

ISSN 0188-7297



**Certificado en ISO 9001:2000**  
**Laboratorios acreditados por EMA**

---

---

# **SISTEMA DE CARGAS VIVAS VEHICULARES PARA DISEÑO DE PUENTES EN CARRETERAS ALIMENTADORAS**

Octavio A. Rascón Chávez

**Publicación Técnica No. 130**  
**Sanfandila, Qro, 1999**

---

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES  
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Sistema de cargas vivas  
vehiculares para diseño de  
puentes en carreteras  
alimentadoras**

**Publicación Técnica No. 130  
Sanfandila, Qro, 1999**

---

Este trabajo fue desarrollado por el Dr. Octavio A. Rascón Chávez, Coordinador de Desarrollo Tecnológico del Instituto Mexicano del Transporte.

Se agradece la colaboración brindada por el Dr. Luis Reyes Avila, Jefe de la División de Informática, el Ing. Alejandro Rivera Contreras, Investigador, y Beatriz Ampudia Lámbarri, secretaria, todos del IMT.

También se reconocen los valiosos comentarios que aportó el Ing. Amílcar Galindo Solórzano, Director de Apoyo Técnico de la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT.



|   |            |
|---|------------|
| <b>Resumen</b>  | <b>III</b> |
| <b>Abstract</b>   | <b>V</b>   |
| <b>Resumen Ejecutivo</b>  | <b>VII</b> |
| <b>1. Introducción y diseño conceptual del sistema de cargas vivas</b>                                  | <b>1</b>   |
| 1.1 Diseño conceptual del sistema de cargas vivas vehiculares   |            |
| <b>2. Análisis estadístico de los datos básicos</b>   | <b>7</b>   |
| 2.1 Análisis estadístico del peso bruto vehicular   | 9          |
| 2.2 Análisis estadístico de los pesos del tándem y del eje delantero                                    | 9          |
| <b>3. Análisis de correlación y regresión lineal múltiples</b>  | <b>15</b>  |
| <b>4. Método para calcular y validar el sistema de cargas vivas</b>                                     | <b>21</b>  |
| <b>5. Cálculo del subsistema de cargas concentradas</b>   | <b>25</b>  |
| 5.1 Determinación del valor de CV2  | 26         |
| 5.2 Determinación del valor de CV1  | 29         |
| 5.3 Determinación de la separación D  | 31         |
| 5.4 Cálculo de las cargas virtuales para carreteras alimentadoras                                       | 31         |
| 5.5 Determinación de los factores de carga viva básica  | 32         |
| <b>6. Validación del subsistema de cargas concentradas</b>  | <b>35</b>  |
| 6.1 Validación utilizando los elementos mecánicos reales más grandes                                    | 35         |
| 6.2 Validación utilizando los elementos mecánicos máximos esperados, según los análisis probabilísticos | 35         |
| 6.3 Validación utilizando los elementos mecánicos máximos que se predicen con las regresiones múltiples | 42         |

## *Indice*

---

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 7.  | <b>Cálculo de la carga uniformemente distribuida del sistema de cargas vivas</b>                             | 47 |
| 7.1 | Cálculo del valor de la carga uniformemente distribuida, $\omega$  | 48 |
| 7.2 | Comparaciones con otros sistemas de cargas vivas   | 54 |
| 8.  | <b>Factores de carga viva, de carriles múltiples y de efectos dinámicos. Fuerzas centrífuga y de frenado</b> | 59 |
| 8.1 | Factores de carga viva para diseño   | 59 |
| 8.2 | Factores de carga viva para revisar por condiciones de servicio y por fatiga                                 | 60 |
| 8.3 | Presencia múltiple de cargas vivas   | 62 |
| 8.4 | Efecto dinámico de la carga viva vehicular y fuerzas centrífugas y de frenado                                | 63 |
| 9.  | <b>Sistema de cargas vivas vehiculares. Conclusión y recomendación</b>                                       | 67 |
| 9.1 | Conclusión   | 67 |
| 9.2 | Recomendación  | 71 |
|     | <b>Referencias</b>   | 73 |

## **Resumen**

---

El objetivo principal de esta investigación es **generar un sistema de cargas vivas vehiculares**, que modele adecuadamente a los enormes pesos que transportan, en las **carreteras alimentadoras (tipo D)** de nuestro país, los grandes vehículos de carga tipo C3 y que, por consiguiente, pueda proponerse **para realizar el análisis estructural de los puentes** que se revisen o construyan en ese tipo de caminos en México. Los camiones C4 no se toman en cuenta, en virtud de que se prevé que su tránsito en este tipo de caminos no será permitido en la próxima versión del reglamento sobre pesos y dimensiones (referencia 1); los vehículos articulados tampoco se consideran, porque no están autorizados para circular en ellos.

La conveniencia de contar con dicho sistema surgió como recomendación de la investigación reportada en la referencia 3, misma que fue reconfirmada ampliamente como parte de este trabajo, al comprobarse que ni el modelo que se especifica en el reglamento de la AASHTO, ni el que se propone en la referencia 3, son aplicables al caso de los caminos alimentadores, porque con ellos se obtienen **elementos mecánicos (momentos flexionantes y fuerzas cortantes) para diseño** muy superiores a los que ocasionan los vehículos C3 más pesados, como se demuestra en las figuras 1.1 y 1.2.

La formulación y cálculo del sistema de cargas vivas se sustentan en las evidencias empíricas contenidas en las colecciones de datos sobre pesos y dimensiones de vehículos de carga tipo C3, que fueron captados por la SCT en 1993, 1994 y 1996, en 26 puntos de aforo situados en distintas carreteras del país. A partir de las variables muestreadas, se generaron otras (peso del tándem, momento flexionante máximo y fuerza cortante máxima), para diseñar, cuantificar y validar el sistema de cargas vivas, mediante análisis estadísticos y probabilísticos de diversa índole.

**El diseño conceptual del sistema comprende un subsistema de cargas concentradas y uno de carga uniformemente repartida.** Los valores que se asignan a las cargas concentradas se calculan mediante diversos análisis probabilísticos de riesgos de excedencia, en tanto que la magnitud de la carga uniforme se determina mediante un proceso de simulación estocástica de secuencias de vehículos C3.

Como parte del desarrollo del sistema, se calculan los diversos valores que debe tomar el **factor de carga viva**, en cada una de las diferentes combinaciones de cargas que se utilicen, tanto para diseño estructural, como para revisión por condiciones de servicio y fatiga. Al hacer esto, se genera un **subsistema de cargas concentradas nominales**, que es congruente con el peso bruto máximo

## *Resumen*

---

que se establece para los camiones C3 en el reglamento sobre pesos y dimensiones de vehículos que está vigente en México (referencia 1).

Como recomendación principal, se propone que el sistema de cargas vivas vehiculares que se desarrolla en esta investigación, así como los factores de carga viva y de ocupación de carriles múltiples, **sustituyan a los correspondientes del reglamento de la AASHTO**, para realizar el diseño estructural de los puentes que se ubiquen en las carreteras alimentadoras en México y que, en lo demás, dicho reglamento siga aplicándose, con las salvedades que se tengan en aspectos eólicos, sísmicos y meteorológicos.

## ***Abstract***

---

The main objective of this paper is to develop a system of vehicle live loads, in such a manner to take into account the large weights regularly transported in our country by the big type C3 trucks, which very soon will be the largest allowed on rural roads (type D, reference 1) and, therefore, be appropriate to carry out the structural analysis of bridges to be located on secondary highways in Mexico.

The necessity of having such a system came out as a recommendation in reference 3, because it was proved that the live load model developed in such a reference, and the one specified in the AASHTO bridge design code are not applicable in Mexico, because they produce mechanical elements for design which are much higher than those caused by the real heavy type C3 vehicles.

The development of the system is based on the empirical evidences contained in the data collections on weights and dimensions obtained by SCT in 1993, 1994 and 1996, in 26 points on different highways of the country.

The design, quantification and validation of the live load system, was made by using statistical and probabilistical analysis of a set of random variables generated in the paper, some of them corresponding to maximum shear forces and flexural moments in simply supported bridges.

The configuration of this live loads system, has a set of concentrated loads and a uniformly distributed load.

The values assigned to each one of the concentrated loads are calculated by carrying out some reliability analysis, and the magnitude of the distributed load is obtained through a stochastic simulation process of sequences of heavy trucks on a traffic line.

The live load factors and the nominal concentrated load system are obtained in congruence with the maximum gross weight specified in the Mexican code (reference 1).

The main recommendation of this paper, is that the live load model and the live load factors of the AASHTO code, must be substituted by those developed herein, in order to apply such a code for structural design of bridges located on secondary roads (type D) in Mexico.



### **1. Introducción y diseño conceptual del sistema de cargas vivas**

En este estudio se toman como antecedentes las conclusiones y recomendaciones que se establecieron en las referencias 2 y 3, las cuales se listan al final de esta publicación. En ellas se demostró, utilizando la información correspondiente a muestras de pesos y dimensiones de vehículos de carga, captadas por la SCT en 1993, 1994 y 1996, que los **modelos de cargas vivas vehiculares** que se establecen en los reglamentos para diseño estructural de puentes carreteros de la AASHTO, en Estados Unidos de Norteamérica, y de Ontario, en Canadá (referencias 4 y 5), producen elementos mecánicos para diseño (momentos flexionantes y fuerzas cortantes máximos) **bastante inferiores** a los que ocasionan los vehículos de carga muy pesados, tipos T3-S3 y T3-S2-R4, que transitan por las carreteras en México y violan el reglamento vigente sobre pesos y dimensiones, RPD (referencia 1).

Por este motivo, en la referencia 3 **se formuló un modelo de cargas vivas** que, al aplicarse para el análisis estructural de cada puente, arroja momentos flexionantes y fuerzas cortantes máximos que son superiores a los que ocasionan los vehículos reales más pesados, de manera que con él se logra un **nivel de seguridad adecuado** en el diseño de nuevos puentes en México, así como en la revisión estructural de los ya existentes.

Debido a que dicho modelo **se generó para puentes en carreteras tipos A, B y C** (clasificación del RPD), con base en información estadística sobre pesos y dimensiones de vehículos tipos T3-S3 y T3-S2-R4, es lógico que su aplicación para el análisis estructural de puentes **en carreteras alimentadoras**, en las que su circulación **no está permitida** (los de mayor peso que se prevé que quedarán autorizados en el próximo RPD son los C3; actualmente son los C4), dará como resultado que los elementos mecánicos para diseño sean demasiado grandes y conduzcan, consecuentemente, a sobrediseñar los puentes y a costos mayores de la construcción.

Esto mismo ocurre al aplicar los modelos de cargas vivas especificados en los reglamentos de la AASHTO y de Ontario, Canadá (referencias 4 y 5). En las figuras 1.1 y 1.2 se ilustran estas conclusiones.

Por lo anterior, se establece la necesidad de contar en México con un **modelo o sistema de cargas** que represente adecuadamente a los grandes pesos que

transportan los vehículos C3, para fines del diseño o revisión estructural de los puentes que se ubiquen en carreteras alimentadoras (tipo D, según el RPD), de *Resumen ejecutivo*

---

manera que se garantice un nivel de seguridad razonable (no excesivo). La formulación de dicho sistema de cargas, es la meta principal de este trabajo.

La información que se utiliza en este estudio, captada en los procesos de muestreo, corresponde a los valores que asumen las variables aleatorias “**peso de cada eje**”, “**separación entre cada par de ejes consecutivos**” y “**peso bruto**”. La muestra conformada con los datos captados en 1993 y 1994 tiene 11,267 vehículos C3 y la de 1996 se compone de 7,512.

Para proponer la topología del sistema de cargas vivas a desarrollar, se toma en consideración que todos los modelos que se incluyen en los reglamentos de otros países consideran **dos tipos de cargas: uno de concentradas y otro de uniformemente repartida**. El de cargas concentradas produce efectos en los puentes que son equivalentes a los que ocasiona un vehículo muy pesado (en este caso, tipo C3), que tiene una probabilidad muy baja de presentarse; el de carga uniforme produce efectos equivalentes a los que ocasiona una secuencia de estos camiones pesados, que al circular en un carril, uno tras otro, ocasionan elementos mecánicos iguales o mayores, dependiendo del claro del puente, que los que produce cualesquiera de ellos.

Como punto de partida, **se planteó la hipótesis** de que el momento flexionante y la fuerza cortante máximos que cada vehículo le ocasiona a un puente, dependen fundamentalmente de la carga total (resultante) de los dos ejes traseros del tándem; **estadísticamente se comprobó que esta hipótesis es correcta**.

Por esto se decide, en este trabajo, que el subsistema de cargas concentradas tenga una topología simple de sólo dos ejes de aplicación, creando así un “**vehículo virtual**” (no existe) que tiene un eje delantero y sólo un trasero; el delantero corresponde al de igual posición en el tractor, en tanto que el trasero representa el peso total que baja por el tándem.

Por tanto, se propone que el subsistema de cargas concentradas del sistema de cargas vivas tenga la siguiente topología:



En esta figura los símbolos CV1 y CV2 representan a las “**cargas virtuales**” del “**vehículo virtual**”, y D es la distancia entre ellas; el cálculo de los valores que deben asumir estos componentes, de manera que se logren niveles de seguridad estructural adecuados a las condiciones reales del tránsito vehicular en México, es la parte fundamental de este trabajo. Las dimensiones de las áreas de contacto (vista en planta) de las cargas virtuales, se determinan en función de sus magnitudes.

## 2. Análisis estadísticos de las características vehiculares

Con el fin de verificar si la topología propuesta es adecuada y, posteriormente, calcular los valores que se les deben asignar a CV1 y CV2, para obtener un nivel de seguridad adecuado, se formularon las siguientes **variables aleatorias**, en función de los “**pesos de los ejes**”, PE<sub>i</sub>, donde i es el número del eje:

PE1 = peso del eje 1 (delantero)

PT = peso del tándem = PE2 + PE3

Las cargas virtuales CV1 y CV2 se relacionan, respectivamente, con PE1 y PT.

Para realizar los análisis estadísticos, es necesario calcular primero los valores que asumen PE1 y PT para cada vehículo C3 de las muestras de 1993-94 y 1996, conjuntando así muestras de dichas variables aleatorias. Al calcular las distribuciones de frecuencias con los datos de estas nuevas muestras, así como del peso bruto, PB, se pudo concluir lo siguiente:

1. Los datos de pesos brutos rebasan en el 31.8% de los casos a los valores permitidos en el RPD. El valor más grande de los C3 fue 50t, el cual rebasa en 92% al permitido (26t) (figuras 2.2 y 2.3).
2. Los datos de pesos del tándem rebasan al permitido (19.5t) en el 44.3% de los casos; el mayor de los datos (43t) rebasa en 120% al autorizado(19.5t) (figuras 2.5 y 2.6).
3. Los datos de pesos del eje 1 rebasan al permitido (6.5t) sólo en el 2.3% de los casos. El valor más grande (12t) es 85% mayor que el autorizado.

### 3. Estudios estadísticos de correlación y regresión. Justificación del modelo conceptual

Un propósito importante que se tuvo al calcular los elementos mecánicos máximos, fue realizar estudios de regresión y correlación estadísticas de éstos con los pesos del tándem, para verificar si éste puede sustituir a las cargas de dos ejes que lo conforman y, por tanto, justificar que el subsistema de cargas concentradas del sistema de cargas vivas tenga sólo dos ejes de aplicación. En este proceso de análisis estadístico, se incluyeron también al peso del eje delantero y a la separación entre los ejes 2 y 3 de cada vehículo, DE1.

De esta forma, se establecieron los estudios de regresión y correlación lineal múltiples, en los que el modelo matemático fue:

$$M(o V) = A + B PT + CPE1 + D DE1$$

en el cual, A, B, C y D son coeficientes cuyos valores se determinan al calcular la regresión estadística para cada claro de puente; es decir, se obtiene una ecuación para cada una de las variables aleatorias M15, M30, M45, V15, V30 y V45. Asimismo, para cada uno de estos seis casos, se obtiene el coeficiente de correlación lineal correspondiente.

Las conclusiones fueron las siguientes:

1. En todos los casos se obtuvo una magnífica relación lineal; como ilustración, basta señalar que los diferentes valores del coeficiente de correlación fueron 99.85 y 99.80%.
2. Mediante diversos análisis de variancia, se determinó que, en efecto, PT es la variable aleatoria que **más influye** en cada uno de los elementos mecánicos. En las figuras 3.3 a 3.6 se presentan las regresiones lineales marginales de M45, M15, V45 y V15 con PT, en las que se aprecia la magnífica relación que existe entre ellas; el coeficiente de correlación, en este caso, es 99%.

**Con estas conclusiones se comprueba que el diseño conceptual del subsistema de cargas concentradas que se propone es adecuado y, consecuentemente, que las magnitudes de las cargas virtuales CV1 y CV2 se**

pueden calcular mediante análisis probabilísticos de las variables aleatorias PE1 y PT, respectivamente.

*Resumen ejecutivo*

---

## 4. Cálculo del subsistema de cargas concentradas

Con base en los resultados y conclusiones de los análisis estadísticos y de regresión realizados en los capítulos anteriores, y adoptando la filosofía que prevalece en los reglamentos de diversos países, el diseño conceptual que se estableció aquí para el sistema de cargas vivas vehiculares involucra dos subsistemas:

**El primero se conforma con dos cargas concentradas con diferentes magnitudes; el segundo tiene una carga uniformemente distribuida. Ambos se aplican a lo largo del carril de circulación, el cual se asume de 3.0m de ancho, y sus efectos son aditivos al colocarse en las posiciones más desfavorables, para calcular los elementos mecánicos y las deformaciones que ocasionan.**

El subsistema de dos cargas concentradas representa a un “**vehículo virtual**” (no existe), cuyas magnitudes se calculan para que ocasionen elementos mecánicos máximos **equivalentes** a los que producirían los vehículos reales C3 muy pesados, de manera que tengan una **pequeñísima probabilidad** de ser excedidos en el lapso de vida útil previsto para un puente.

Por su parte, el subsistema de carga uniforme ocasiona elementos mecánicos que, **sumados** a los que produce el vehículo virtual, corresponden a los que ocasiona una secuencia de vehículos pesados C3 que pueden circular muy próximos entre sí, uno tras otro, con baja probabilidad, a lo largo de un puente.

Las **magnitudes** de las dos **cargas virtuales** concentradas se calculan realizando diversos **análisis probabilísticos de riesgos de excedencia**, que se presentan en el siguiente capítulo, de manera que garanticen que al aplicarse para diseñar o revisar un puente, se logre un **alto nivel de seguridad estructural**. La separación entre ellas se propone con base en resultados estadísticos.

Los cálculos y la validación del sistema que se obtiene, se realizan de acuerdo con la metodología descrita en el capítulo 4.

Mediante diversos análisis de bondad de ajuste de algunos modelos teóricos probabilísticos, con las distribuciones empíricas de frecuencias relativas acumuladas de los datos de las variables aleatorias PB y PT, se determinó que la **distribución de Weibull** resultó la más razonable en todos los casos.

Como ilustración, en las figuras 5.3 y 5.4 se muestran los casos de las variables PT y PB, respectivamente, para la muestra total.

Con el propósito de contar con varias opciones de valores de CV2, que correspondan a diferentes cantidades, N, de vehículos C3 que se espera transiten sobre un puente dado, durante la vida útil del mismo, se tomaron cuatro casos: 10,000, 100,000, 1,000,000 y 10,000,000. Mediante asignación frecuencial, a los valores más grandes de PT en cada caso les corresponden, respectivamente, probabilidades de excedencia,  $P = 1/N$ , de  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-6}$  y  $10^{-7}$  (el valor de N es un parámetro de proyecto). En la siguiente tabla se presentan los valores de CV2, PBV (peso bruto virtual) y CV1 que se obtienen con las respectivas distribuciones de Weibull, para estas probabilidades (riesgos):

| N      | P         | CV2, t | PBV, t | CV1=PBV-CV2, t |
|--------|-----------|--------|--------|----------------|
| $10^4$ | $10^{-4}$ | 42.9   | 49.3   | 6.4            |
| $10^5$ | $10^{-5}$ | 46.0   | 52.8   | 6.8            |
| $10^6$ | $10^{-6}$ | 48.6   | 55.8   | 7.2            |
| $10^7$ | $10^{-7}$ | 51.0   | 58.5   | 7.5            |

A la separación D se le asignó el valor de 6m, con base en los promedios de las distancias entre los ejes.

Debido a que la mayor parte de la información estadística utilizada corresponde a vehículos C3 que circulaban por carreteras principales (tipos A y B), en las cuales el peso bruto máximo permitido en el RPD es de 26t, es necesario convertir los valores de las cargas virtuales que se obtuvieron en las secciones anteriores, en otros que tengan congruencia con el peso bruto máximo que se autoriza en las carreteras alimentadoras, de 20.5t; para hacer esto, se decidió escalar a los ya obtenidos, multiplicándolos por la relación  $20.5/26 = 0.7885$ , con lo cual se obtienen los siguientes nuevos valores de PBV, CV1 y CV2:

| P         | PBV, t | CV1, t | CV2, t |
|-----------|--------|--------|--------|
| $10^{-4}$ | 38.87  | 5.05   | 33.82  |
| $10^{-5}$ | 41.63  | 5.36   | 36.27  |
| $10^{-6}$ | 44.00  | 5.68   | 38.32  |
| $10^{-7}$ | 46.12  | 5.91   | 40.21  |

#### 4.1 Determinación de los factores de carga viva básicos

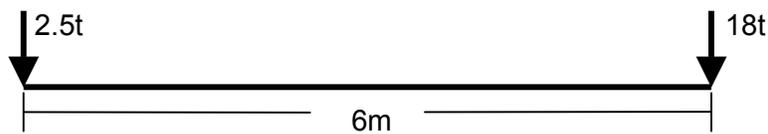
Dado que los factores de carga se aplican multiplicándolos por las **cargas nominales**, con el fin de tomar en cuenta la incertidumbre que se tiene sobre las magnitudes máximas que eventualmente asumirán las cargas reales, debido a su aleatoriedad, es necesario calcular los valores que les corresponden a los **factores de carga viva básicos** que se utilizarán en el subsistema de cargas concentradas aquí propuesto, para darle congruencia con el proceso de diseño de puentes mediante métodos que se basen en los estados límite de resistencia y servicio.

Precisamente, los valores antes calculados para las cargas virtuales **tienen ya incorporado el efecto de la incertidumbre** antes mencionada, toda vez que se asocian a probabilidades de excedencia que se consideraron razonablemente pequeñas. Por otra parte, el valor nominal del peso bruto vehicular máximo establecido en el RPD es de 20.5t, para carreteras alimentadoras.

