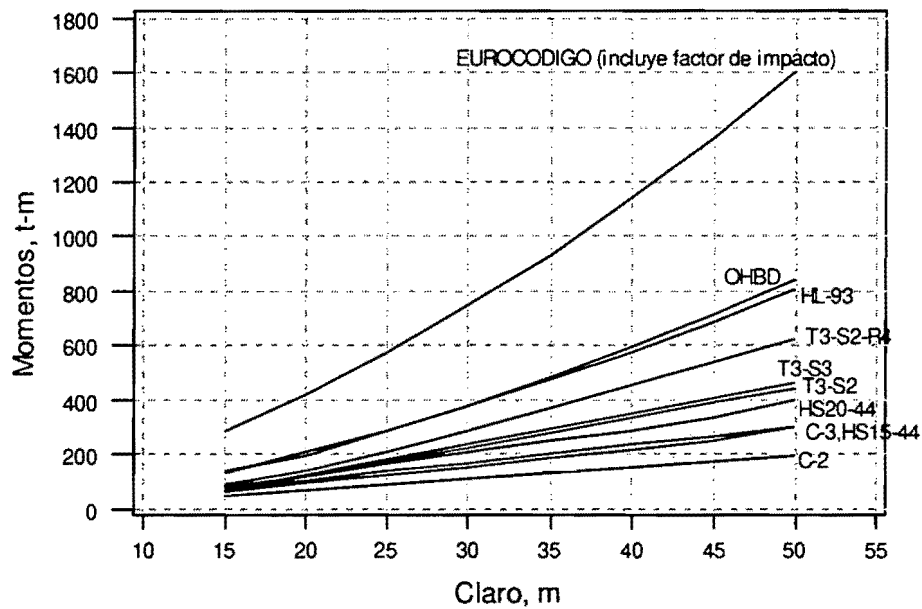


Figura 8.42 Momentos máximos, sin ningún factor de carga

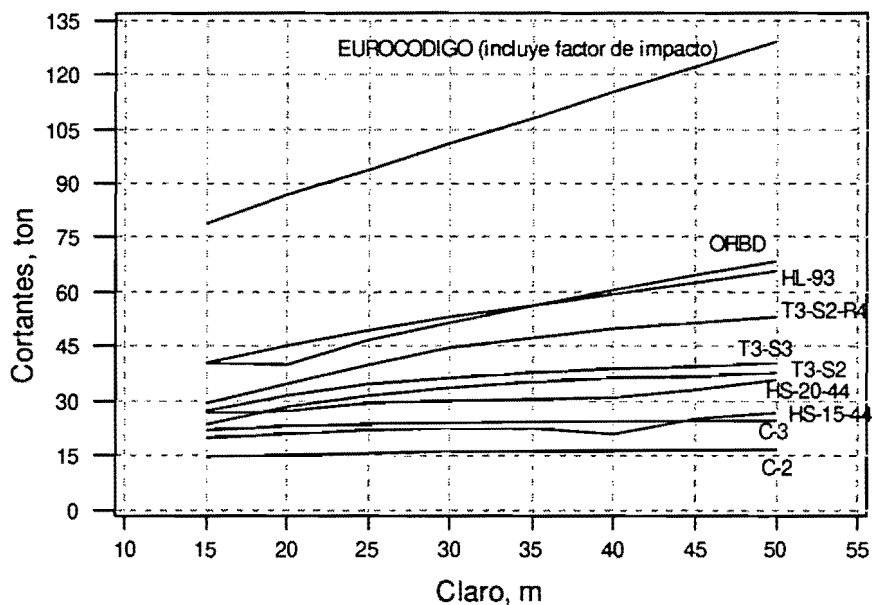


Figura 8.43 Cortantes máximos, sin ningún factor de carga

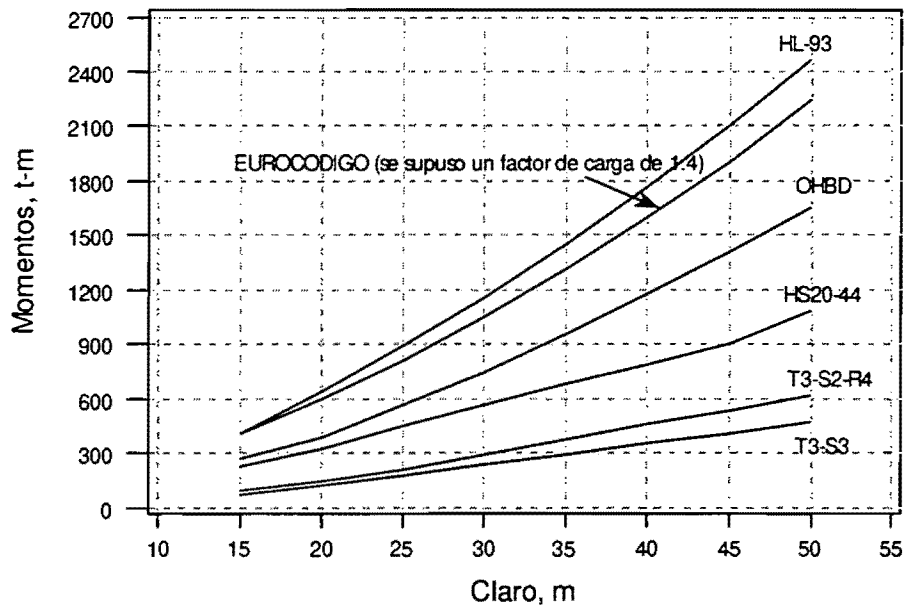