Por tanto, al dividir los pesos brutos de la tabla anterior entre 20.5t, se obtienen los **factores de carga viva básicos**, FCV, que corresponden a cada probabilidad de excedencia, que se muestran en la tabla siguiente junto con las **nuevas cargas virtuales (nominales)**, que resultan de dividir a las calculadas en la sección anterior entre cada factor de carga.

| N      | P         | FCV  | CV1, t | CV2, t |
|--------|-----------|------|--------|--------|
| $10^4$ | $10^{-4}$ | 1.90 | 2.66   | 17.84  |
| $10^5$ | $10^{-5}$ | 2.03 | 2.64   | 17.86  |
| $10^6$ | $10^{-6}$ | 2.15 | 2.64   | 17.82  |
| $10^7$ | $10^{-7}$ | 2.25 | 2.63   | 17.87  |

Al comparar los distintos valores de CV1, se aprecia que son muy similares entre sí, al igual que los de CV2. Por tanto, para conformar el **subsistema de cargas concentradas nominales**, es suficiente con un solo valor de cada carga virtual. Por conveniencia nemotécnica y por la precisión que se justifica en los cálculos de los elementos mecánicos, se decidió redondear el valor de CV2 a 18t y el de CV1 a 2.5t, por lo cual dicho subsistema queda establecido de la siguiente manera:



Cada una de estas cargas corresponde a un eje del vehículo virtual, por lo que, para los fines procedentes, según el reglamento AASHTO, se dividen en dos partes iguales que corresponden a llantas separadas 1.8m, dentro de un carril de 3.0m de ancho. Las áreas de aplicación de las cargas de cada llanta se calculan con la fórmula que para tal efecto da el reglamento antes señalado.

Este subsistema de cargas o sus efectos, deben multiplicarse por el **factor de carga viva que le corresponda a cada estado límite** que se utilice en el proceso de diseño de la estructura de cada puente, siendo los valores básicos antes calculados, los aplicables a la combinación de cargas denominada en el reglamento de la AASHTO como “**Resistencia I**”. A partir de éstos se calculan, en el capítulo 8 de este trabajo, los factores de carga viva para otras combinaciones de cargas, mismos que aparecen en la Tabla 2.

## **4.2 Validación del subsistema de cargas concentradas**

Con el fin de validar el subsistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas vehiculares (etapas 6 a 9 de la metodología propuesta en el capítulo 4), se realizaron las tres comparaciones siguientes de los **elementos mecánicos** que se obtienen al aplicarlo:

1. Con los valores reales más grandes que se obtienen con los datos de la muestra.
2. Con los valores máximos esperados, según los análisis probabilísticos.
3. Con los valores máximos que se predicen a partir de los análisis de regresión múltiple ya realizados.

En las figuras 6.1 y 6.2 se presentan las comparaciones del caso 1. En ambas se aprecia que los resultados del subsistema de cargas superan a los más grandes reales, por lo cual se califican como **satisfactorios**.

En las figuras 6.11 a 6.14 se comparan los resultados de aplicar el subsistema de cargas concentradas del modelo, con los valores máximos esperados asociados a varios niveles de riesgo, los cuales se obtuvieron en los análisis probabilísticos realizados para esta validación; en ellas se observa que, en todos los casos, los del modelo son ligeramente mayores que los esperados, por lo cual el subsistema de cargas propuesto es **satisfactorio**.

Los resultados del proceso de validación correspondiente al caso 3 se presentan en las figuras 6.15 a 6.18. En ellas se aprecia que los resultados de aplicar el subsistema de cargas concentradas son mayores, entre 1.5 y 11.5 por ciento, que los que se predicen con los análisis de regresión múltiple, por lo que se concluye que este subsistema de cargas es **satisfactorio**.

En conclusión, las tres validaciones realizadas al subsistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas aquí desarrollado, conducen a establecer que **éste es adecuado** para el análisis estructural de puentes en México.

## **5. Cálculo del subsistema de carga uniformemente distribuida**

Con el fin de incorporar en el sistema de cargas vivas, las acciones que corresponden al caso de que en una línea de circulación de un puente transiten, muy cercanos entre sí, uno tras otro, varios vehículos pesados, se realizó un proceso de **simulación estocástica, tipo Monte Carlo**, en el cual se consideró la ocurrencia de dos vehículos consecutivos en una línea del tránsito, adaptando el proceso realizado en la referencia 3. Con los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos que se obtienen con la simulación, se calcula el valor que le corresponde a la **carga virtual uniformemente repartida que los produce**.

Para llevar a cabo el proceso de selección aleatoria de cada par de vehículos, se efectuó un muestreo sobre una colección parcial de camiones C3, de las muestras de los años 1993-94 y 1996 por separado; los vehículos a muestrear fueron los 300 más pesados de cada una. El muestreo se realizó utilizando una

## Resumen ejecutivo

tabla de números aleatorios, para seleccionar a cada vehículo que sería incorporado a cada secuencia de dos.

Para realizar la simulación y calcular a la carga uniforme, se generó el procedimiento que se describe en el capítulo 7.

Al calcular los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos que cada tercia de vehículos le ocasiona a cada puente, tomando claros de 15, 30, 45 y 60 metros, y seleccionar el valor más grande de cada elemento mecánico, se obtuvieron las gráficas, ecuaciones de regresión y coeficientes de correlación que se muestran en las figuras 7.1 a 7.3; en ellas aparecen los valores más grandes de cada caso, versus el logaritmo de la probabilidad de que los dos vehículos de cada pareja excedan el valor del peso del tándem que cada uno tiene. En todos los casos se logran regresiones con coeficientes de correlación lineal de 84.1 a 92.7%.

Para calcular el valor de la carga virtual uniformemente distribuida,  $\omega$ , se emplearon las mismas probabilidades de excedencia que se utilizaron para cuantificar el subsistema de cargas virtuales concentradas; asimismo, para incrementar la confiabilidad, al valor de cada elemento mecánico calculado con las ecuaciones de regresión, se le agregó la semiamplitud del intervalo de predicción del 95% de nivel de confianza.

En dicha figura se observa que para claros de 15, 30 y 45m, el subsistema de cargas concentradas da momentos más grandes que los de la simulación, por lo cual **no se requiere** agregar carga uniforme. Por su parte, para  $L = 60\text{m}$  sí se tienen valores mayores en la simulación; los valores de la carga uniforme,  $\omega$ , calculada para cada probabilidad de excedencia, se presentan en una tabla más adelante, siendo el mayor de 0.06 t/m.

Asimismo, en la figura 7.5 se muestran las fuerzas cortantes máximas que se calcularon para cada probabilidad de excedencia, junto con las correspondientes al subsistema de cargas concentradas. En ella se aprecia que las secuencias de vehículos producen efectos mayores que los del subsistema de cargas concentradas sólo en longitudes de 45 y 60m.

En la siguiente tabla se presentan los valores calculados de la carga uniforme que se requeriría aplicar, junto con el subsistema de cargas concentradas, para lograr, entre ambos, las fuerzas cortantes máximas que producen las secuencias de vehículos, siendo el mayor de 0.13 t/m.

| P         | FCV  | Con V45<br>$\omega$ , t/m | Con V60<br>$\omega$ , t/m | Con M60<br>$\omega$ , t/m |
|-----------|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $10^{-4}$ | 1.95 | 0.05                      | 0.08                      | 0.02                      |
| $10^{-5}$ | 2.05 | 0.07                      | 0.10                      | 0.04                      |
| $10^{-6}$ | 2.15 | 0.10                      | 0.12                      | 0.05                      |
| $10^{-7}$ | 2.25 | 0.11                      | 0.13                      | 0.06                      |

Con base en estos resultados, se decidió tomar  $\omega = 0.06$  t/m para calcular los momentos flexionantes en puentes con claros mayores a 45m, y  $\omega = 0.13$  t/m para obtener las fuerzas cortantes en claros de más de 30m.

En las figuras 7.7 a 7.10 se muestran los elementos mecánicos que resultan al aplicar el sistema completo de cargas vivas. En ellas se utilizan los factores de carga viva básicos asociados a cada riesgo de excedencia.

**Como conclusión, las evaluaciones realizadas arrojaron resultados muy satisfactorios y acreditan al sistema de cargas vivas vehiculares aquí desarrollado, como apto para realizar el análisis estructural de los puentes en México que se ubiquen en carreteras alimentadoras.**

Por tanto, se recomienda que para el diseño o revisión de las estructuras de los puentes en carreteras tipo D (o equiparables en las redes estatales), se utilice el reglamento o revisión de la AASHTO, pero cambiando el modelo de cargas vivas vehiculares y los factores de carga viva y de carriles múltiples, por los que se generaron en el capítulo 8 de este trabajo.



# **1. Introducción y diseño conceptual del sistema de cargas vivas**

---

De acuerdo con el reglamento mexicano sobre pesos y dimensiones de vehículos (RPD), referencia 1, los de carga más pesados que se permiten circular en las **carreteras alimentadoras** (tipo D) son los denominados como C3 y C4; de éstos, los más comunes son los primeros. De hecho, se prevé que los segundos ya no serán autorizados en la actualización del reglamento, por lo cual **sólo los primeros** serán tomados en cuenta en este trabajo para realizar el diseño del sistema de cargas vivas.

Una de las conclusiones obtenidas en la referencia 2, es en el sentido de que un buen porcentaje de las cargas que transportan los camiones tipo C3 exceden notablemente a las máximas especificadas en el RPD, lo cual se confirma en este trabajo utilizando los datos de muestras captadas por la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT, sobre los pesos y dimensiones de este tipo de vehículo, durante los años 1993, 1994 y 1996.

En la referencia 3 se desarrolló un **modelo de cargas vivas vehiculares** para el diseño o revisión estructural de puentes que se ubiquen en carreteras tipos A, B y C (clasificación del RPD) de México. Debido a que éste se generó con base en información estadística sobre pesos y dimensiones de vehículos tipos T3-S3 y T3-S2-R4, es lógico que la aplicación de dicho modelo para el diseño de puentes **en carreteras alimentadoras**, en las que la circulación de estos vehículos **no está permitida**, dará como resultado que los elementos mecánicos para diseño – momentos flexionantes y fuerzas cortantes máximos – **sean demasiado grandes** y conduzcan, consecuentemente, a sobrediseñar los puentes y a costos mayores de la construcción.

Para verificar esto, en las figuras 1.1 y 1.2 se presentan los efectos del vehículo virtual (cargas concentradas) del modelo de cargas vivas antes referido, al aplicarse en puentes simplemente apoyados de 15 a 60m de claro. Asimismo, se muestran los valores más grandes que se obtuvieron al calcular los elementos mecánicos máximos en cada puente, al utilizarse como acciones a las cargas y separaciones de los ejes correspondientes a cada uno de los vehículos C3 de las muestras. En ambas figuras se aprecia que, en efecto, el nivel de sobrestimación es muy grande, tanto en momentos flexionantes como en fuerzas cortantes.

En las mismas figuras se observa que esto también ocurre al aplicar el modelo HL93 de cargas concentradas del actual reglamento para diseño de puentes de la AASHTO (referencia 4), así como el modelo de las normas canadienses de Ontario (OHBDC, referencia 5), por lo que **tampoco son adecuados** para diseñar puentes en carreteras alimentadoras en México.

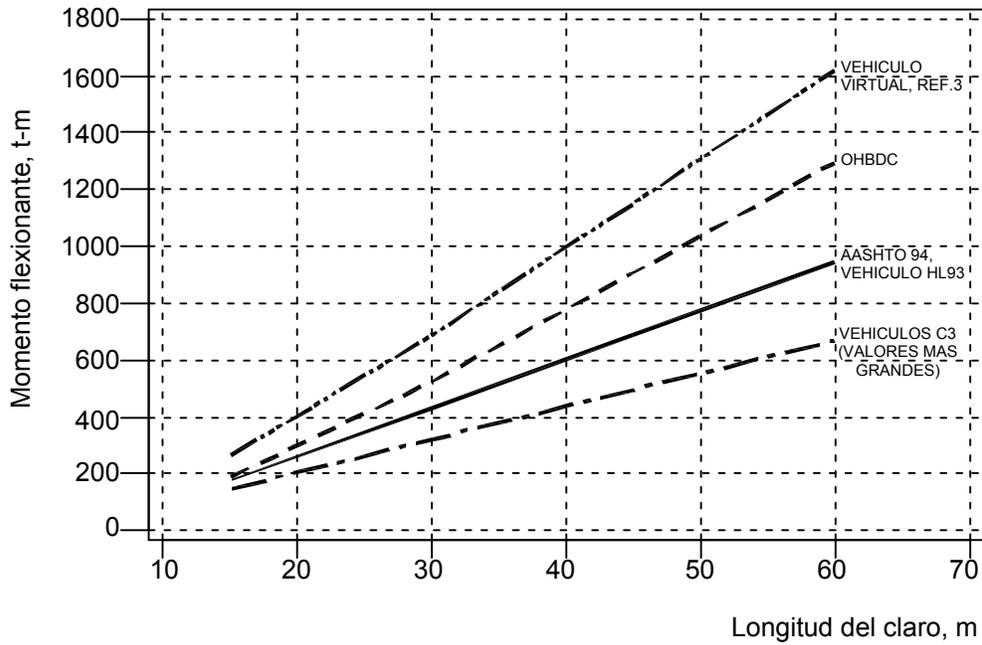


Fig. 1.1 Comparación de momentos flexionantes

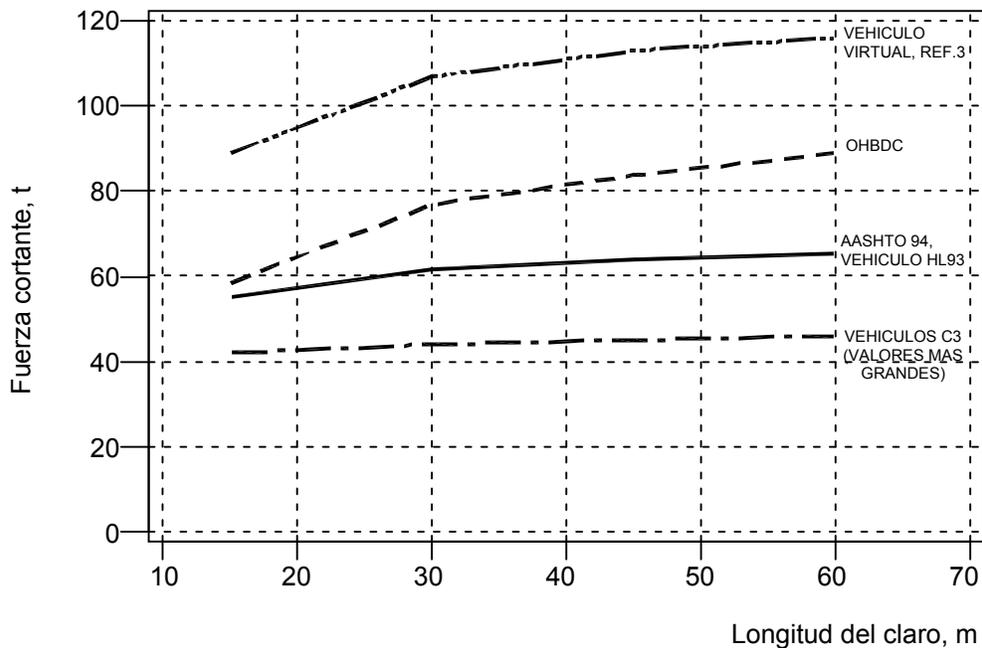


Fig. 1.2 Comparación de fuerzas cortantes

En los elementos mecánicos máximos que se calcularon con este último se incluye la contribución de la carga uniformemente repartida, en los tres se utiliza el respectivo factor de carga, pero en ninguno se considera el efecto dinámico.

Por lo anterior, se establece la necesidad de contar en México con un **modelo o sistema de cargas** que represente adecuadamente a los grandes pesos que transportan los vehículos C3, para fines del diseño o revisión estructural de los puentes que se ubiquen en carreteras alimentadoras (tipo D), de manera que se garantice un nivel de seguridad razonable (no excesivo). La formulación de dicho sistema de cargas, es la meta principal de este trabajo.

Para lograr lo anterior se plantearon los siguientes objetivos:

1. Realizar comparaciones de los elementos mecánicos más grandes que se obtengan con los datos de los vehículos C3 de la muestra, para varias longitudes de puente, con los que resultan de aplicar los modelos de cargas vivas establecidos en la referencia 3 y en las normas antes referidas, con el fin de **verificar su aplicabilidad para diseño estructural de puentes en carreteras alimentadoras**. En párrafos anteriores, en que se analizan las figuras 1.1 y 1.2, ya se presentaron algunas conclusiones al respecto.
2. Realizar el **diseño conceptual del sistema de cargas vivas**.
3. Estudiar estadística y probabilísticamente a las muestras de vehículos de carga tipo C3 que obtuvo la SCT en 1993, 1994 y 1996, en términos de los datos de las variables que más influyen en los **momentos flexionantes** y en las **fuerzas cortantes máximos** que ellos ocasionan a los puentes. Algunas de estas variables son las directamente muestreadas, pero otras son formuladas aquí en función de ellas, con el fin de **confirmar la topología y validar el sistema de cargas vivas**.
4. Calcular los valores máximos de los elementos mecánicos que son ocasionados por cada vehículo C3 en puentes de distintas longitudes, así como realizar análisis estadísticos y probabilísticos de todos ellos.
5. Realizar estudios estadísticos de las correlaciones que existen entre algunas de las variables más importantes, para identificar relaciones causa-efecto, en particular, entre las cargas y los elementos mecánicos que producen.

6. **Diseñar cuantitativamente el sistema de cargas vivas vehiculares, y validarlo** para que garantice un nivel de confiabilidad adecuado y, por tanto, pueda proponerse como norma o procedimiento para el análisis estructural de puentes que se ubiquen en carreteras alimentadoras en México y que, a la vez, sea congruente con los métodos y criterios de diseño estructural por estados límite.
7. Formular y adoptar algunos elementos normativos complementarios que se relacionan con las cargas vehiculares; principalmente, calcular los **factores de carga viva** que se deben utilizar en cada una de las **combinaciones de cargas** que se establecen en el reglamento de la AASHTO, para diseño estructural y para revisar por condiciones de servicio y fatiga. Con esto se logra, por una parte, que dicho código pueda seguir siendo aplicable en México, pero cambiando los conceptos que se obtienen al cumplir los objetivos 6 y 7 de este trabajo y, por otra, que las **cargas nominales del sistema de cargas vivas sean congruentes con las especificaciones del RPD.**

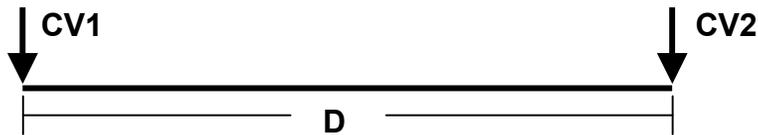
## 1.1 **Diseño conceptual del sistema de cargas vivas vehiculares**

Para diseñar el sistema de cargas vivas, en este trabajo se toma en cuenta que los reglamentos modernos para diseño estructural de puentes que existen en diversos países, utilizan los criterios de estados límites de resistencia, servicio y fatiga, los cuales involucran la participación simultánea de diversas combinaciones de cargas, cada una de éstas afectadas por los factores de carga correspondientes, así como la utilización de factores de resistencia.

Como punto de inicio para generar el diseño conceptual, se considera también que los modelos de cargas vivas que se establecen en dichos reglamentos, consisten en un **sistema de cargas concentradas**, cuyos efectos en los puentes son equivalentes a los que ocasiona un vehículo muy pesado que tiene pequeña probabilidad de presentarse, y en una **carga uniformemente repartida** cuyos efectos reproducen a los de una secuencia de vehículos pesados en un carril, uno tras otro, sobre un puente. El sistema que aquí se propone tiene también estos dos tipos de cargas.

Para diseñar el subsistema de cargas concentradas se plantea, como **hipótesis de partida**, que las dos cargas que se transmiten a través de los

ejes vehiculares que forman el tándem de los vehículos C3, pueden sustituirse por su resultante, para fines del análisis estructural, y obtenerse elementos mecánicos máximos que son estadísticamente equivalentes a los que se obtienen con las cargas que bajan por cada eje. Por tanto, se propone la siguiente topología, en vista lateral, para el **subsistema de cargas concentradas**:



De esta manera se crea un “**vehículo virtual**” (no existe) con dos “**cargas virtuales**”, CV1 y CV2, una por cada “**eje virtual**”, separadas por la distancia D.

En el cuerpo de este trabajo, **se demuestra que esta topología es correcta** y se cuantifican, mediante métodos probabilísticos y estadísticos, los valores de los tres componentes del subsistema de cargas concentradas, de manera que se logren niveles de seguridad estructural adecuados a las condiciones reales del tránsito vehicular en las carreteras alimentadoras de México.

Por su parte, el valor de la **carga uniformemente repartida** que se propone para el modelo, se obtiene mediante el proceso de simulación estocástica que se describe más adelante, procurando también un alto grado de confiabilidad.



## **2. Análisis estadístico de los datos básicos**

Las muestras que se utilizan en este trabajo para los análisis estadísticos y para desarrollar el sistema de cargas vivas para diseño de puentes, corresponden a los pesos y dimensiones que se midieron de los vehículos tipo C3 en 15 estaciones de aforo entre los años de 1993 y 1994, por una parte y, por otra, en 11 en 1996. Esta información fue captada por la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT y proporcionada al IMT, y corresponde a sitios ubicados en los tramos carreteros que se indican en la Tabla 1.

Los vehículos considerados aquí son sólo aquellos que no transitaban vacíos, siendo 11,267 en el primer caso y 7,512 en el segundo.

**TABLA 1 – Ubicación de las Estaciones de Aforo**

| No | NOMBRE        | UBICACION               |            | FECHA DE REALIZACION |      |
|----|---------------|-------------------------|------------|----------------------|------|
| 1  | Singuilúcan   | Pirámides-Tulancingo    | km 75+000  | Nov. 02-05           | 1993 |
| 2  | El Abra       | Cd. Valles-Tampico      | km 10+000  | Nov. 09-12           | 1993 |
| 3  | El Granero    | Cd. Victoria-Matamoros  | km 168+320 | Nov. 16-19           | 1993 |
| 4  | Las Lajas     | Monterrey-Reynosa       | km 115+500 | Nov. 23-26           | 1993 |
| 5  | Cebeta        | Cd. Victoria-Monterrey  | km 168+320 | Nov.30-Dic. 1º       | 1993 |
| 6  | CTO           | Cuencamé-Torreón        | km 172+200 | Dic. 07-10           | 1993 |
| 7  | Las Espuelas  | Mazatlán-Culiacán       | km 6+900   | Ene. 25-28           | 1994 |
| 8  | Glorieta      | Colima-Tecomán          | km 39+000  | Feb. 01-04           | 1994 |
| 9  | El Alamo      | Morelia-Salamanca       | km 11+000  | Feb. 15-18           | 1994 |
| 10 | Caseta        | Guadalajara-Zapotlanejo | km 21+000  | Feb. 22-25           | 1994 |
| 11 | Las Carolinas | Chihuahua-Cd Juárez     | km 16+000  | Mar. 08-11           | 1994 |
| 12 | Asunción      | Huajuapán-Oaxaca        | km 174+800 | Sep. 06-09           | 1994 |
| 13 | Jiquilpan     | Jiquilpan-Sahuayo       | km 2+200   | Feb. 09-11           | 1994 |
| 14 | Jajalpa       | México-Toluca           | km 43+000  | Mar. 22-25           | 1994 |
| 15 | Zapotlanejo   | Guadalajara-Zapotlanejo | km 21+000  | Mar. 01-04           | 1994 |
| 16 | Champton      | Escárcega-Champton      | km 80+000  | Sep 24 -27           | 1996 |
| 17 | Villamar      | Cd. del Carmen-Campeche | km 132+000 | Sep 24 -27           | 1996 |
| 18 | El Rodeano    | La Tinaja-Santa Cruz    | km 18+000  | Oct 01 - 04          | 1996 |
| 19 | Cosamaloapan  | La Tinaja-Minatitlán    | km 60+925  | Oct 01 - 04          | 1996 |
| 20 | Tejada        | Paso del Toro-Acayucan  | km 80+850  | Oct 08 -11           | 1996 |
| 21 | La Ventosa    | La Ventosa-Tapanatepec  | km 0+200   | Oct 15 - 18          | 1996 |
| 22 | El Viejón     | Poza Rica-Veracruz      | km 76+000  | Oct 15 - 18          | 1996 |
| 23 | Calpulalpan   | Los Reyes-Zacatepec     | km 60+925  | Oct 22- 25           | 1996 |
| 24 | Atlacomulco   | Toluca-Palmillas        | km 56+100  | Oct 29-Nov 1º        | 1996 |
| 25 | Coixtlahuaca  | Cuacnopalan -Oaxaca     | km 142+300 | Nov 05 - 08          | 1996 |
| 26 | Telixtlahuaca | Tehuacán-Huitzo         | km 200+000 | Nov 05 - 08          | 1996 |

Los datos básicos que se utilizan corresponden a las variables aleatorias “**peso bruto**”, “**peso del eje  $i$ ,  $i = 1, 2$  y  $3$** ” y “**separación entre cada par de ejes**”. Con éstas, se generan más adelante otras variables aleatorias que corresponden al “**peso del tándem**” y a los elementos mecánicos (**momentos flexionantes y fuerzas cortantes máximos**) que los vehículos producen en puentes de distintas longitudes, idealizados como vigas simplemente apoyadas.

Para extraer los datos que son útiles para este estudio, como parte del trabajo de la referencia 3, se elaboró un programa de cómputo que clasifica a los vehículos que tienen la misma configuración y formula subconjuntos de datos para cada una de las características. La clasificación que se utiliza es la especificada en el RPD.

Las características vehiculares que son útiles para esta investigación son el peso bruto vehicular, el peso de cada uno de los ejes y las separaciones de cada par de ejes consecutivos de los vehículos C3. Puesto que los valores que se asocian a cada una de estas características no pueden predecirse con certeza para cada vehículo antes de ser medidos, se tiene que cada característica es en sí una **variable aleatoria**, cuyo comportamiento puede estudiarse mediante métodos estadísticos y probabilísticos.

Una vez que se clasifican los datos, son exportados al programa de cómputo que también se elaboró ex-profeso para el estudio de la referencia 3, que sirve para calcular el **momento flexionante y la fuerza cortante máximos**, que cada vehículo registrado produce en un puente simplemente apoyado, cuya longitud se asigna según se requiera. Dicho programa se llama MCmax.

Para cada longitud de puente seleccionada, se conforma así una colección de valores correspondiente a cada uno de los dos elementos mecánicos antes mencionados, integrando “subconjuntos de datos” derivados de los datos vehiculares originales. Cada subconjunto corresponde a un tipo de vehículo, un tipo de elemento mecánico y una longitud de puente. Por tanto, cada uno de estos nuevos subconjuntos de datos corresponden a una nueva variable aleatoria, cuyo comportamiento también es estudiado aquí estadística y probabilísticamente.

Los análisis estadísticos que se realizan en este capítulo son de naturaleza descriptiva, para conocer el comportamiento de cada muestra y hacer comparaciones con los valores máximos permitidos en el RPD.

## 2.1 Análisis estadístico del peso bruto vehicular

Toda vez que una de las variables vehiculares importantes es el “**Peso Bruto**” (PB), tanto porque se encuentra normada en el RPD como porque éste se distribuye entre los ejes de rodamiento que transmiten la carga al pavimento o al puente, resulta interesante y útil conocer su comportamiento estadístico y probabilístico.

En la figura 2.1 se muestran las distribuciones de frecuencias relativas acumuladas de las muestras del peso bruto de 1993-94 (integradas en una sola) y 1996, de los vehículos C3 (los valores fueron redondeados a las unidades). En ella se observa que las curvas correspondientes se parecen bastante entre sí y que el valor máximo que permite el RPD, de 26t, se excede con bastante frecuencia: 34.7% en la primera muestra y 26.1% en la segunda.

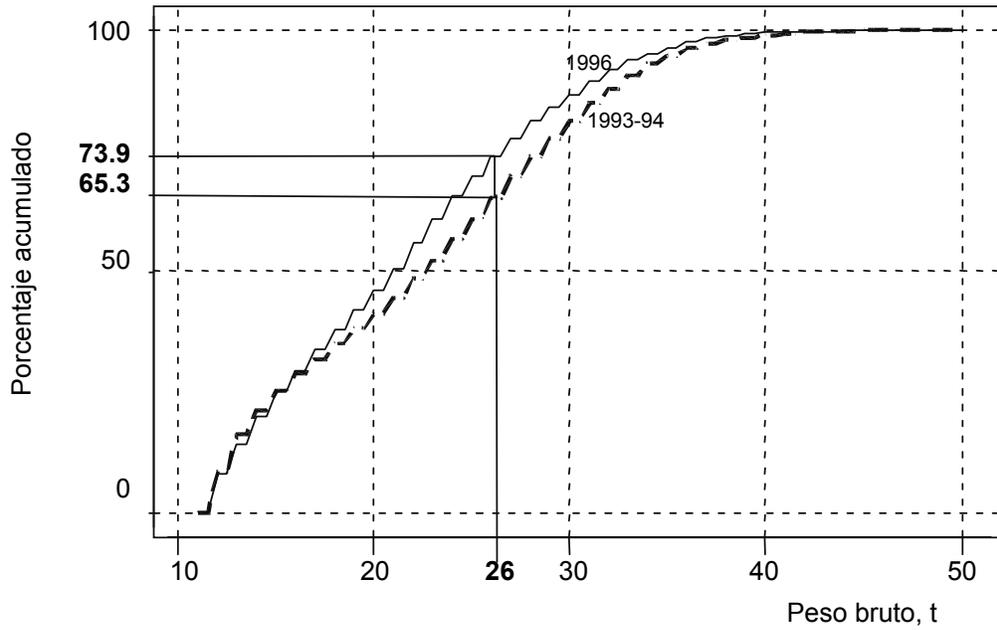
Al conjuntar ambas muestras en una sola, se obtiene la distribución que se presenta en la figura 2.2, en la que se aprecia una excedencia global de 31.8%.

En la figura 2.3 se presenta el histograma de la muestra del peso bruto de los tres años, con los parámetros descriptivos usuales. Si bien el promedio de 22.4t no es mayor que 26t, no es éste el valor clave para justificar que las solicitudes de la carga viva no son excesivas, sino los valores individuales que lo sobrepasan, teniendo un máximo de 50t, que es casi el doble de lo permitido (1.92 veces).

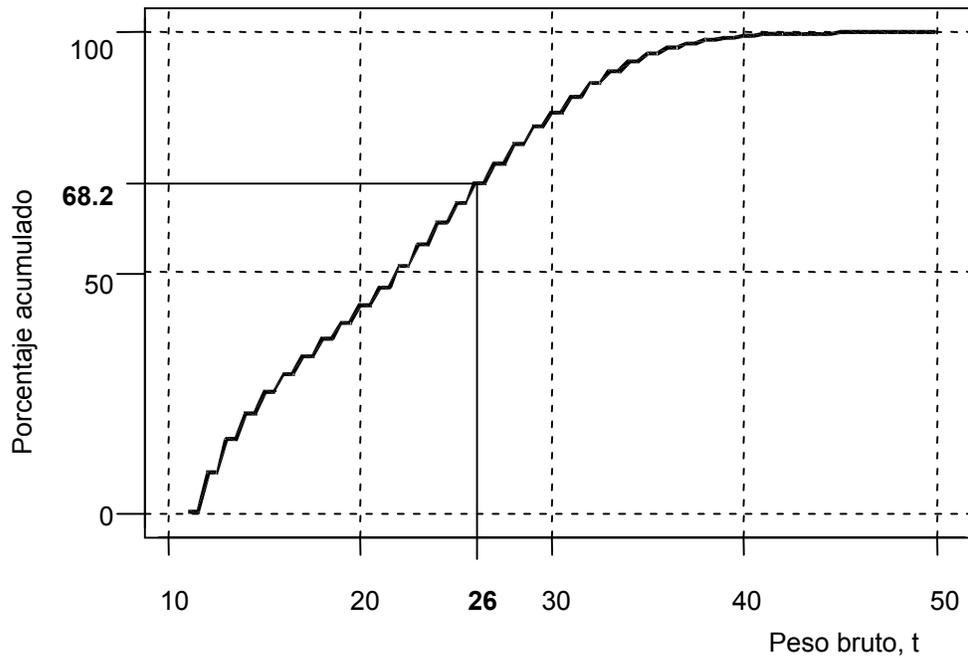
Al observar la forma del histograma se aprecia que se tienen dos jorobas (es bimodal); la primera de ellas, en valores pequeños, posiblemente se asocia con camiones pequeños y con vehículos mayores semicargados o con mercancías de bajo peso volumétrico, en tanto que la segunda, en valores intermedios, se relaciona más con los vehículos a plena carga. Este razonamiento servirá también para justificar la ley de probabilidades que se adoptará para estudiar a esta variable aleatoria, la cual tiene una sola joroba.

## 2.2 Análisis estadístico de los pesos del tándem y del eje delantero

El análisis estadístico de los pesos en los ejes 2 y 3 se realiza sumando sus valores para cada vehículo C3, con lo cual se generan datos de una nueva variable aleatoria “**peso del tándem**”.



**Fig. 2.1** Distribución de frecuencias relativas acumuladas



**Fig. 2.2** Distribución de frecuencias relativas acumuladas

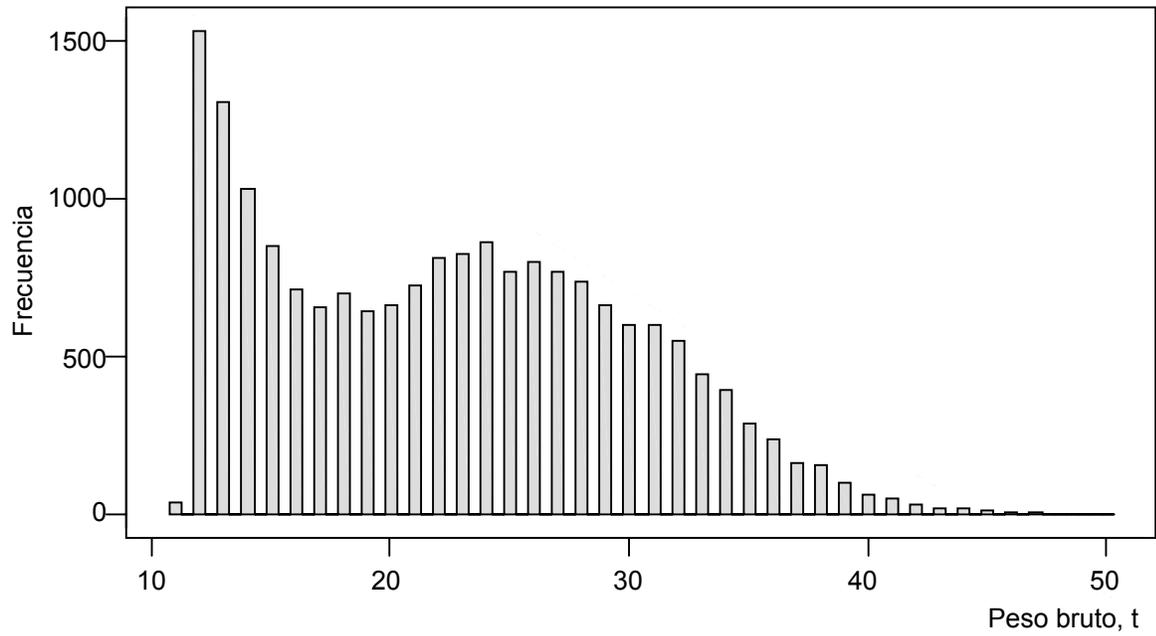


Fig. 2.3 Histograma del peso bruto

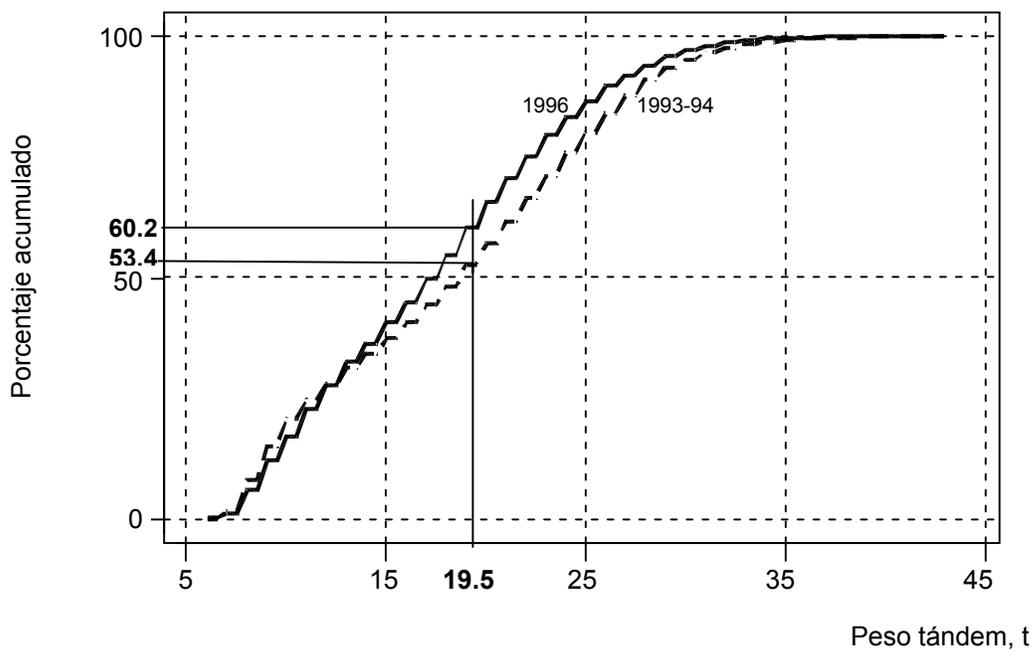


Fig. 2.4 Distribución de frecuencias relativas acumuladas

Esto se hace así en virtud de que, como se verá más adelante, esta variable aleatoria se correlaciona muy bien con cada uno de los elementos mecánicos máximos que cada vehículo le ocasiona a puentes simplemente apoyados, por lo cual será utilizada para calcular la carga virtual CV2 del subsistema de cargas concentradas que se diseña en este trabajo, en lugar de los pesos individuales de los ejes 2 y 3.

En la figura 2.4 se presentan las distribuciones de frecuencias relativas acumuladas de los datos del peso del tándem de 1993-94 y 1996, en la cual se aprecia que se parecen bastante entre sí; asimismo, que el valor máximo permitido en el RPD, de 19.5t, se excede en el 46.6% de los datos de la primera muestra y en el 39.8% de los de la segunda.

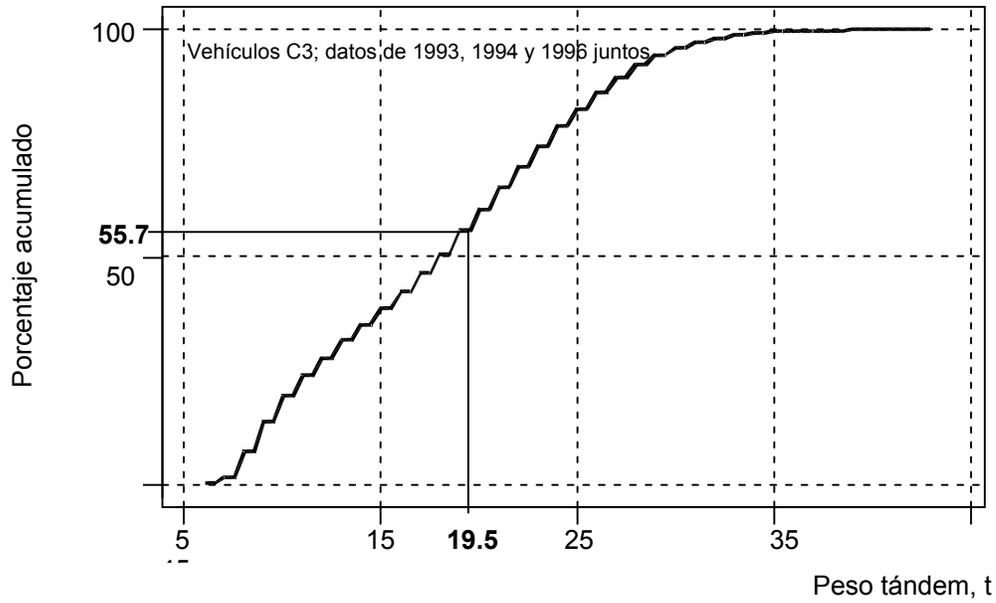
Al integrar todos los datos en una sola muestra, se obtiene la distribución que se presenta en la figura 2.5. En este caso la frecuencia de excedencia es de 44.3%.

En la figura 2.6 se tiene el histograma de la muestra integrada, la cual también es bimodal, por las mismas razones antes expuestas para el peso bruto. En este caso el promedio de 18.2t no excede al 19.5t permitido, se cubre un amplio rango, de 6.0t a 43.0t, y el valor más grande es más del doble (2.2 veces) que el del reglamentado.

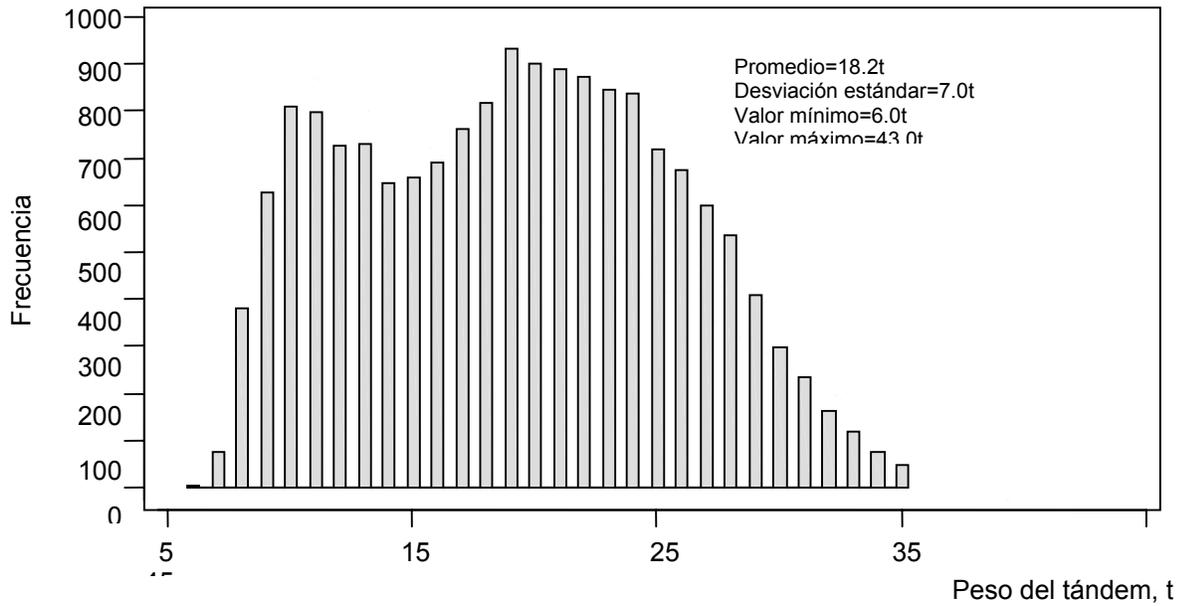
Por otra parte, en la figura 2.7 se presenta la distribución de frecuencias relativas acumuladas correspondiente a la muestra globalizada del **peso del eje 1** (delantero). En este caso la frecuencia de excedencia del valor reglamentado de 6.5t es tan solo del 2.3%, y se cubre un rango de 1 a 12 toneladas.

En lo que se refiere a las **distancias entre los ejes**, se obtuvo que del eje 1 al 2 se tiene un promedio de 5.0m y, del 2 al 3, de 1.3m.

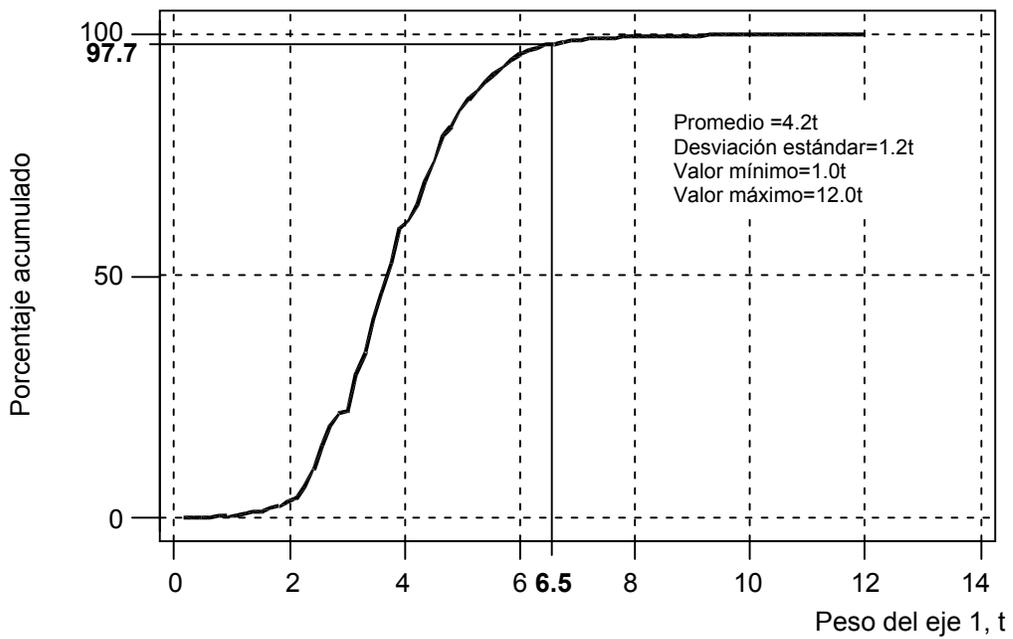
Los resultados y conclusiones de este capítulo inducen a prever que un buen porcentaje de los vehículos C3 que transitan por las carreteras mexicanas, producen a los puentes elementos mecánicos que son mucho mayores que los que ocasionan aquellos que se ajustan a las normas del RPD. Esto, aunado a lo concluido en el capítulo 1, confirma y refuerza la necesidad de **desarrollar un sistema de cargas vehiculares** que tome en cuenta los grandes pesos de los vehículos C3 y, por tanto, sea adecuado para el diseño de los puentes que se construyan en las carreteras alimentadoras, o para revisión de los existentes, lo cual se hace en este trabajo.