Figura 8.44 Momentos máximos, con factor de carga y factor de impacto

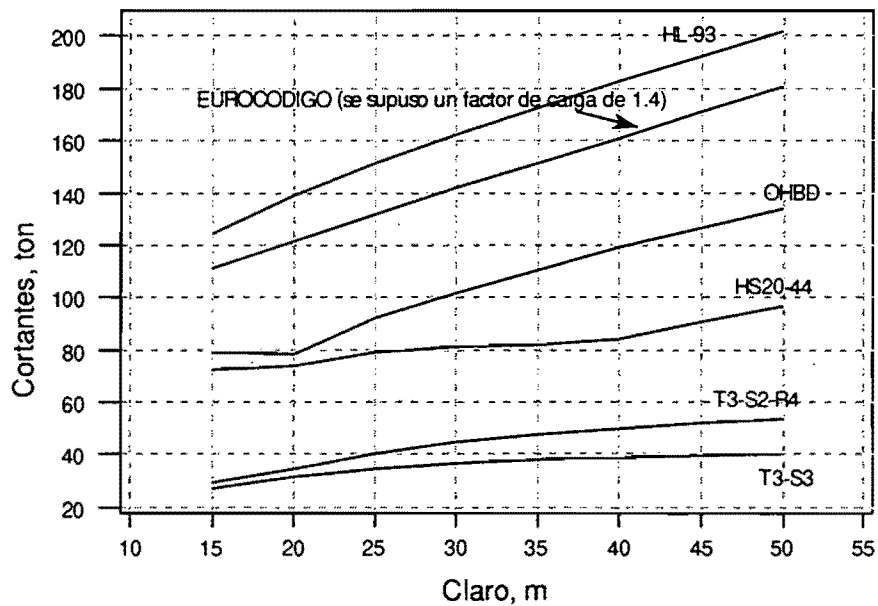


Figura 8.45 Cortantes máximos con factor de carga y factor de impacto

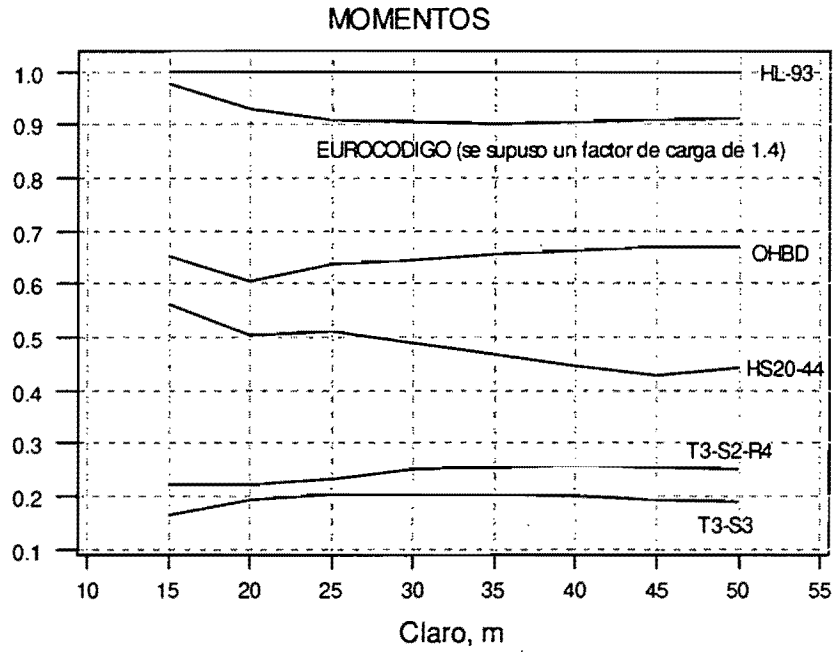


Figura 8.46 Momentos normalizados a la carga HL-93, incluyen factores de carga e impacto