**Fig. 2.5 Distribución de frecuencias relativas acumuladas**



**Fig. 2.6 Histograma del peso del tándem**



**Fig. 2.7 Distribución de frecuencias relativas acumuladas**

### **3. Análisis de correlación y regresión lineal múltiples**

---

Para formular la topología del subsistema de cargas concentradas que modele a las cargas vivas vehiculares tipo C3, se aprovechó el antecedente que se estableció en la referencia 3, en el sentido de que los pesos de los ejes que forman tandems, trídems y dobles tandems pueden sustituirse por las fuerzas resultantes en cada grupo de ejes, para calcular los elementos mecánicos máximos que los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4 ocasionan en los puentes.

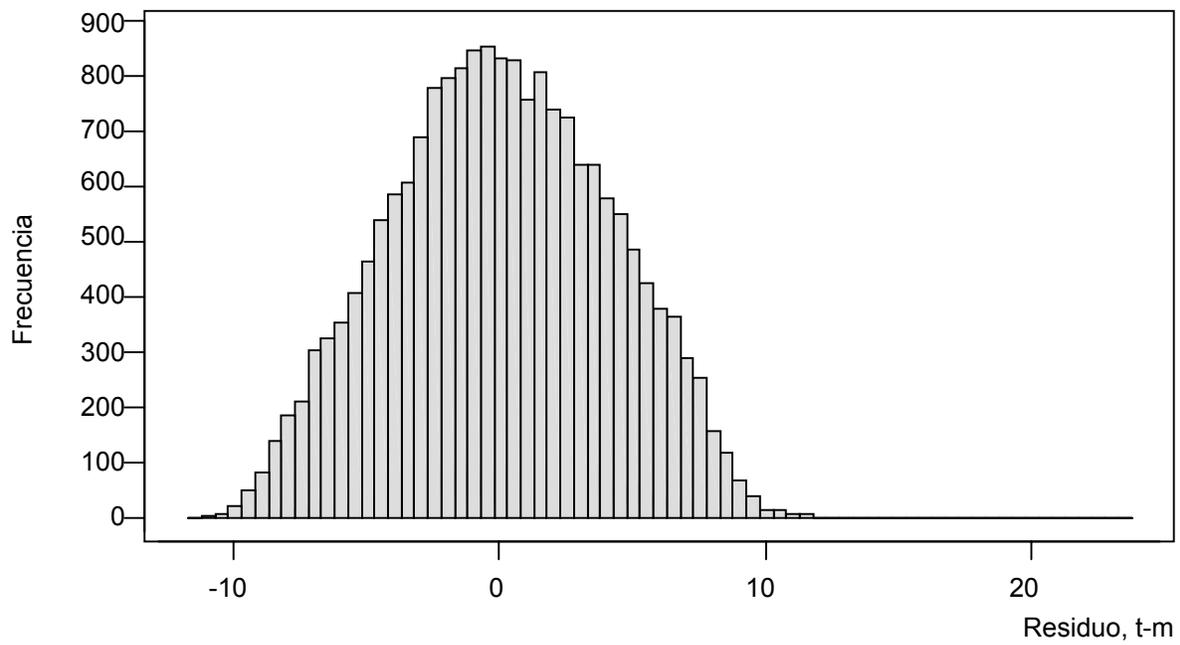
Para comprobar que esto se aplica también para los vehículos C3, se realizaron análisis estadísticos de correlación y regresión múltiples de los momentos flexionantes, M, y las fuerzas cortantes, V, máximos que cada vehículo de la muestra produce en puentes de diversas longitudes (15, 30 y 45m), idealizados como simplemente apoyados, utilizando como variables básicas al **peso del tandem**, PT, al **peso del eje 1**, PE1, y a la **separación entre los ejes 1 y 2**, DE1. La enorme cantidad de cálculos de los elementos mecánicos antes mencionados, 75,116 casos, se realizó con el programa de cómputo MCmax que se desarrolló para los trabajos de la referencia 3.

Los análisis de correlación y regresión múltiples se efectuaron con cada uno de los elementos mecánicos asociados a cada longitud de puente. En el caso del momento flexionante máximo ocasionado en puentes de 45m de claro, M45, la regresión múltiple, con los datos de 1993-94 y 1996 juntos, resultó con la siguiente ecuación:

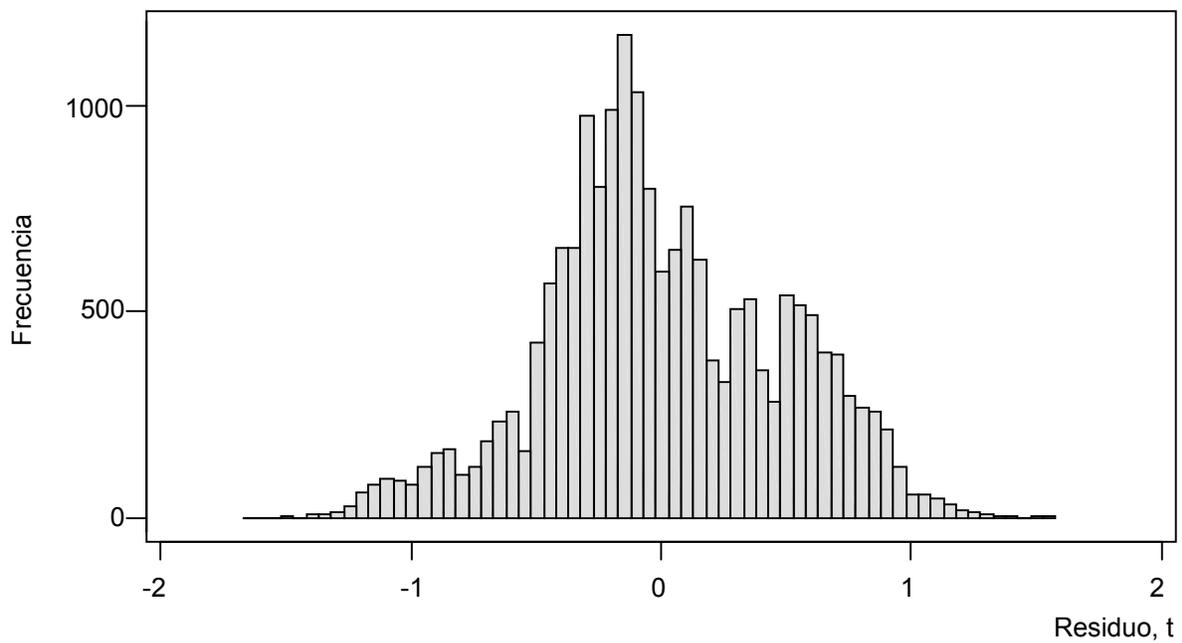
$$M45 = 14.6 + 10.9 PT + 8.02 PE1 - 2.29 DE1 \quad (1)$$

El coeficiente de regresión lineal que se obtuvo, R, es altísimo, del 99.85%, y los residuos (valores reales menos los predichos por la ecuación 1) son muy bajos, de -12 a +13t-m, comparados con los valores que asume M45, de 100 a más de 500 t-m, como se aprecia en el histograma de la figura 3.1.

Por otra parte, en todos los análisis de regresión múltiple se obtuvo, como era de esperarse, que la variable "**peso del tandem**" es la que más influencia tiene sobre la variable M45, ya que explica el 98.51% de la suma de cuadrados del análisis de variancia de la recta de predicción, en tanto que PE1 y DE1 explican tan solo el 1.21% y 0.02%, respectivamente, y la del residuo o error explica el 0.26%. En la siguiente tabla se presentan los resultados de todos los casos estudiados, notándose en ellos el mismo patrón de alta correlación y de predominio de PT, antes señalado.



**Fig. 3.1 Histograma de los residuos de M45**



**Fig. 3.2 Histograma de residuos de V45**

| Elemento mecánico | R, %  | Porcentaje explicado |      |      |       |
|-------------------|-------|----------------------|------|------|-------|
|                   |       | PT                   | PE1  | DE1  | Error |
| M45               | 99.85 | 98.51                | 1.21 | 0.02 | 0.26  |
| M30               | 99.85 | 98.78                | 0.93 | 0.04 | 0.25  |
| M15               | 99.85 | 99.29                | 0.25 | 0.18 | 0.28  |
| V45               | 99.80 | 98.16                | 1.42 | 0.00 | 0.42  |
| V50               | 99.80 | 98.32                | 1.24 | 0.01 | 0.43  |
| V15               | 99.80 | 98.86                | 0.69 | 0.04 | 0.41  |

Por otra parte, en la figura 3.2 se presenta el histograma de los residuos del análisis de regresión lineal múltiple, realizado con todos los datos, para la fuerza cortante máxima asociada a puentes con claro de 45m, V45, en la que se observa que éstos se encuentran en el rango de  $-1.5$  a  $+1.6$ , que son valores bastante pequeños. En este caso la ecuación que resultó es:

$$V45 = 0.78 + 0.988 PT + 0.783 PE1 - 0.103 DE1 \quad (2)$$

Las ecuaciones que se obtuvieron para los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos, que se calcularon para puentes de 30m y 15m son:

$$M30 = 13.6 + 7.16 PT + 4.61 PE1 - 2.32 DE1 \quad (3)$$

$$M15 = 12.5 + 3.39 PT + 1.22 PE1 - 2.32 DE1 \quad (4)$$

$$V30 = 1.1 + 0.979 PT + 0.725 PE1 - 0.162 DE1 \quad (5)$$

$$V15 = 1.8 + 0.958 PT + 0.535 PE1 - 0.330 DE1 \quad (6)$$

Como ilustración, en las figuras 3.3 a 3.6 se presentan las gráficas de regresión lineal simple de M45, M15, V45 y V15 versus PT, calculadas con todos los datos, en las que se aprecia un magnífico ajuste de las líneas rectas que se obtuvieron.

Por lo anterior, se concluye que la variable aleatoria “**peso del tándem**” es la más importante, al producir la mayor parte de los efectos máximos que cada vehículo le ocasiona a un puente, lo cual, sin duda, confirma lo que el sentido común puede prever. Por tanto, se justifica que en el diseño conceptual del subsistema de cargas concentradas, mismo que se calcula en el siguiente capítulo, se utilice a esta variable en representación de los pesos de los ejes 2 y 3.

### 3. Análisis de correlación y regresión lineal múltiples

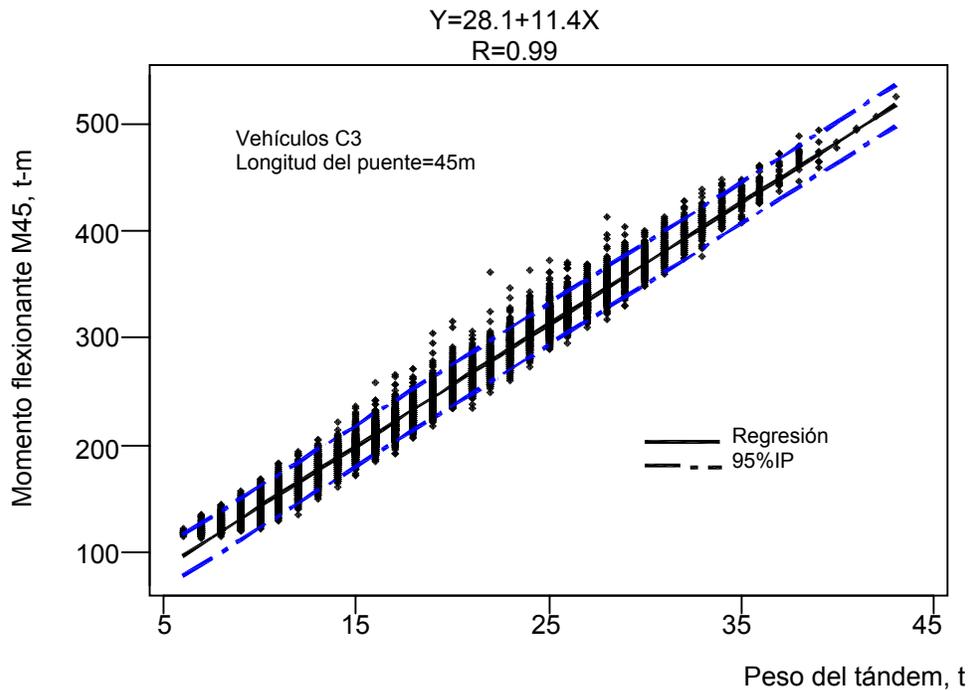


Fig. 3.3 Regresión entre el momento flexionante y el peso del tándem

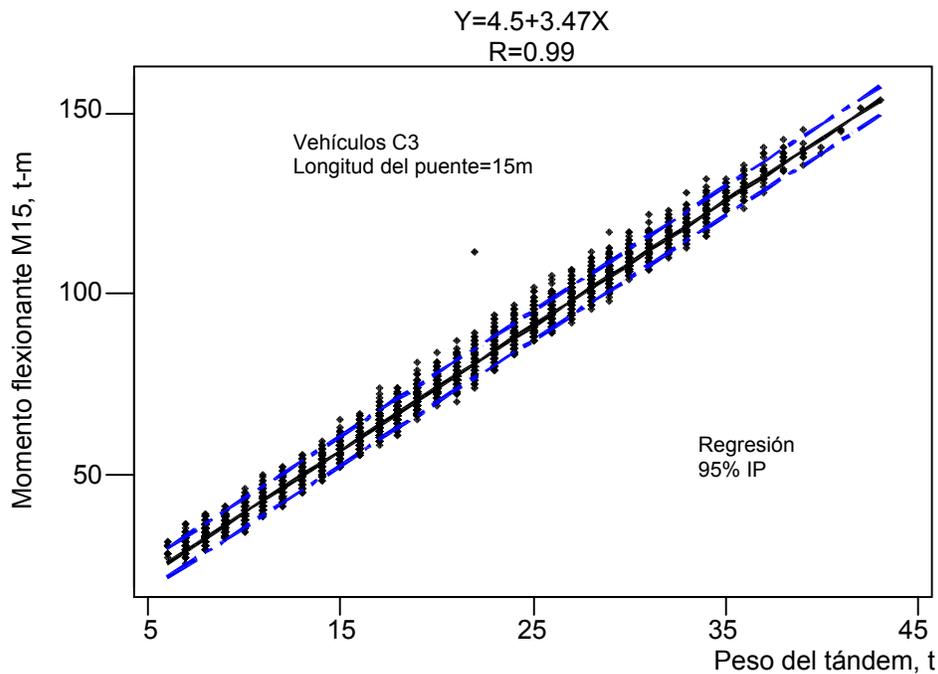


Fig. 3.4 Regresión entre el momento flexionante y el peso del tándem

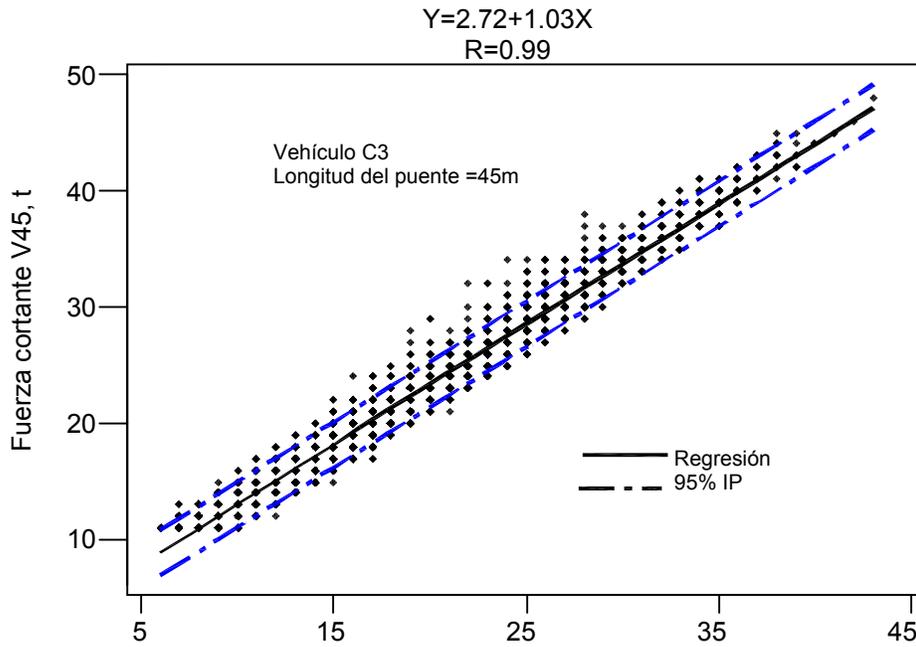


Fig 3.5 Regresión entre la fuerza cortante y el peso del tándem

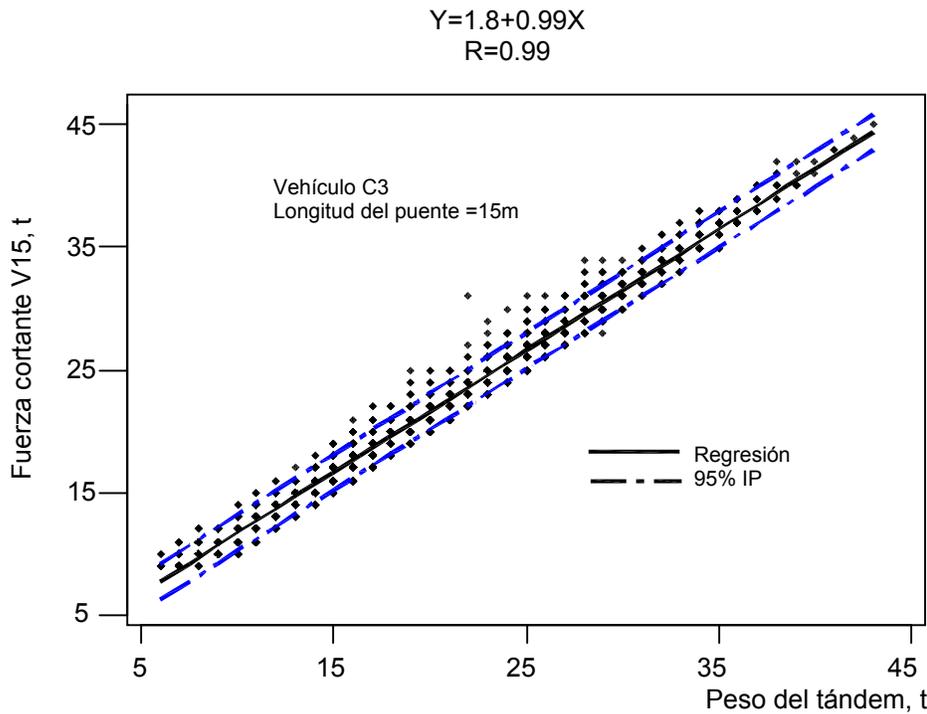


Fig 3.6 Regresión entre la fuerza cortante y el peso del tándem



## 4. Método para calcular y validar el sistema de cargas vivas

---

Con base en los resultados y conclusiones de los análisis estadísticos y de regresión realizados en los capítulos anteriores, y adoptando la filosofía que prevalece en los reglamentos de diversos países, el diseño conceptual que se estableció aquí para el sistema de cargas vivas vehiculares involucra dos subsistemas:

**El primero se conforma con dos cargas concentradas con diferentes magnitudes; el segundo tiene una carga uniformemente distribuida. Ambos se aplican a lo largo del carril de circulación, el cual se asume de 3.0m de ancho, y sus efectos son aditivos, al aplicarse en las posiciones más desfavorables, para calcular los elementos mecánicos y las deformaciones que ocasionan.**

El subsistema de dos cargas concentradas representa a un “**vehículo virtual**” (no existe), cuyas magnitudes se calculan para que ocasionen elementos mecánicos máximos **equivalentes** a los que producirían los vehículos reales C3 muy pesados, de manera que tengan una **pequeñísima probabilidad** de ser excedidos en el lapso de vida útil previsto para un puente.

Por su parte, el subsistema de carga uniforme ocasiona elementos mecánicos que, **sumados** a los que produce el vehículo virtual, corresponden a los que causa una secuencia de vehículos pesados C3 que pueden circular muy próximos entre sí, uno tras otro, con baja probabilidad, a lo largo de un puente.

Las **magnitudes** de las dos **cargas virtuales** concentradas se calculan realizando diversos **análisis probabilísticos de riesgos de excedencia**, que se presentan en el siguiente capítulo, de manera que garanticen que al aplicarse para diseñar o revisar un puente, se logre un **alto nivel de seguridad estructural**. La separación entre ellas se propone con base en resultados estadísticos.

Con fundamento en las conclusiones de los análisis de regresión múltiple, se confirma la validez del subsistema de cargas concentradas que se propone para modelar a los pesos vehiculares, para fines del diseño estructural de los puentes que se ubiquen en carreteras alimentadoras, el cual tendrá sólo dos cargas virtuales CV1 y CV2 (y no tres reales, como el vehículo C3), con una separación fija entre ellas; es decir, se establece que tenga la siguiente topología:

#### 4. Método para calcular y validar el sistema de cargas vivas

---



La carga virtual CV1 representa al peso que transmite el eje delantero, en tanto que CV2 corresponde al peso del tándem.

Con el fin de calcular los valores CV1, CV2 y D, que deben asignarse a cada una de las variables aleatorias que participan en el sistema de cargas vivas para diseño, y quede definido éste en términos cuantitativos, como parte de esta investigación se empleó la siguiente metodología, la cual fue adoptada de las referencias 3 y 6:

1. Determinar las leyes de probabilidades que pueden representar adecuadamente el carácter aleatorio de las variables **peso del tándem**, PT, y **peso bruto**, PB, con el fin de realizar los respectivos análisis probabilísticos de riesgos de excedencia.
2. Con base en las leyes de probabilidades que se asignen, calcular los valores CV2 y PBV que corresponden a PT y PB, respectivamente, de manera que éstos sólo puedan ser rebasados en un lapso de vida útil del puente con una probabilidad muy baja que se establezca; es decir, que el riesgo de excedencia sea muy pequeño. Con éstos se obtiene luego a CV1, mediante la ecuación:  $CV1 = PBV - CV2$ .
3. Asignar, con base en los resultados estadísticos, el valor de la separación, D, que se proponga entre las dos cargas.
4. Escalar las cargas virtuales, multiplicándolas por un factor reductivo igual a 0.788, que resulta de dividir el valor máximo del peso bruto que permite el RPD para camiones C3 en carreteras alimentadoras (20.5t) entre el que autoriza para carreteras principales (26.0t), ya que los datos vehiculares fueron captados en estas últimas y el subsistema de cargas se utilizará en las primeras. Con esto se obtienen nuevos valores de CV1 y CV2.
5. Calcular el **factor de carga viva vehicular básico** y generar el **subsistema de cargas concentradas virtuales nominales** del sistema, en congruencia con el peso bruto máximo establecido en el RPD para carreteras alimentadoras (20.5t).

6. Con el fin de valorar el subsistema, determinar las leyes de probabilidades que pueden representar razonablemente a las variables aleatorias “**momentos flexionantes**” (M45, M30 y M15) y “**fuerzas cortantes**” **máximos** (V45, V30 y V15), asociadas a las cargas de los vehículos C3 en los puentes simplemente apoyados de 45, 30 y 15m de claro.
7. Determinar los valores de cada una de dichas variables que corresponden a una probabilidad muy pequeña de que **sean excedidos en el lapso previsto de vida útil del puente**. Esta probabilidad es igual a la que se utilice para calcular a CV1, CV2 y PBV, en el punto 2.
8. Calcular los valores de los mismos elementos mecánicos, empleando las ecuaciones de las respectivas regresiones múltiples, haciendo  $PT = CV2$ ,  $PE1 = CV1$  y  $DE1 = D$  (valores de las cargas virtuales nominales) y multiplicando los resultados por el factor de carga viva básico.
9. Aplicar a los mismos puentes, referidos en el punto 4, el subsistema de cargas virtuales nominales concentradas, calcular los elementos mecánicos máximos y multiplicarlos por el factor de carga viva básico; validar los resultados comparándolos con los determinados en los puntos 7 y 8. En caso necesario, hacer ajustes al subsistema.
10. Calcular la magnitud de la **carga virtual uniformemente repartida**, que constituye el segundo subsistema de cargas del modelo, mediante un proceso de simulación estocástica.
11. Comparar los resultados de aplicar el sistema de cargas vivas vehiculares que aquí se desarrolla, con los que se obtienen al utilizar los que se especifican en los reglamentos de la AASHTO-94 y OHBDC, incorporando en cada caso los factores de carga viva y de impacto respectivos.



## 5. Cálculo del subsistema de cargas concentradas

---

Debido a que, como ya se demostró, la variable aleatoria PT es la más importante del modelo conceptual del subsistema de cargas concentradas, en este capítulo se estudiará su comportamiento probabilístico y, con base en él, se calculará el valor de ésta, CV2, que **garantice un alto nivel de confiabilidad**; es decir, que tenga una baja probabilidad de ser excedido en el lapso de vida útil que se desee para el puente que se va a diseñar o revisar, al cual corresponde un **número esperado**, N, de vehículos C3.

Por su parte, el valor que se calcule para CV1 dependerá del análisis probabilístico que se hará para la variable aleatoria “**peso bruto**”, PB, semejante al descrito para PT, con el cual se obtendrá el **peso bruto virtual**, PBV, por lo que  $CV1 = PBV - CV2$ .

Para terminar, a D se le asignará un valor basado en los promedios de las separaciones entre los ejes.

Con el propósito de encontrar una distribución de probabilidades que modele razonablemente el comportamiento aleatorio de la variable PT, se hicieron intentos de ajuste de varias leyes de probabilidades a las frecuencias relativas acumuladas de los datos de PT; se probaron la normal, la log-normal y la de Weibull, habiendo resultado esta última como la de mejor congruencia. Todos los cálculos se hicieron con el paquete de cómputo **MINITAB**.

La ecuación de la **densidad de probabilidades de Weibull**, asociada a la variable aleatoria x, es:

$$f(x) = \alpha \beta x^{\beta-1} e^{-\alpha x^\beta}$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros cuyos valores se calculan con base en los datos de una muestra de la variable x.

Se puede demostrar que la gráfica de la distribución de probabilidades acumuladas de Weibull, F(x), **es una línea recta** en un sistema de ejes ortogonales, en que la escala del eje horizontal es proporcional a  $\ln x$  y la del vertical es proporcional a  $\ln \ln (1 / (1 - F(x)))$ , en donde  $\ln$  denota logaritmo natural (escalas de Weibull).

Por tanto, si la secuencia de puntos que define a una distribución de frecuencias relativas acumuladas, trazada en el sistema de ejes antes

mencionado, se alinea razonablemente a lo largo de una recta, a la variable aleatoria correspondiente se le puede modelar probabilísticamente con la ley de Weibull, la cual resulta de calcular la ecuación de la recta que mejor se ajuste a la secuencia de puntos (por el método de mínimos cuadrados) y, con ella, obtener los valores de  $\alpha$  y  $\beta$ .

En el contexto de este trabajo,  $F(x)$  es la **función de confiabilidad**, y da las **probabilidades de no excedencia**, y  $G(x)=1-F(x)$  es la **función de riesgo**, y da las **probabilidades de excedencia**. Por consiguiente, si se asignan dichas probabilidades, como se hace en las siguientes secciones, con  $F(x)$  o  $G(x)$  se puede calcular el valor de  $x$  (percentil) que les corresponde.

Para justificar objetivamente que los datos disponibles de los vehículos tipo C2 no se tomaran en cuenta en el desarrollo del sistema de cargas vivas, en la figura 5.1 se comparan las rectas que representan a las distribuciones de Weibull que se ajustaron, por mínimos cuadrados, a las secuencias de puntos que representan a las distribuciones de frecuencias relativas acumuladas del momento flexionante máximo M45, las cuales se calcularon para un puente de 45m de claro con los datos vehiculares de la muestra de 1993-94, correspondientes a los vehículos C2 y C3. Es evidente, al comparar las rectas, que la asociada a los vehículos C3 tiene valores bastante mayores en cada probabilidad de no excedencia (porcentaje acumulado), por lo cual los camiones C2 no necesitan tomarse en cuenta.

## 5.1 Determinación del valor de CV2

Para calcular el valor CV2 que garantice un alto nivel de confiabilidad, es decir, que tenga una pequeña probabilidad de excedencia, se procedió primero a realizar el ajuste por mínimos cuadrados de la distribución de Weibull a la variable aleatoria correspondiente, PT.

En la figura 5.2 se presentan las secuencias de puntos que corresponden a las frecuencias relativas acumuladas de los valores de PT, trazadas en escalas de Weibull, que se calcularon con las muestras de 1993-94 y 1996, en la cual se nota que ambas se parecen mucho entre sí, por lo que es razonable conjuntar las dos muestras en una sola. También se observa que del percentil 40 en adelante se alinean en forma casi recta.

Al reunir los datos, se obtiene el ajuste de la recta que se presenta en la figura 5.3, en la cual se aprecia que se tiene muy buena concordancia entre los puntos y la recta que representa a la distribución de Weibull, en el rango

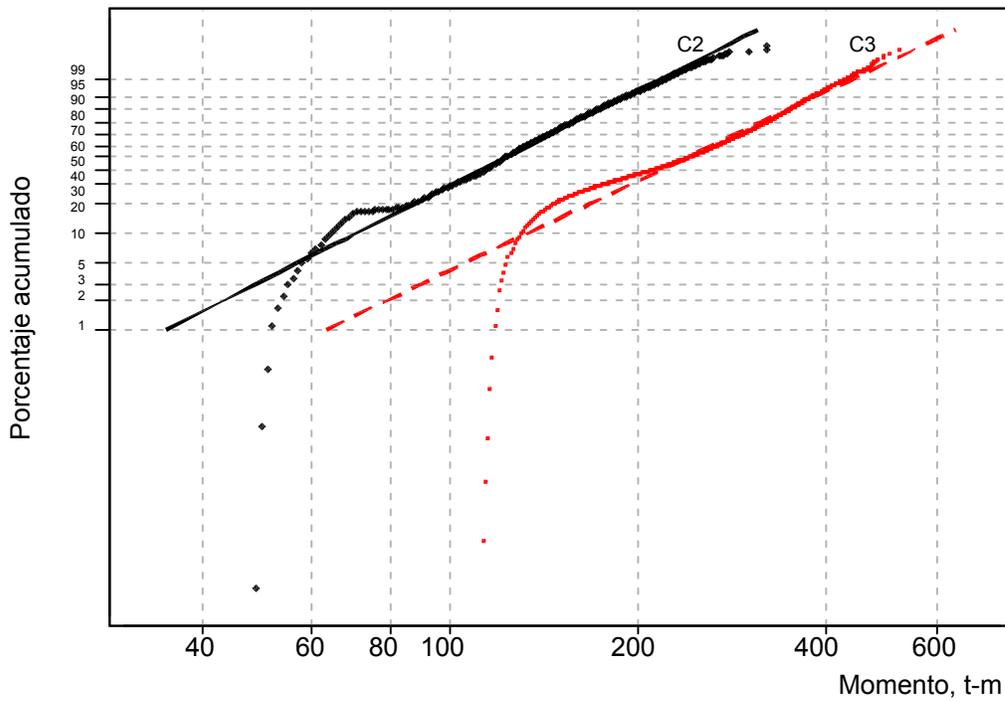


Fig. 5.1 Distribución de Weibull para M45. Datos de 1993-94

## 5. Cálculo del subsistema de cargas concentradas

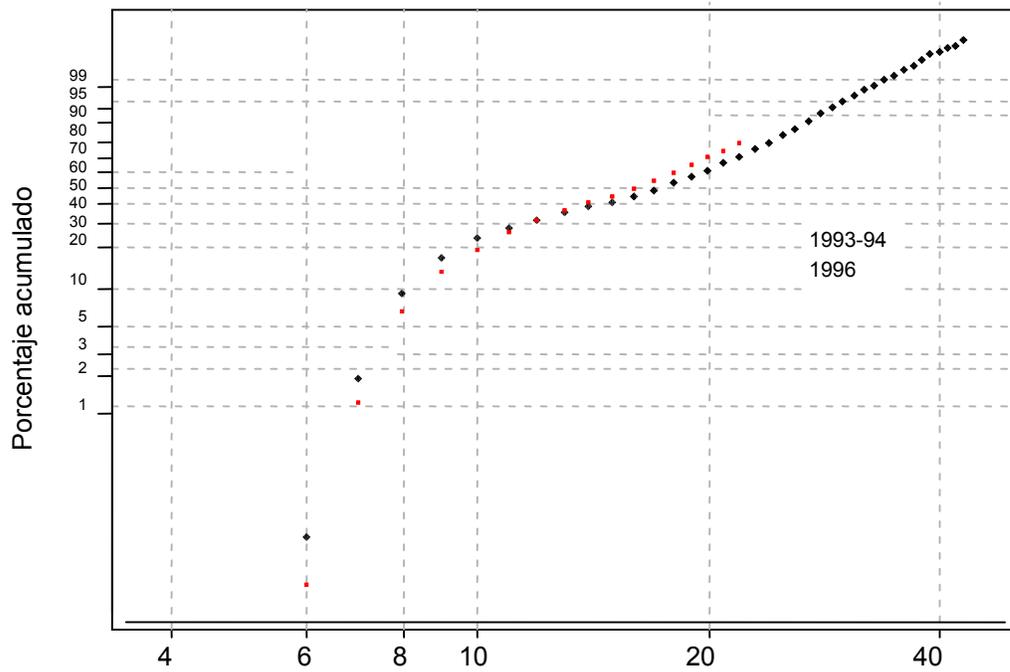


Fig. 5.2 Frecuencias relativas acumuladas del PT en escalas de Weibull

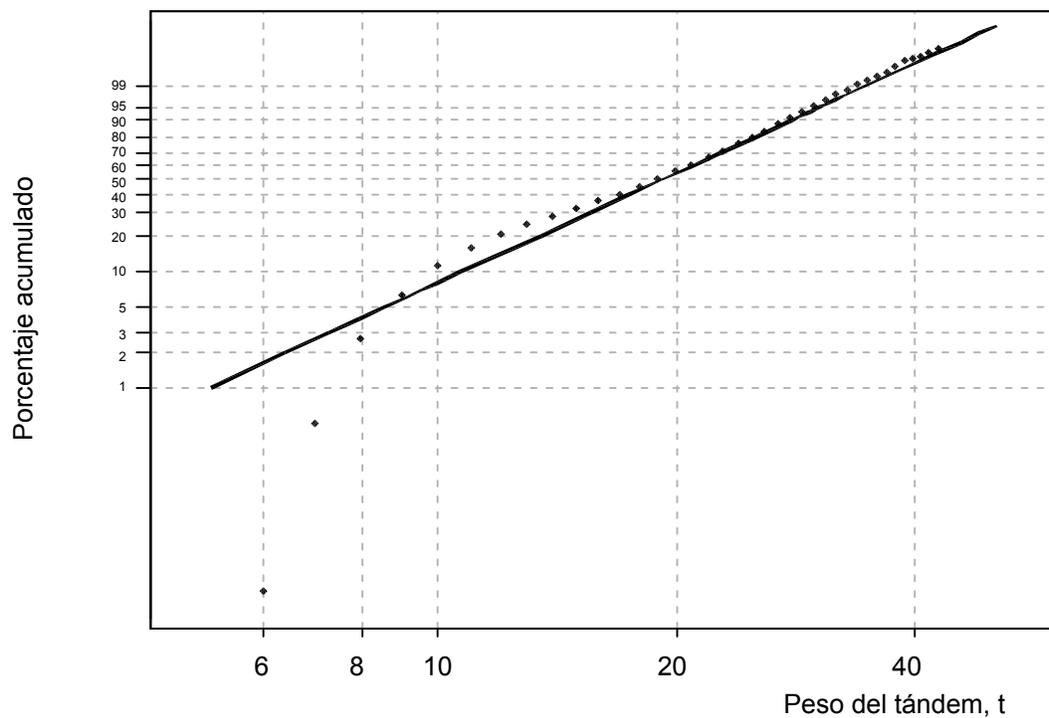


Fig. 5.3 Distribución de Weibull para PT

del percentil 40 en adelante. Si bien el ajuste es muy malo en valores pequeños de PT (menores de 8t) y regular en el rango de 8 a 18t, **se considera aceptable la distribución de Weibull** que se obtuvo, ya que el análisis probabilístico de confiabilidad se refiere a los valores grandes de PT.

Con el propósito de contar con varias opciones de valores de CV2, que correspondan a diferentes cantidades, N, de vehículos C3 que se espera transiten sobre un puente dado, durante la vida útil del mismo, se tomaron cuatro casos: 10,000, 100,000, 1,000,000 y 10,000,000. Mediante asignación frecuencial, a los valores más grandes de PT en cada caso les corresponden, respectivamente, probabilidades de excedencia,  $P = 1/N$ , de  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-6}$  y  $10^{-7}$  (el valor de N es un parámetro de proyecto). En la siguiente tabla se presentan los valores de CV2, que se obtienen con la distribución de Weibull para estas probabilidades (riesgos):

| N      | P         | CV2, t |
|--------|-----------|--------|
| $10^4$ | $10^{-4}$ | 42.9   |
| $10^5$ | $10^{-5}$ | 46.0   |
| $10^6$ | $10^{-6}$ | 48.6   |
| $10^7$ | $10^{-7}$ | 51.0   |

## 5.2 Determinación del valor de CV1

Como ya se indicó, para calcular el valor de CV1, se procede primero a determinar el valor del **peso bruto virtual**, PBV, que corresponde a cada una de las probabilidades de excedencia antes señaladas.

En la figura 5.4 se presentan las frecuencias relativas acumuladas, trazadas en escalas de Weibull, correspondientes a los pesos brutos de las muestras de 1993-94 y 1996, observándose que éstas se parecen mucho entre sí, por lo cual es razonable juntarlas en una sola. Al hacerlo, se obtiene el ajuste mostrado en la figura 5.5 en la que se aprecia una magnífica concordancia de la recta que representa a la distribución de Weibull con la secuencia de puntos, del percentil 40 en adelante.

Los pesos brutos virtuales, PBV, asociados a las probabilidades de excedencia antes señaladas, se calculan con esta distribución de Weibull, dando los resultados anotados en la siguiente tabla, en la cual se cuantifican también las cargas virtuales CV1:

5 Cálculo del subsistema de cargas concentradas

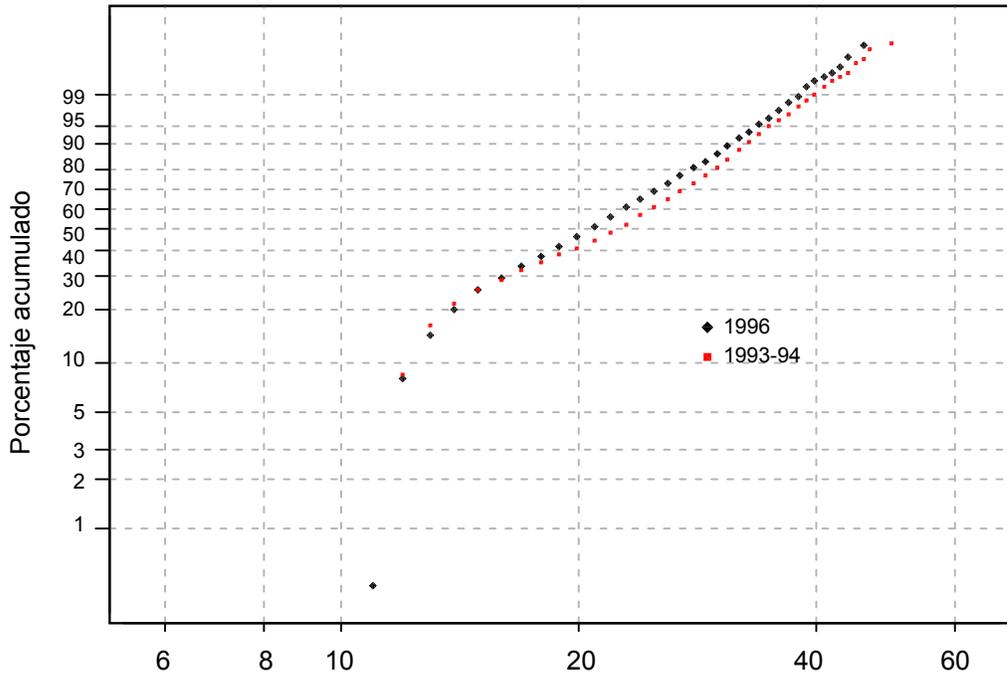


Fig. 5.4 Frecuencias relativas acumuladas de PB en escalas de Weibull

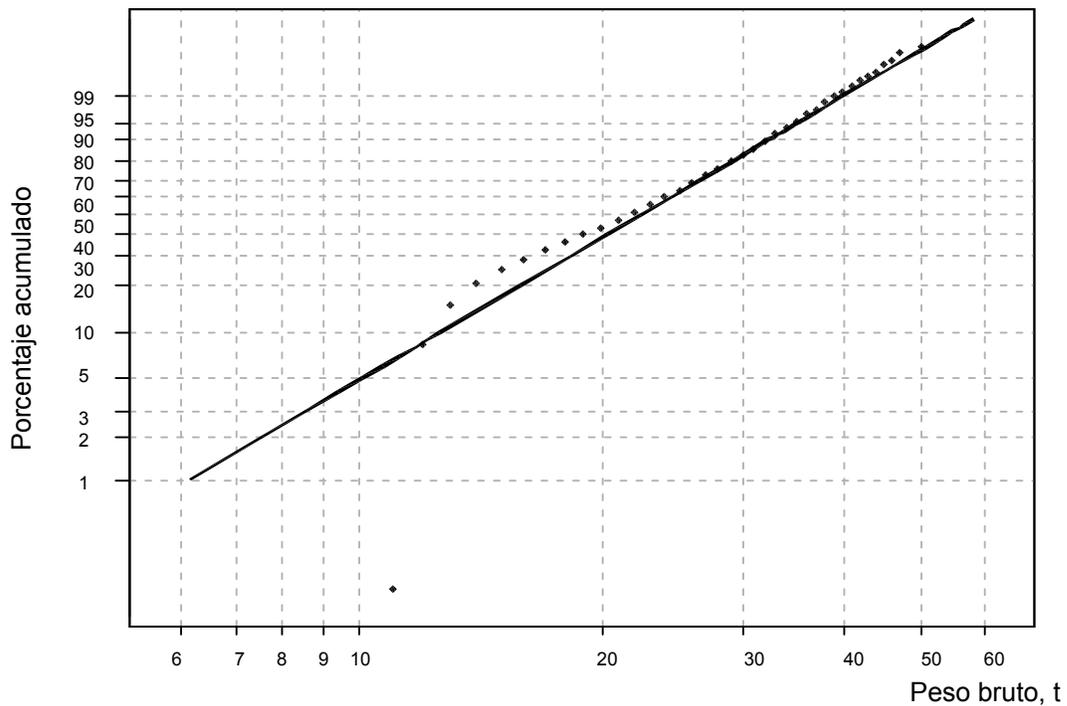


Fig. 5.5 Distribución de Weibull para el peso bruto

| <b>N</b> | <b>P</b>  | <b>PBV, t</b> | <b>CV1=PBV-CV2, t</b> |
|----------|-----------|---------------|-----------------------|
| $10^4$   | $10^{-4}$ | 49.3          | 6.4                   |
| $10^5$   | $10^{-5}$ | 52.8          | 6.8                   |
| $10^6$   | $10^{-6}$ | 55.8          | 7.2                   |
| $10^7$   | $10^{-7}$ | 58.5          | 7.5                   |

### 5.3 Determinación de la separación D

Dado que la separación entre las cargas tiene efectos en los valores de los elementos mecánicos que cada vehículo produce a un puente, el valor que se le asigna en este trabajo para el vehículo virtual, se toma igual a la suma del promedio de la distancia entre los ejes 1 y 2, que resultó de 5.0m, más la mitad del promedio de la que se tiene entre los ejes 2 y 3, en donde se ubica la línea de acción del peso del tándem, el cual es 1.3m.

Por la conclusión que se obtuvo en los análisis de regresión múltiple realizados en el capítulo 3, de que esta variable tiene una influencia baja en los valores de los elementos mecánicos máximos, en comparación con la de PT, se deduce que no se requiere mucha precisión en el valor que se le asigne a la separación D, por lo cual se decidió redondearla, para fines prácticos, a 6m. Al validar más adelante el subsistema de cargas se comprobará que ésta es adecuada.

### 5.4 Cálculo de las cargas virtuales para carreteras alimentadoras

Debido a que la información estadística antes utilizada corresponde a vehículos C3 que circulaban por carreteras principales, en las cuales el peso bruto máximo permitido en el RPD es de 26t, es necesario convertir los valores de las cargas virtuales que se obtuvieron en las secciones anteriores, en otros que tengan congruencia con el peso bruto máximo que se autoriza en las carreteras alimentadoras, tipo D, de 20.5t; para hacer esto, se decidió escalar a los ya obtenidos, multiplicándolos por la relación  $20.5/26 = 0.7885$ , con lo cual se obtienen los siguientes nuevos valores de PBV, CV1 y CV2:

| P         | PBV, t | CV1, t | CV2, t |
|-----------|--------|--------|--------|
| $10^{-4}$ | 38.87  | 5.05   | 33.82  |
| $10^{-5}$ | 41.63  | 5.36   | 36.27  |
| $10^{-6}$ | 44.00  | 5.68   | 38.32  |
| $10^{-7}$ | 46.12  | 5.91   | 40.21  |

## 5.5 Determinación de los factores de carga viva básicos

Dado que los factores de carga se aplican multiplicándolos por las **cargas nominales**, con el fin de tomar en cuenta la incertidumbre que se tiene sobre las magnitudes máximas que eventualmente asumirán las cargas reales, debido a su aleatoriedad, es necesario calcular los valores que les corresponden a los **factores de carga viva básicos** que se utilizarán en el subsistema de cargas concentradas aquí propuesto, para darle congruencia con el proceso de diseño de puentes mediante métodos que se basen en los estados límite de resistencia y servicio.