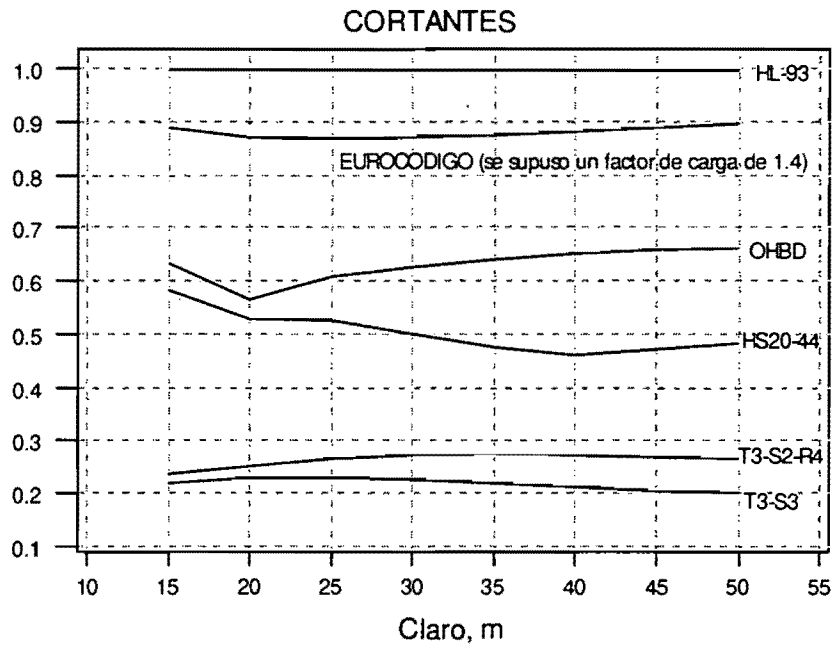


Figura 8.47 Cortantes normalizados a la carga HL-93, incluyen factores de carga e impacto

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se enumeran un conjunto de conclusiones y recomendaciones obtenidas de este trabajo:

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 muy conservador y demasiado resumido. El reglamento norteamericano, aún en su versión actual, es difícil de usar, debido a que un tema específico se aborda en varios capítulos y hay que remitirse a todos para no caer en alguna omisión. En cuanto al desarrollo de temas, el de Ontario puede servir de base para un reglamento mexicano de puentes.
- 3.- Con relación al momento flexionante, en los reglamentos nuevos se observa un gran cambio en la magnitud de los momentos que producen los modelos de cargas vivas propuestos. Por ejemplo, si comparamos el efecto de los reglamentos AASHTO94, OHBD y el Eurocódigo, se observa que producen momentos flexionantes, con respecto a reglamentos anteriores del AASHTO, del orden de 2.3, 2.1 y 1.6 veces respectivamente. Situación similar ocurre respecto a los cortantes en el que las relaciones son de 2.2, 1.9 y 1.4 veces, respectivamente.
- 4.- Analizando los momentos obtenidos del tráfico real, se observa que el vehículo T3-S3 es el que presenta porcentajes de excedencia mayores. Con respecto al vehículo HS20-44, la excedencia es del 44.17 %, con respecto al reglamento de Ontario es de 7.42 % y con respecto al

vehículo HL-93 es 8.70 %. En estos porcentajes no se están considerando factores de carga.

- 5.- Con relación a los cortantes obtenidos del tráfico real, los porcentajes de excedencia son los siguientes: con relación al HS20-44 es 50.62 %, con relación al de Ontario es 22.25 % y con respecto al HL-93 es 21.6 %.
- 6.- La gráficas que se presentan no incluyen factores de carga. Para hacer una comparación más real y detallada, sería necesario involucrar los factores de carga y de resistencia, además de los de impacto.
- 7.- En el análisis estadístico de la información de pesos y dimensiones 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 el T3-S2-R4.
- 8.- Otro aspecto importante es el relacionado con los porcentajes de vehículos que exceden los pesos 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 considerar, para fines de autorizar aumentos en los pesos y dimensiones de los vehículos, que se deben tomar en cuenta no sólo los daños a pavimentos, sino también los daños a puentes; como se vio en algunos de los resultados de este trabajo, las cargas actuantes están induciendo momentos flexionantes y fuerzas cortantes por encima de los previstos en el diseño original.
- 2.- Se recomienda continuar realizando análisis de la información estadística con el fin de poder conocer mejor las cargas vehiculares mexicanas, y estar en posibilidades de hacer propuestas de modelos de carga vivas realistas para México. Actualmente se cuenta con información para los años 1994, 1995 y 1996, la cual será utilizada de inmediato por el autor con estos fines.

- 3.- Se recomienda continuar con el estudio de pesos y dimensiones ya que este proporciona información muy valiosa para el estudio del efecto de las cargas en los puentes. Es recomendable que se incorporen en este estudio pesadoras con tecnología más nueva y con mayor grado de exactitud.
- 4.- Por el momento, la recomendación que quizás se podría hacer, es la de utilizar el vehículo T3-S3 y el T3-S2-R4, según convenga, y utilizar las normas americanas del AASHTO, en tanto no se tenga un reglamento nacional.
- 5.- Por otra parte, se vislumbra que es deseable implantar, en su momento, en el reglamento mexicano para diseño de puentes, una carga uniformemente repartida, ya que, como se observó en la vieja versión del AASHTO, para claros mayores a los 35m, prevalece esta carga a la del camión con "peso bruto vehicular" máximo. La condición de carga uniformemente repartida corresponde a la secuencia de vehículos, uno después de otro, a lo largo del puente. También es importante, como lo hacen el Eurocódigo y la nueva versión del AASHTO, por usar el concepto de carga vehicular virtual.
- 6.- Como continuación de este trabajo, se realizarán estudios para proponer un modelo de cargas vivas en puentes, con base en análisis de riesgos de excedencia.
- 7.- Realizar simulaciones del tipo de las de Montecarlo, con el fin de estudiar mediante métodos probabilísticos, la ocurrencia simultánea de vehículos, en diferentes carriles y en diferentes posiciones en cada carril.

10. REFERENCIAS

- 1.- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. American 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, 1994
- 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, RA. 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.