Precisamente, los valores antes calculados para las cargas virtuales **tienen ya incorporado el efecto de la incertidumbre** antes mencionada, toda vez que se asocian a probabilidades de excedencia que se consideraron razonablemente pequeñas. Por otra parte, el valor nominal del peso bruto vehicular máximo establecido en el RPD es de 20.5t, para carreteras alimentadoras.

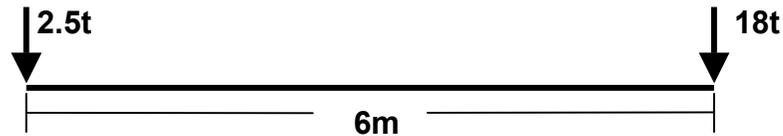
Por tanto, al dividir los pesos brutos de la tabla anterior entre 20.5t, se obtienen los **factores de carga viva básicos**, FCV, que corresponden a cada probabilidad de excedencia, que se muestran en la tabla siguiente junto con las **nuevas cargas virtuales (nominales)**, que resultan de dividir a las calculadas en la sección 5.4 entre cada factor de carga.

| N      | P         | FCV  | CV1, t | CV2, t |
|--------|-----------|------|--------|--------|
| $10^4$ | $10^{-4}$ | 1.90 | 2.66   | 17.84  |
| $10^5$ | $10^{-5}$ | 2.03 | 2.64   | 17.86  |
| $10^6$ | $10^{-6}$ | 2.15 | 2.64   | 17.82  |
| $10^7$ | $10^{-7}$ | 2.25 | 2.63   | 17.87  |

Al comparar los distintos valores de CV1, se aprecia que son muy similares entre sí, al igual que los de CV2. Por tanto, para conformar el **subsistema de cargas concentradas nominales**, es suficiente con un

## 5. Cálculo del subsistema de cargas concentradas

solo valor de cada carga virtual. Por conveniencia nemotécnica y por la precisión que se justifica en los cálculos de los elementos mecánicos, se decidió redondear el valor de CV2 a 18t y el de CV1 a 2.5t, por lo cual dicho subsistema queda establecido de la siguiente manera:



Cada una de estas cargas corresponde a un eje del vehículo virtual, por lo que, para los fines procedentes, según el reglamento AASHTO, se dividen en dos partes iguales que corresponden a llantas separadas 1.8m, dentro de un carril de 3.0m de ancho. Las áreas de aplicación de las cargas de cada llanta se calculan con la fórmula que para tal efecto da el reglamento antes señalado.

Con el propósito de ajustar una línea recta a la secuencia de valores del factor de carga viva básico, ya que a ojo se aprecia una relación casi lineal con el logaritmo base 10 de N, se decidió incrementar ligeramente dos de ellos, de manera que al primero se le asigna 1.95 y, al segundo, 2.05, con lo cual la relación que se obtiene para cualquier valor de N que se escoja es:

$$FCV = 1.55 + 0.1 \log N$$

Estos factores de carga viva básicos se utilizan para la combinación de cargas denominada “**Resistencia I**” en el reglamento vigente de la AASHTO. En un capítulo subsecuente se establecerán los valores del factor de carga viva que se aplican para las demás combinaciones.



## **6. Validación del subsistema de cargas concentradas**

---

Con el fin de validar el subsistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas vehiculares aquí propuesto (etapas 6 a 9 de la metodología propuesta en el capítulo 4), se realizaron las tres comparaciones siguientes de los **elementos mecánicos** que se obtienen al aplicarlo:

4. Con los valores reales más grandes que se obtienen con los datos de la muestra.
5. Con los valores máximos esperados, según los análisis probabilísticos.
6. Con los valores máximos que se predicen a partir de los análisis de regresión múltiple ya realizados.

### **6.1 Validación utilizando los elementos mecánicos reales más grandes**

Con el propósito de validar el subsistema de cargas concentradas, se calcularon los elementos mecánicos que éste produce al aplicarse a puentes de 15, 30, 45 y 60m de claro, y considerar los cuatro valores del factor de carga viva básico. Los resultados **se comparan con los valores más grandes** de momento flexionante y de la fuerza cortante máximos que se obtuvieron con la muestra total de los vehículos C3 de los tres años aquí involucrados, afectados por el factor de escala 0.7885 y sin considerar el efecto dinámico (o de impacto).

En las figuras 6.1 y 6.2 se muestran las comparaciones antes referidas, en términos de los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes, respectivamente; en ambas se aprecia que los resultados del modelo superan a los máximos reales, en todos los casos, por lo que el subsistema de cargas concentradas **es satisfactorio**.

### **6.2 Validación utilizando los elementos mecánicos máximos esperados, según los análisis probabilísticos**

Con el fin de validar en segunda instancia al subsistema de cargas concentradas, se hace necesario **estimar** los valores que asumirían los

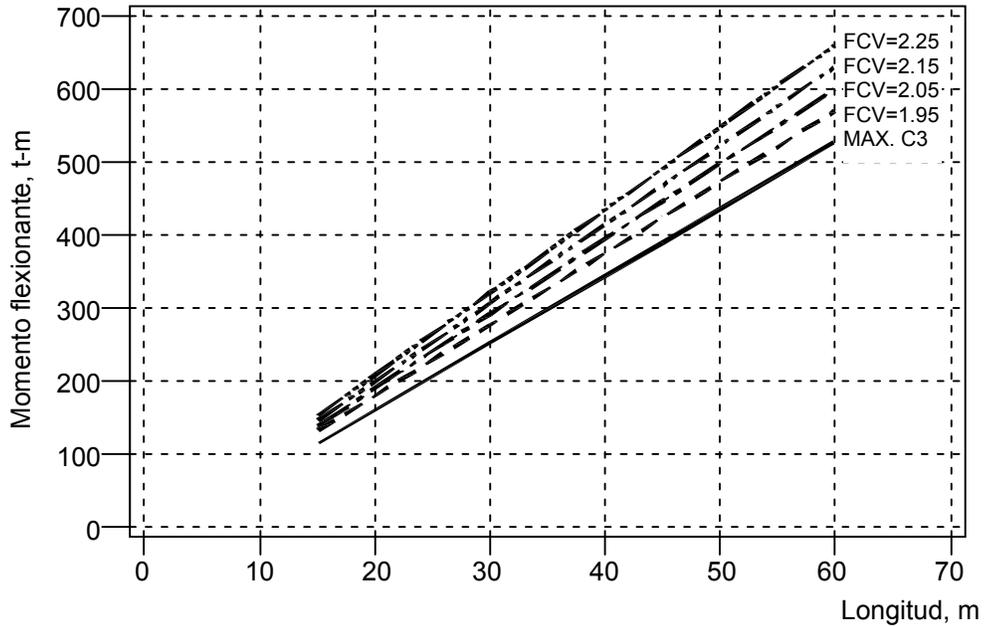


Fig. 6.1 Validación del subsistema de cargas concentradas

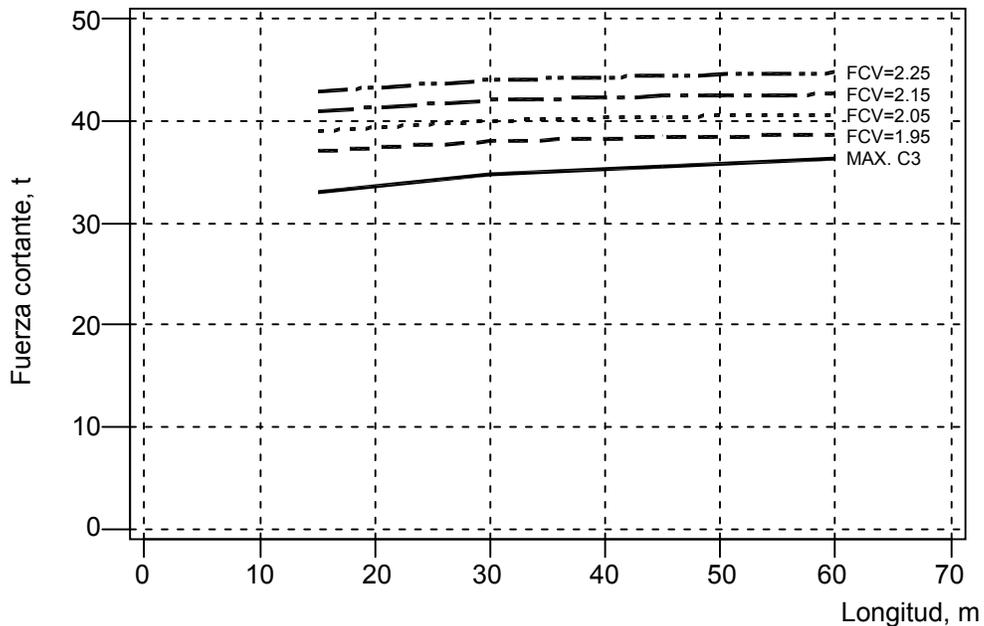


Fig. 6.2 Validación del subsistema de cargas concentradas

momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos, para las mismas probabilidades de excedencia que se utilizaron para calcular las cargas virtuales.

Para hacer esto, se realizaron ajustes de diversas leyes de probabilidades a las distribuciones de frecuencias relativas acumuladas de cada uno de los elementos mecánicos máximos, los cuales fueron calculados previamente con los datos de pesos y dimensiones de todos los vehículos C3 de las muestras, habiéndose concluido que la **distribución de Weibull** se ajustó razonablemente en todos los casos, excepto en los valores pequeños de los mismos para los que esto no tiene importancia.

En efecto, en la figura 6.3 se presentan los ajustes realizados a los momentos flexionantes M15, M30 y M45, asociados a las muestras de 1993-94 y 1996, en las que se aprecia una concordancia adecuada en la mitad del lado derecho de cada distribución, y que, para cada longitud de puente, las distribuciones de probabilidades de los dos años se parecen mucho entre sí, por lo que se justifica juntar las dos muestras de momentos en una sola.

En la figura 6.4 se presentan los ajustes de la distribución de probabilidades de Weibull para los momentos flexionantes M45, M30 y M15, correspondientes a los datos de 1993-94 y 1996 juntos. En ellos se observa que estas distribuciones modelan adecuadamente el comportamiento aleatorio de las variables en cuestión, del percentil 40 en adelante.

Por otra parte, en las figuras 6.5 a 6.7 se muestran las distribuciones de frecuencias relativas acumuladas, trazadas en escalas de Weibull, de las fuerzas cortantes máximas correspondientes a las muestras de 1993-94 y 1996, calculadas para los puentes de 15, 30 y 45m, respectivamente.

Al comparar entre sí, en cada figura, a cada pareja de secuencias de puntos, la de 1993-94 con la de 1996, se aprecia que, en general, existe similitud entre ellas, por lo que, en cada caso, resulta razonable integrar los resultados de los dos años en una sola muestra. Asimismo, se observa que tienden a alinearse a lo largo de una recta, del percentil 50 en adelante.

En las figuras 6.8 a 6.10 se muestran los resultados de las fuerzas cortantes máximas V15, V30 y V45, respectivamente, que se obtienen al conjuntar las muestras, notándose que los ajustes de las líneas rectas son bastante buenos en el rango de los valores medianos a grandes de las variables aleatorias (del 50% de probabilidad acumulada en adelante), aunque en la cola derecha, para una probabilidad de excedencia dada, con las distribuciones de Weibull que representan, se sobrestiman ligeramente las

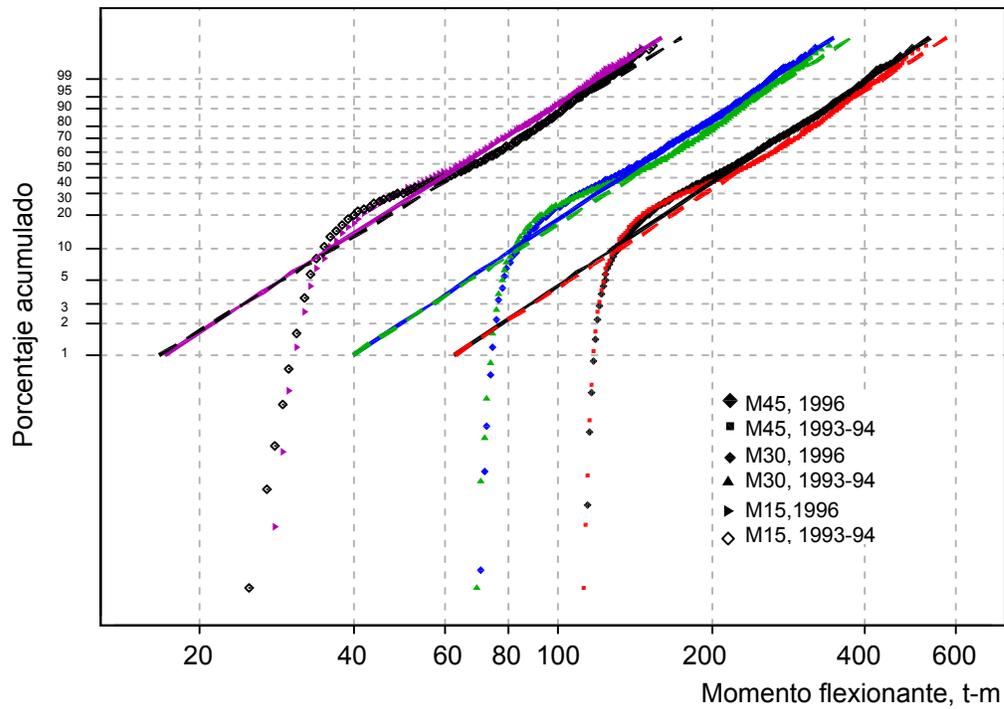


Fig. 6.3 Distribución de Weibull para momentos

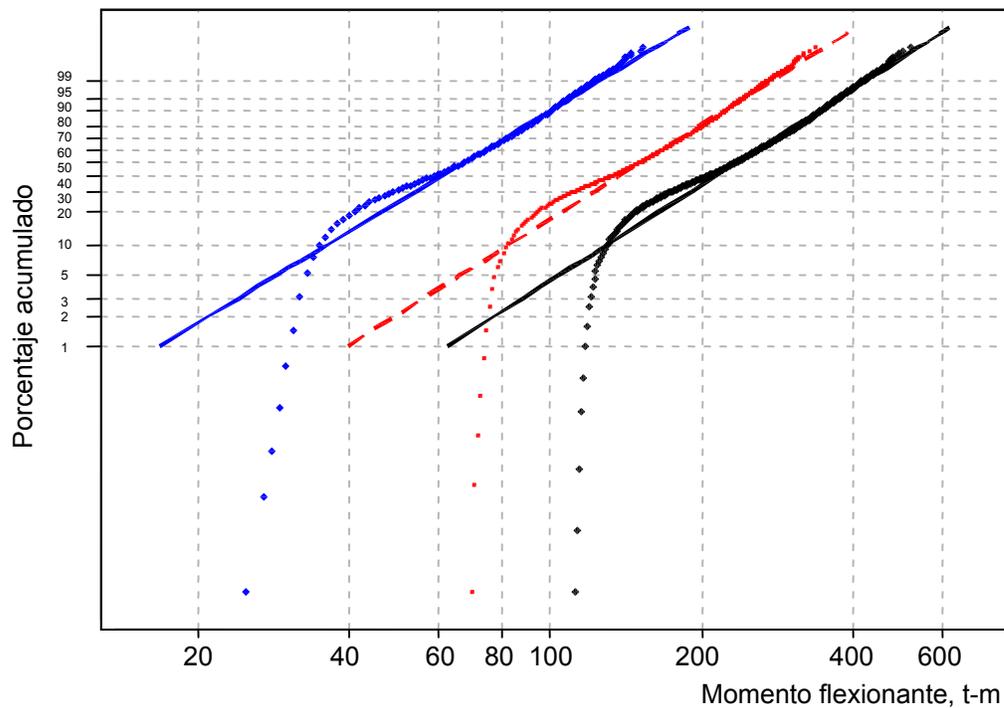


Fig. 6.4 Distribución de Weibull para M45, M30 y M15

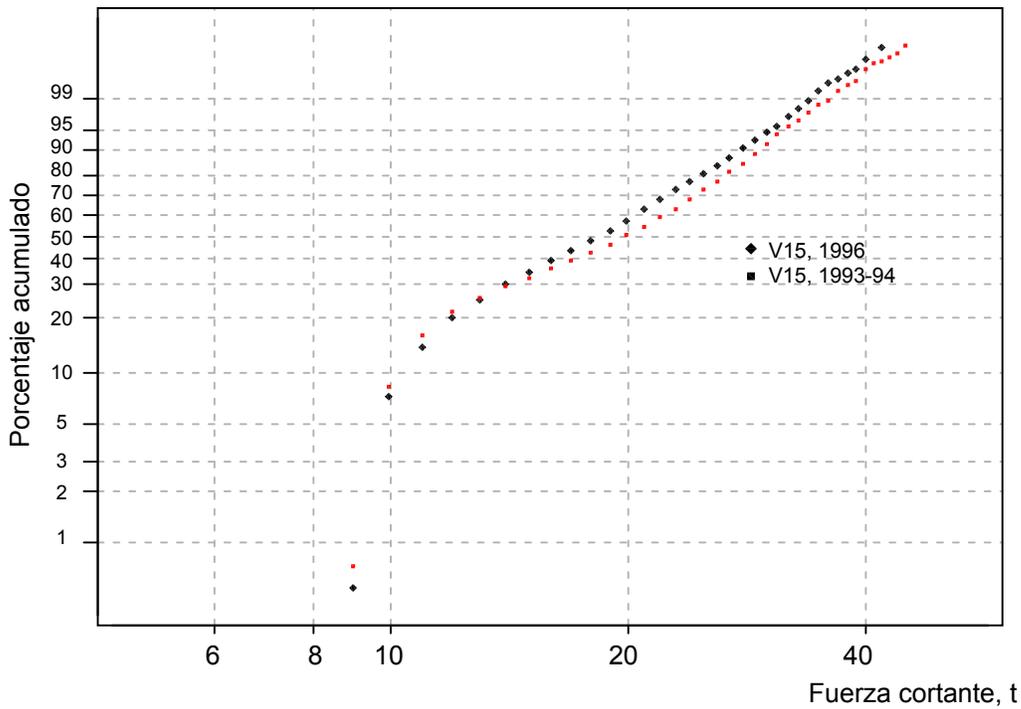


Fig. 6.5 Frecuencias relativas acumuladas de V15 en escalas de Weibull

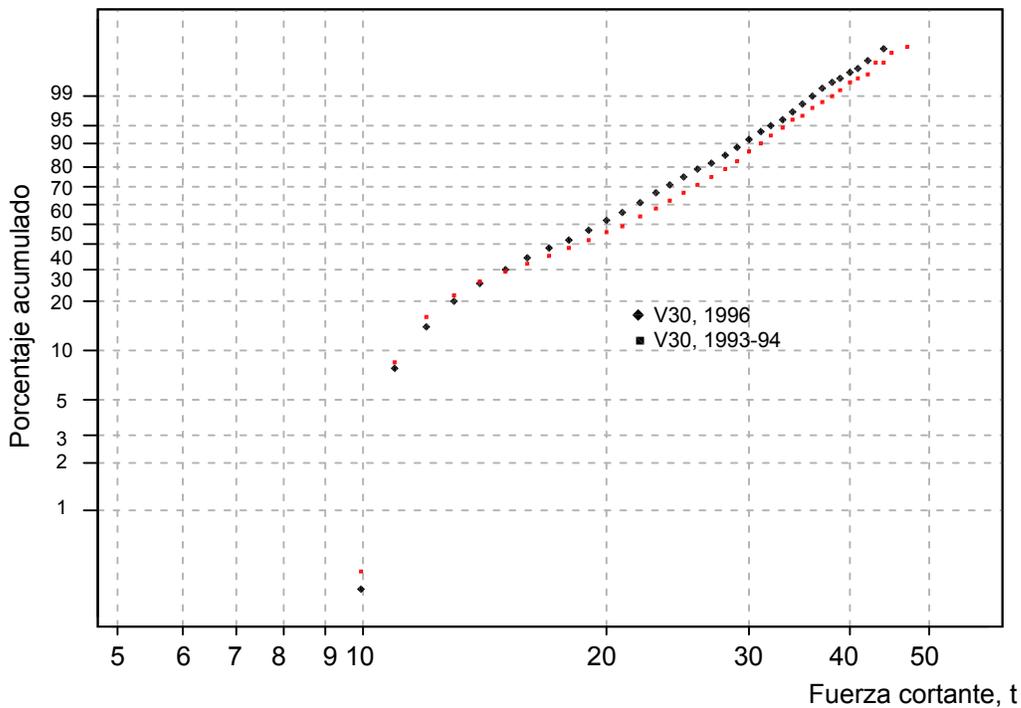


Fig. 6.6 Frecuencias relativas acumuladas de V30 en escalas de Weibull

6. Validación del subsistema de cargas concentradas

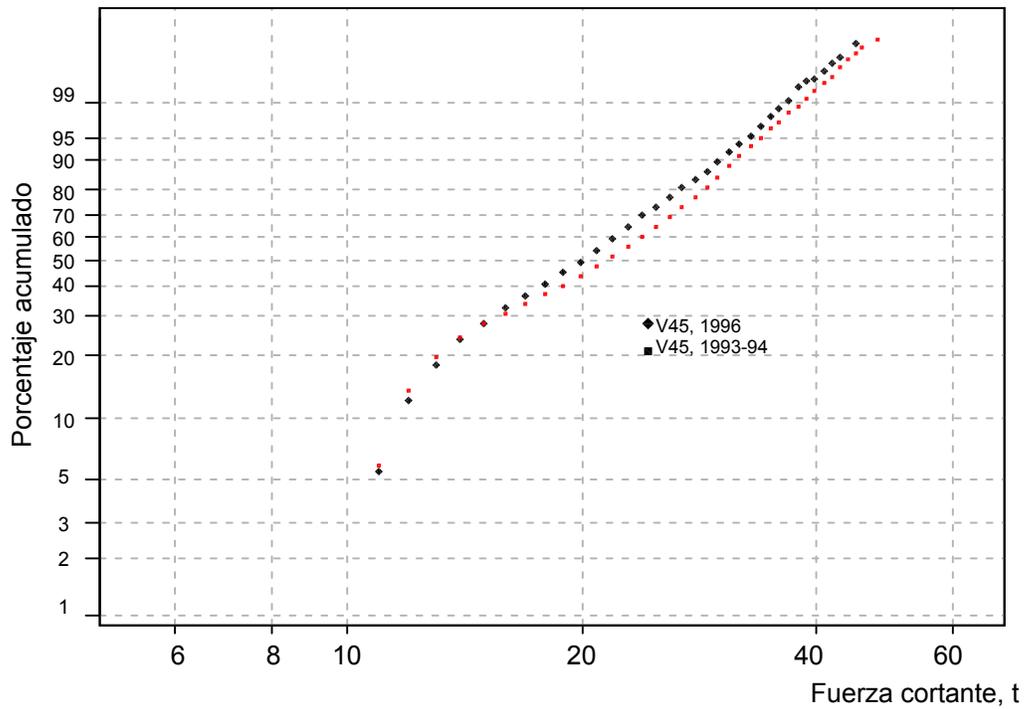


Fig. 6.7 Frecuencias relativas acumuladas de V45 en escalas de Weibull

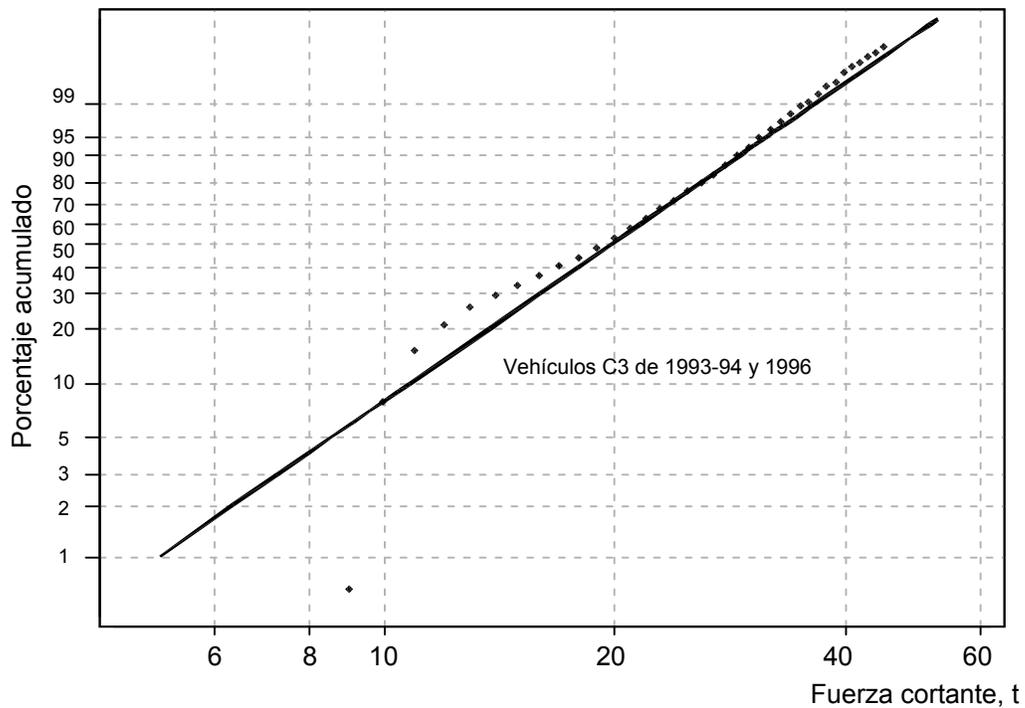


Fig. 6.8 Distribución de Weibull para V15

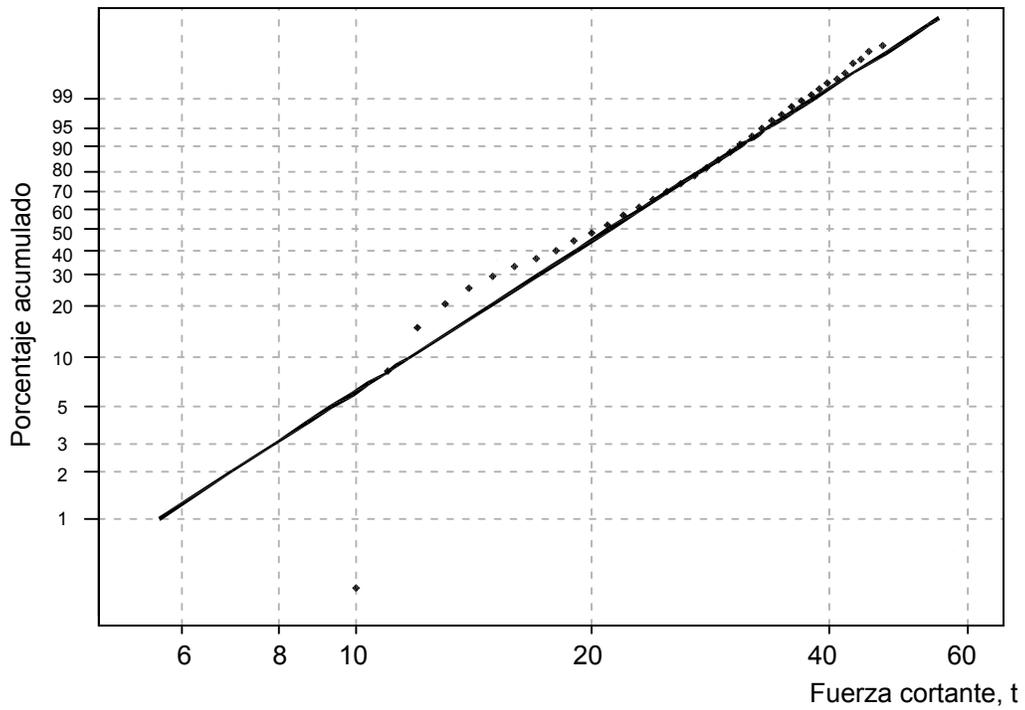


Fig. 6.9 Distribución de Weibull para V30

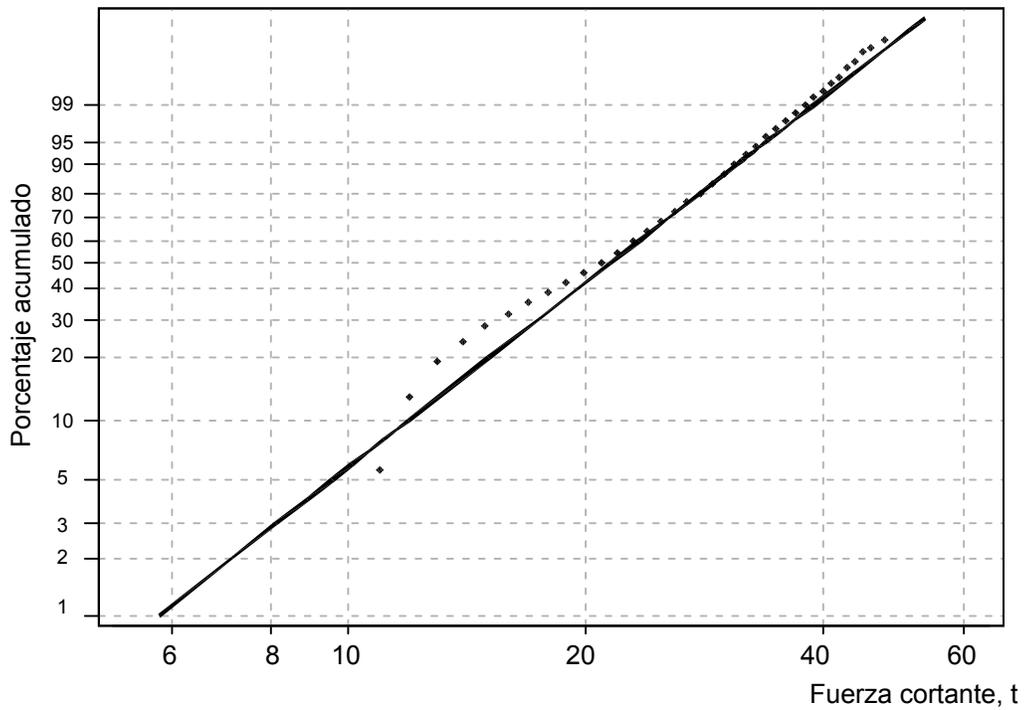


Fig. 6.10 Distribución de Weibull para V45

predicciones o estimaciones de las fuerzas cortantes, lo cual, en nuestro caso, es conservador.

Con el fin de proceder a verificar si el subsistema de cargas concentradas arroja elementos mecánicos que cubren satisfactoriamente a los **valores máximos esperados**, que resultan de estimarlos con las leyes de probabilidades que se ajustaron, para cada una de las probabilidades de excedencia involucradas, se procedió a la determinación de estos últimos y a multiplicarlos por el factor de escala 0.7885. Los resultados que se obtuvieron se muestran en las figuras 6.11 y 6.12, para los momentos flexionantes y, en las figuras 6.13 y 6.14, para las fuerzas cortantes, en las cuales se observa que, para todos los niveles de riesgo, los valores que arroja el subsistema propuesto son ligeramente mayores que los esperados, **por lo que dicho subsistema es satisfactorio.**

### **6.3 Validación utilizando los elementos mecánicos máximos que se predicen con las regresiones múltiples**

Para validar en tercera instancia al subsistema de cargas concentradas, se calcularon los elementos mecánicos máximos, utilizando las ecuaciones (1) a (6) de las regresiones lineales múltiples que se obtuvieron en este trabajo, de acuerdo con lo señalado en el punto 8 de la metodología descrita en el capítulo 4.

En las figuras 6.15 y 6.16 se presentan los resultados obtenidos para los momentos flexionantes y, en las figuras 6.17 y 6.18, para las fuerzas cortantes, notándose, en todos los casos, que los correspondientes al subsistema de cargas concentradas, para cada factor de carga viva básico, superan ligeramente a los que se predicen con las regresiones, por lo que quedan del lado de la seguridad, en los rangos del 4.3 al 11.5% en los momentos y del 1.5 al 6.0% en las fuerzas cortantes.

**Los resultados de este capítulo conducen a la conclusión de que los elementos mecánicos que ocasiona el subsistema de cargas concentradas superan razonablemente a los máximos reales y a los predichos, con un alto grado de seguridad, por lo cual se considera que éste es adecuado para formar parte del sistema de cargas vivas para el análisis estructural de puentes, en las carreteras alimentadoras de México.**

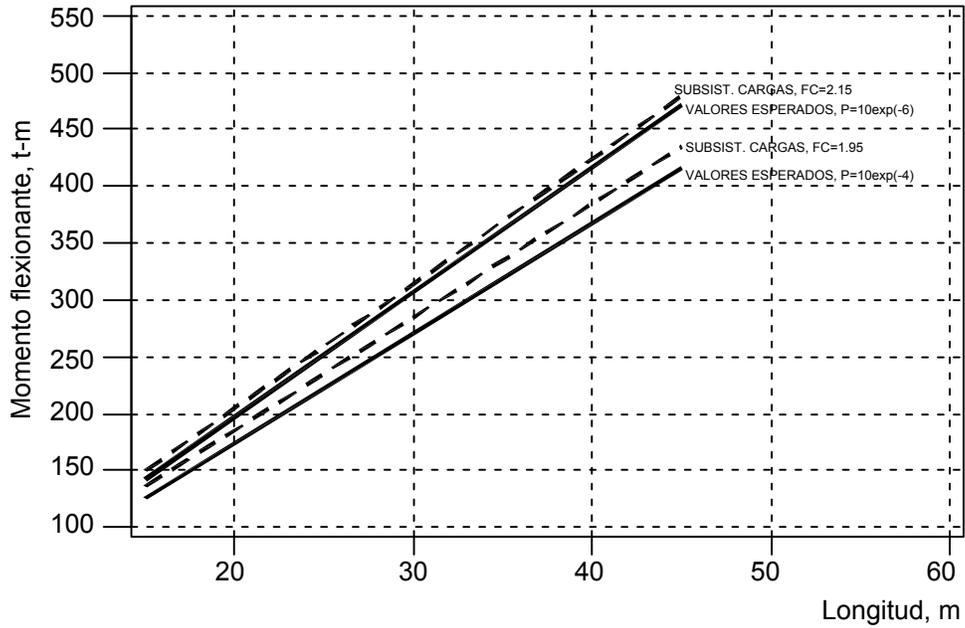


Fig. 6.11 Validación del subsistema de cargas concentradas

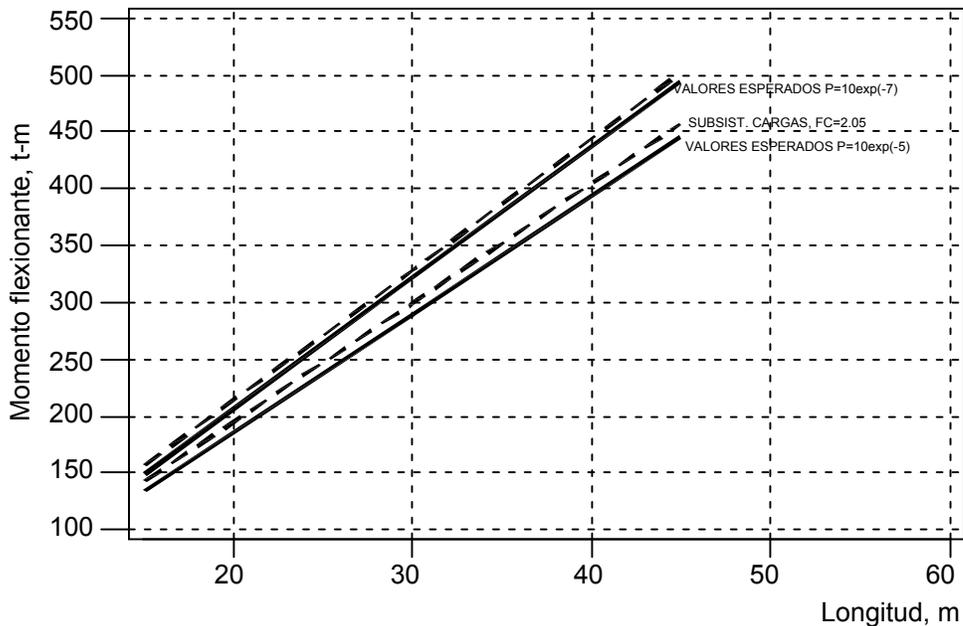


Fig. 6.12 Validación del subsistema de cargas concentradas

6. Validación del subsistema de cargas concentradas

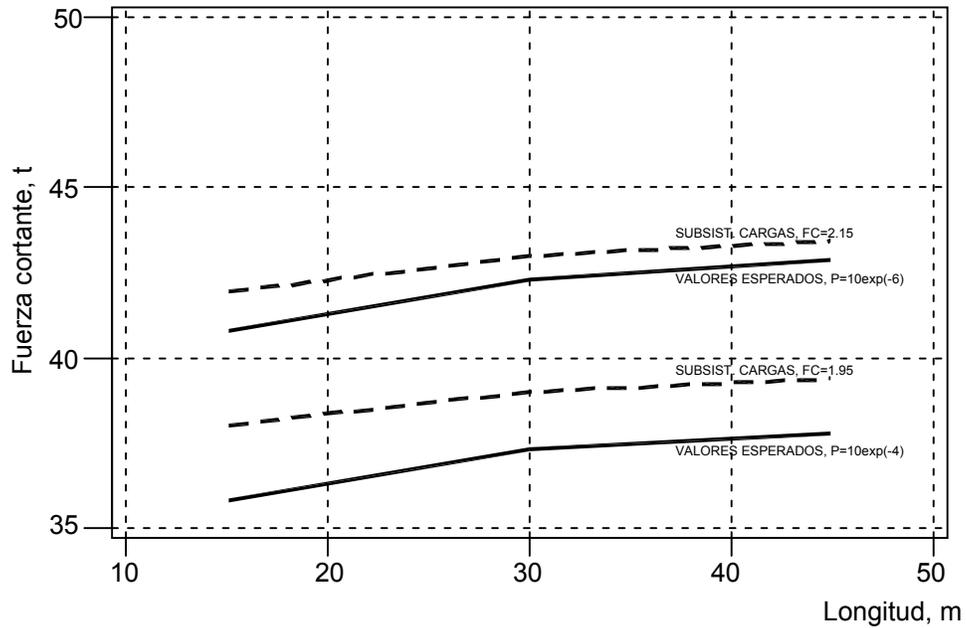


Fig. 6.13 Validación del subsistema de cargas concentradas

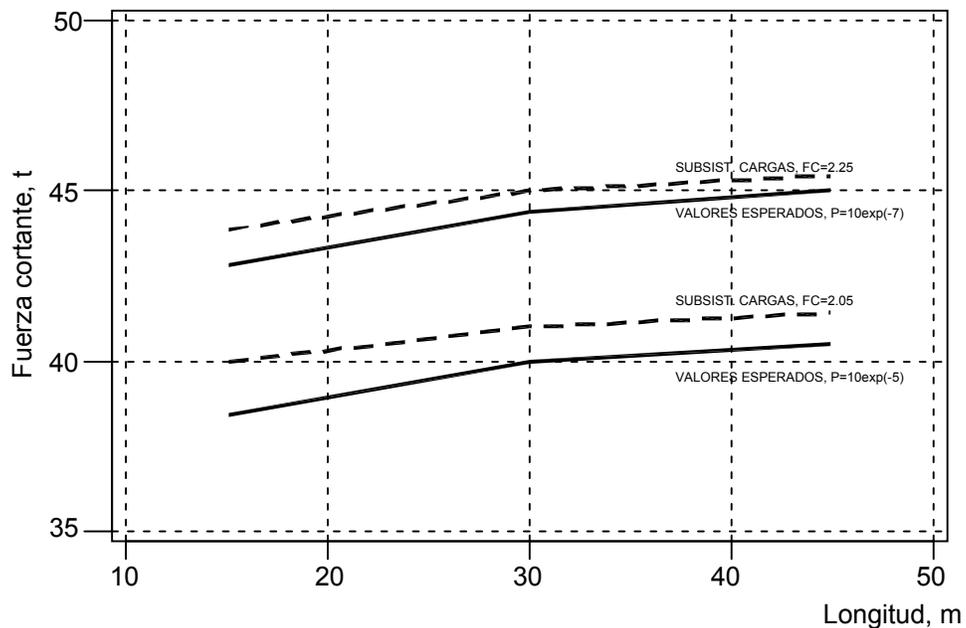


Fig. 6.14 Validación del subsistema de cargas concentradas

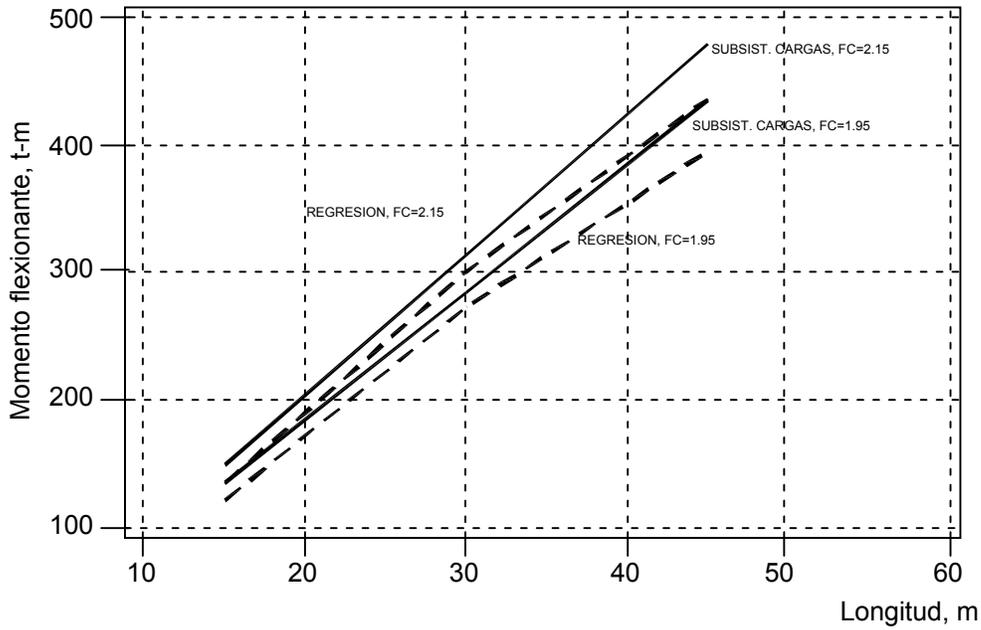


Fig. 6.15 Validación con regresión múltiple

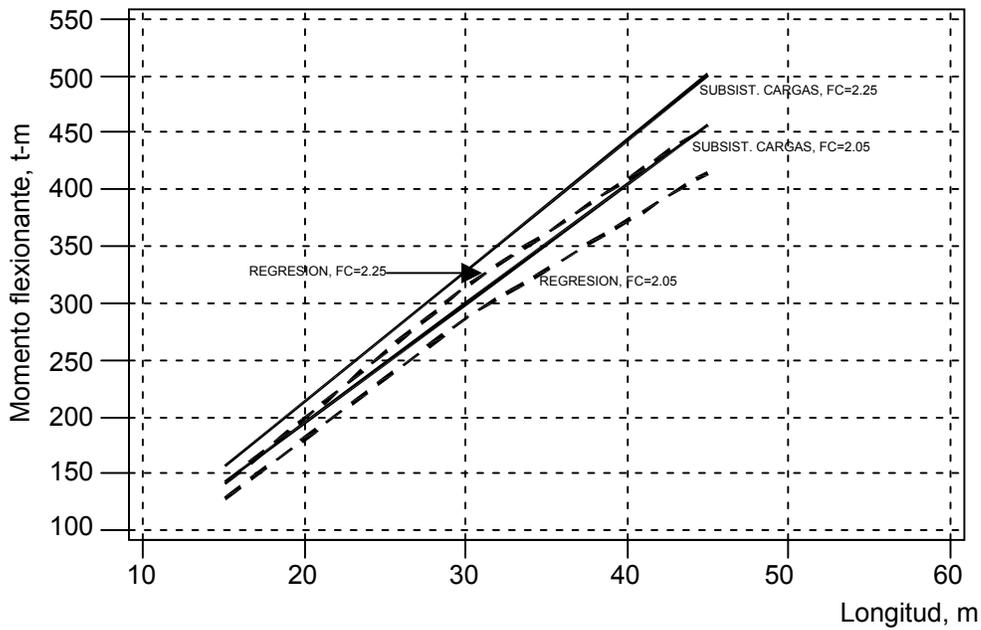


Fig. 6.16 Validación con regresión múltiple

## 6. Validación del subsistema de cargas concentradas

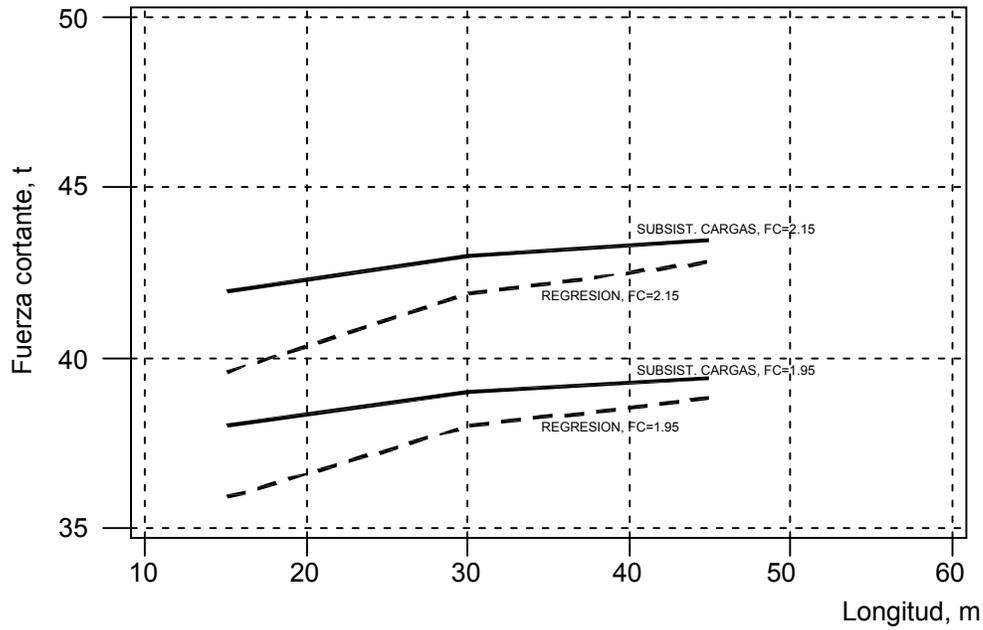


Fig. 6.17 Validación con regresión múltiple

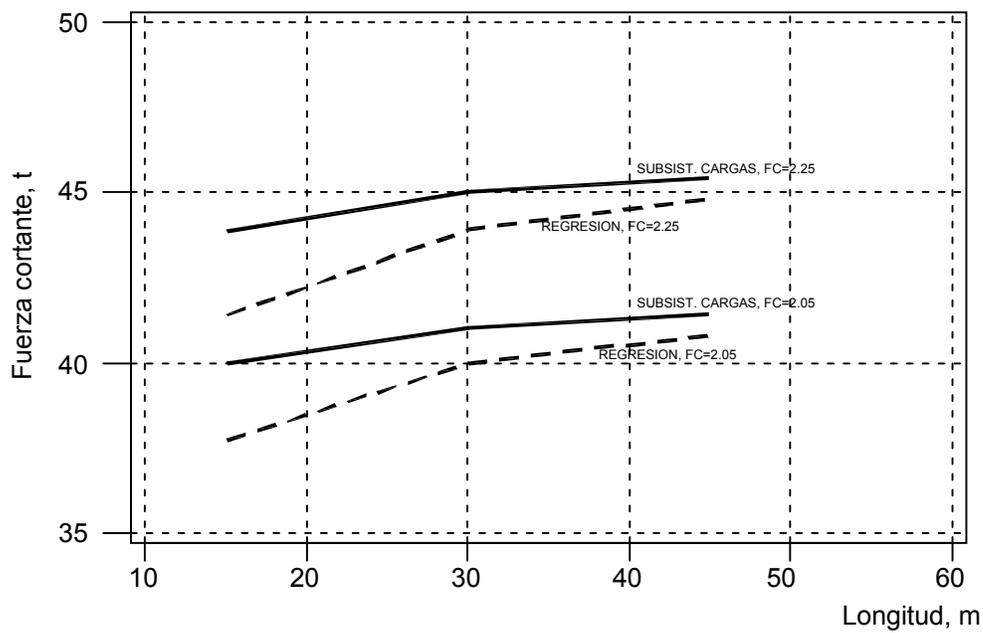


Fig. 6.18 Validación con regresión múltiple

## ***7. Cálculo de la carga uniformemente distribuida del sistema de cargas vivas***

---

Con el fin de incorporar en el sistema de cargas vivas las acciones que corresponden al caso de que en una línea de circulación de un puente transiten, muy cercanos entre sí, uno tras otro, varios vehículos pesados, se realizó un proceso de **simulación estocástica, tipo Monte Carlo**, en el cual se consideró la ocurrencia de dos vehículos consecutivos en una línea del tránsito, adaptando el proceso realizado en la referencia 3. Con los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos que se obtienen con la simulación, se calcula el valor que le corresponde a la **carga virtual uniformemente repartida que los produce**.

Para llevar a cabo el proceso de selección aleatoria de cada par de vehículos, se efectuó un muestreo sobre una colección parcial de camiones C3, de las muestras de los años 1993-94 y 1996 por separado; los vehículos a muestrear fueron los 300 más pesados de cada una. El muestreo se realizó utilizando una tabla de números aleatorios, para seleccionar a cada vehículo que sería incorporado a cada secuencia de dos.

Para realizar la simulación y calcular a la carga uniforme, se generó el siguiente procedimiento:

1. **Seleccionar aleatoriamente** el primer vehículo y luego el segundo de cada pareja. Para cada muestra se sacaron 30 pares y se determinaron sus respectivos pesos y separaciones de los ejes.
2. **Calcular la probabilidad de excedencia** que le corresponde a cada vehículo seleccionado, utilizando su valor del peso del tándem y la ley de probabilidades de la variable aleatoria PT, para con ellas obtener la probabilidad de excedencia simultánea de los dos pesos que componen cada pareja. Considerando que la excedencia del peso del tándem en cada vehículo es independiente de la excedencia en el otro, la probabilidad de que los dos de la secuencia excedan simultáneamente los valores de PT que cada uno tiene, es el producto de las dos probabilidades.
3. Con los datos de los vehículos de cada pareja formada con el proceso de muestreo descrito, respetando el orden de aparición, **calcular los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos** que ocasionan en puentes simplemente apoyados de 15, 30, 45 y 60m, considerando una distancia de 7m entre el eje trasero de uno y el delantero del que va atrás. Para hacer esto, se aplicó una subrutina que se integró al programa de cómputo MCmax (referencia 3).

## 7. Cálculo de la carga uniformemente distribuida del sistema de cargas vivas

4. Para cada longitud de puente, trazar las gráficas de los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos, versus el logaritmo base 10 de la probabilidad de excedencia asociada a cada pareja de vehículos, y **calcular las rectas de regresión** correspondientes, ya que se logró encontrar una regular correlación lineal de cada tipo de elemento mecánico con dicho logaritmo.
5. Para cada una de las probabilidades de excedencia que se utilizaron al calcular las cargas virtuales del subsistema de cargas concentradas, determinar, para cada longitud de puente, los valores del momento flexionante y de la fuerza cortante máximos, utilizando las ecuaciones de las rectas de regresión correspondientes, y sumarle, a cada uno, la mitad del respectivo intervalo de predicción asociado al 95% de nivel de confianza, para aumentar el grado de seguridad.
6. Para cada longitud de puente, **calcular el valor de la carga uniformemente distribuida,  $\omega$** , que al aplicarse produce un momento flexionante o una fuerza cortante igual a la diferencia de cada elemento mecánico calculado en el punto anterior menos el que ocasiona el subsistema de cargas concentradas, y seleccionar el más grande que resulte para cada elemento mecánico. Esto se hace así en virtud de que los elementos mecánicos que produce cada subsistema de cargas se suman para obtener los de diseño.

Al realizar los pasos 1 a 4 se obtuvieron las gráficas, ecuaciones de regresión, desviaciones estándar de la estimación, S, y coeficientes de correlación, R, que se muestran en las figuras 7.1 a 7.3, en las que se incluyen los 60 casos simulados para los tres años de muestreo. Las dos primeras corresponden a los momentos flexionantes M15, M30, M45 y M60 y, la tercera, a las fuerzas cortantes V15 y V60. En todas las figuras se observa que existe una buena regresión lineal entre cada par de variables involucradas, con coeficientes de correlación que varían entre 84.1 y 92.7%.

### **7.1 Cálculo del valor de la carga uniformemente distribuida, $\omega$**

Para calcular el valor de  $\omega$ , se considera que los elementos mecánicos máximos que producen las secuencias de vehículos no necesitan multiplicarse por ningún factor de carga, ya que en las simulaciones que se realizaron para calcularlos se incorporaron, por muestreo, sólo vehículos muy pesados, como se señaló en la sección previa a ésta. Asimismo, se considera que dada la corta distancia entre cada par de vehículos consecutivos (se tomó de 7m de eje a eje), la velocidad que llevan es baja

7. Cálculo de la carga uniformemente distribuida del sistema de cargas vivas

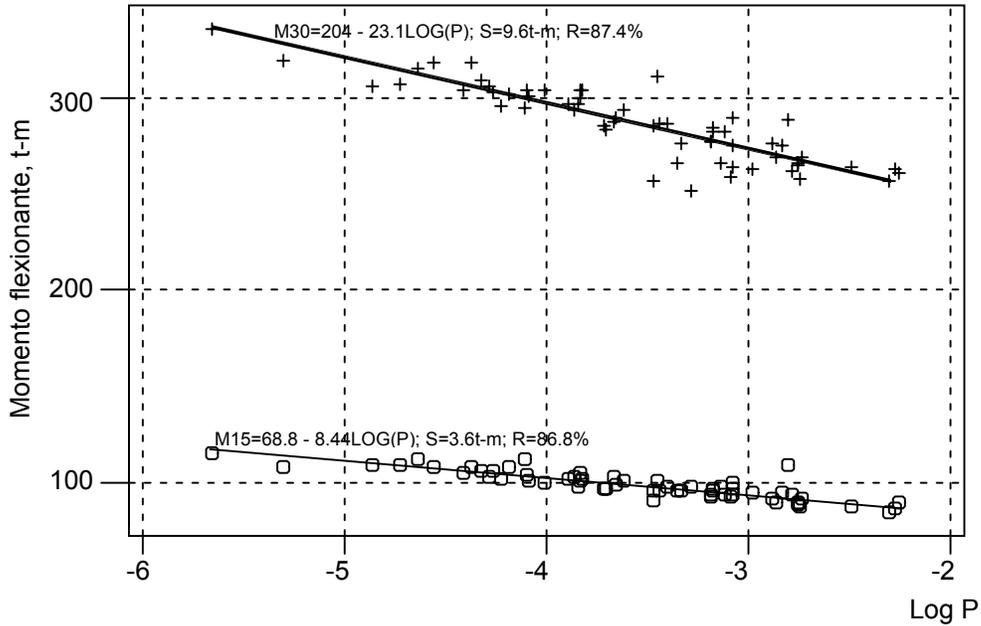


Fig. 7.1 Momentos flexionantes máximos por secuencias de vehículos

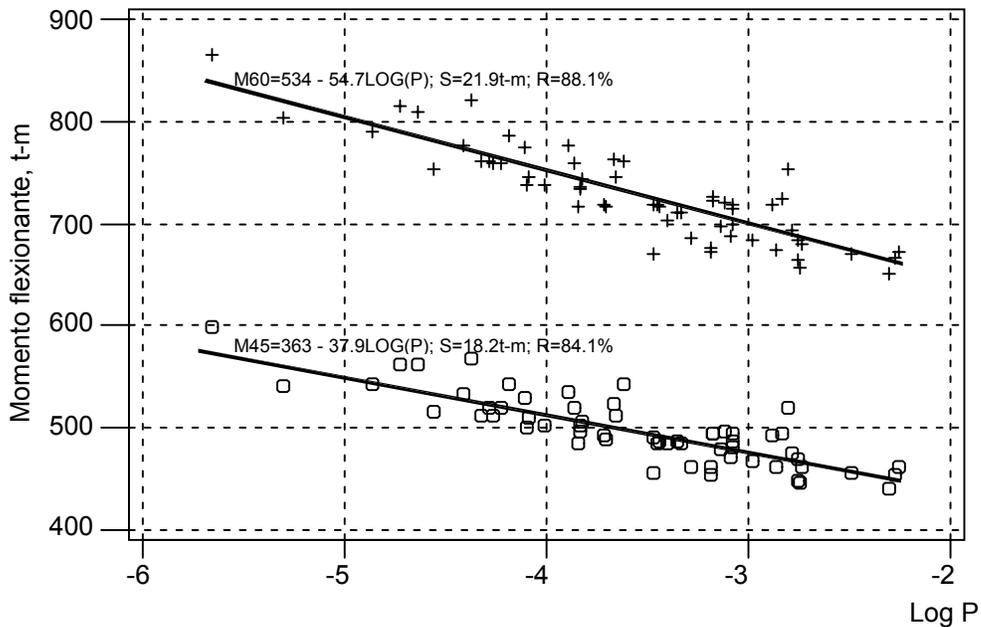


Fig. 7.2 Momentos flexionantes máximos por secuencias de vehículos

7. Cálculo de la carga uniformemente distribuida del sistema de cargas vivas

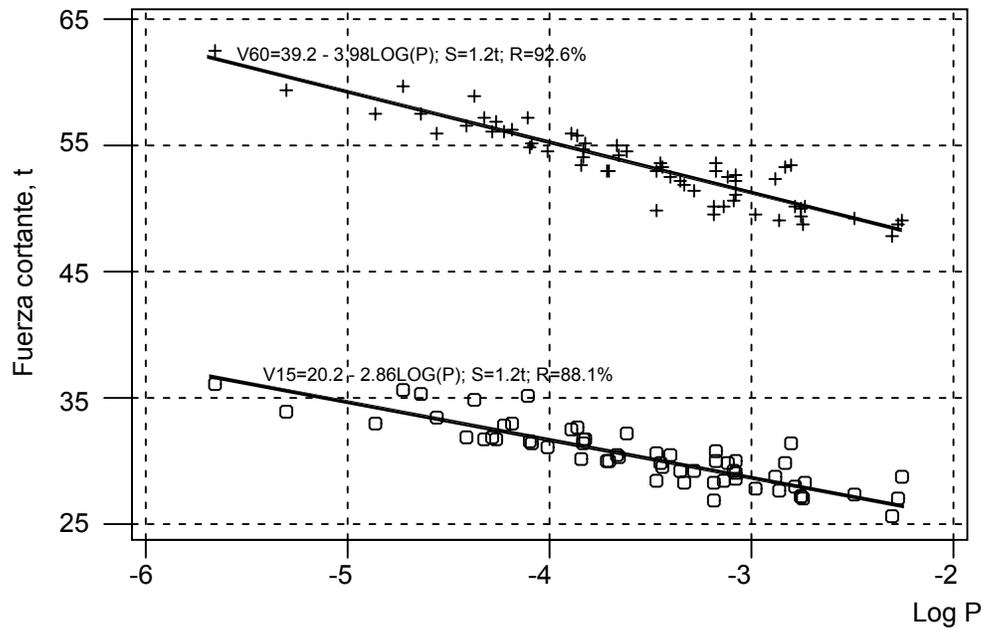


Fig. 7.3 Fuerzas cortantes máximas por secuencias de vehículos

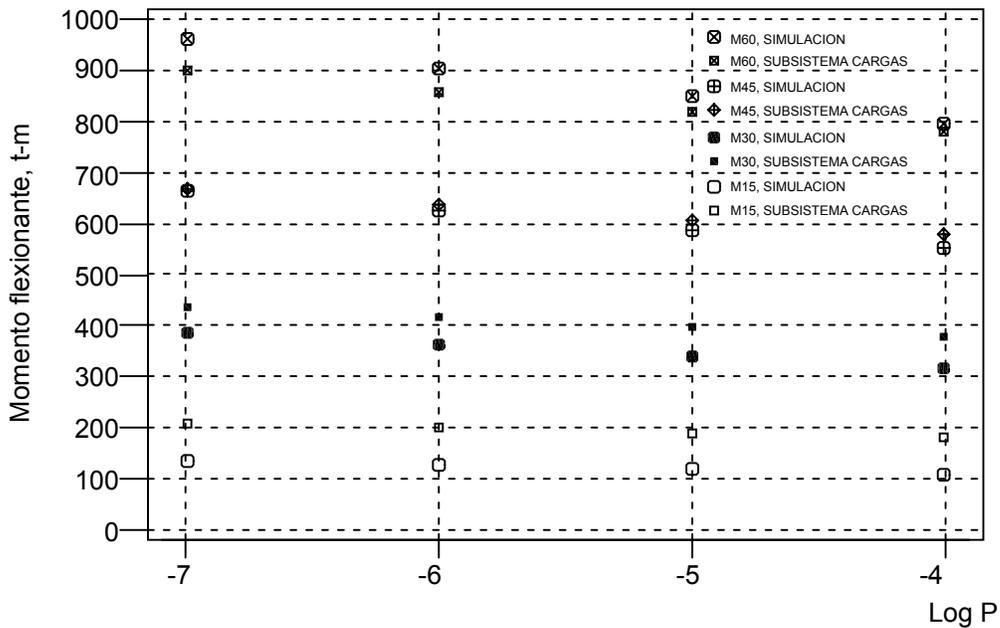


Fig. 7.4 Comparación de resultados: simulación vs subsistema de cargas

## 7. Cálculo de la carga uniformemente distribuida del sistema de cargas vivas

y, por tanto, se acepta la hipótesis de que los efectos dinámicos que producen las llantas en el puente son leves, lo cual trae consigo que se asuma que el factor de impacto es 1.0 (el efecto dinámico es nulo; estos criterios también se aplican en el reglamento de la AASHTO-94).

Por otra parte, para el subsistema de cargas concentradas, se utiliza aquí el mismo efecto dinámico de la AASHTO que conduce a un factor de impacto, de 1.33.

Sean  $M_\omega$  y  $V_\omega$  los símbolos para denotar a los momentos flexionantes y a las fuerzas cortantes que produce, en el centro del claro, la carga uniformemente distribuida,  $\omega$ ; sean  $M_p$  y  $V_p$  los que denotan a los elementos mecánicos máximos que ocasiona el subsistema de cargas concentradas, afectados por los factores de carga y de impacto.

Para calcular a  $\omega$  en términos de los momentos flexionantes se supone, conservadoramente, que el momento máximo total es igual a la suma de esos dos, por lo cual, al igualar el momento máximo total,  $M_T$ , producido por la secuencia de vehículos, con la suma de los dos anteriores se obtiene:

$$M_T = M_p + M_\omega = M_p + \omega L^2/8 \quad (7)$$

Por tanto,

$$\omega = \frac{8(M_T - M_p)}{L^2}, \quad \text{si } M_T > M_p \quad (8)$$

De manera análoga, al utilizar las fuerzas cortantes máximas para calcular  $\omega$  se obtiene:

$$\omega = \frac{2(V_T - V_p)}{L}, \quad \text{si } V_T > V_p \quad (9)$$

Por ejemplo, al aplicar el subsistema de cargas concentradas nominales en un puente simplemente apoyado de 60m, que resultó ser el caso más desfavorable de momentos, y después de multiplicar el momento flexionante máximo que le ocasiona por los factores de carga viva (2.25) y de impacto (1.33), se obtiene que  $M_p = 898$  t-m. Por tanto, tomando en cuenta que en este caso  $M_T = 960$  t-m (ver figura 7.4), con la ecuación (8) resulta que  $\omega = 8(960-898)/3600 = 0.14$  t/m.

## 7. Cálculo de la carga uniformemente distribuida del sistema de cargas vivas

Con el propósito de que al aplicar el sistema de cargas vivas, los elementos mecánicos que producen los subsistemas de las cargas concentradas y de uniformemente distribuida, se amplifiquen multiplicando su suma **por el mismo factor de carga viva, FCV**, el valor de  $\omega$  antes calculado se divide entre dicho factor, lo cual da, en el caso del ejemplo,  $\omega = 0.06$  t/m.

En la figura 7.4 se muestran los momentos flexionantes máximos que se calcularon para cada probabilidad de excedencia utilizada,  $P$ , y cada longitud de puente. Los círculos representan a los resultados de la simulación y los cuadrados a los del subsistema de cargas concentradas.

En dicha figura se observa que para claros de 15, 30 y 45m, el subsistema de cargas concentradas da momentos más grandes que los de la simulación, por lo cual **no se requiere** agregar carga uniforme. Por su parte, para  $L = 60$ m sí se tienen valores mayores en la simulación; los valores de la carga uniforme,  $\omega$ , calculada para cada probabilidad de excedencia, se presentan en una tabla más adelante, siendo el mayor de 0.06 t/m.

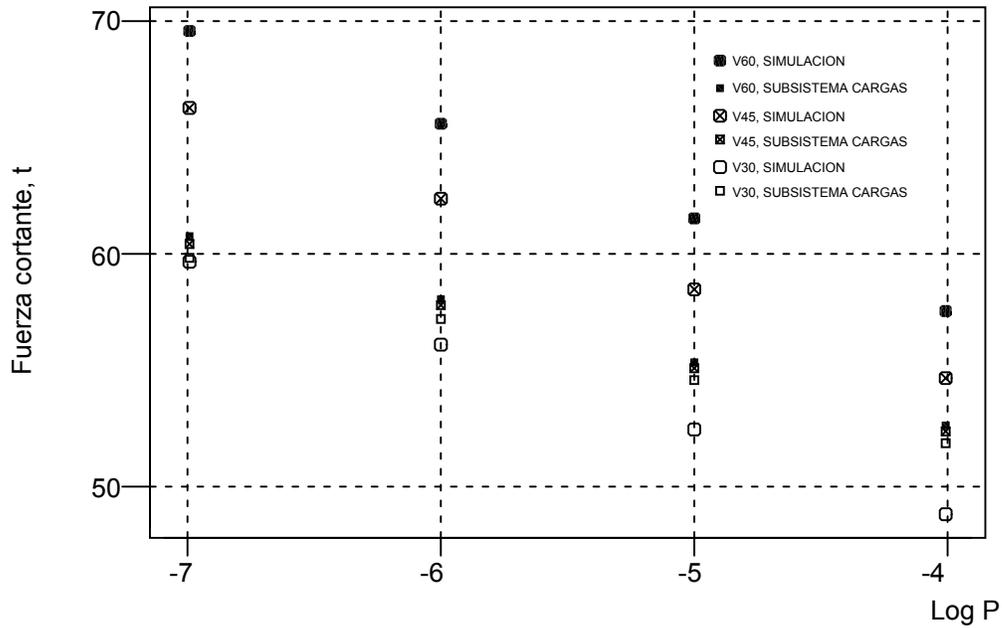
Asimismo, en la figura 7.5 se muestran las fuerzas cortantes máximas que se calcularon para cada probabilidad de excedencia, junto con las correspondientes al subsistema de cargas concentradas. En ella se aprecia que las secuencias de vehículos producen efectos mayores que los del subsistema de cargas concentradas sólo en longitudes de 45 y 60m.

En la siguiente tabla se presentan los valores, calculados con la ecuación 9, de la carga uniforme que se requeriría aplicar junto con el subsistema de cargas concentradas para lograr, **entre ambos**, las fuerzas cortantes máximas que producen las secuencias de vehículos, siendo el mayor de 0.13 t/m.

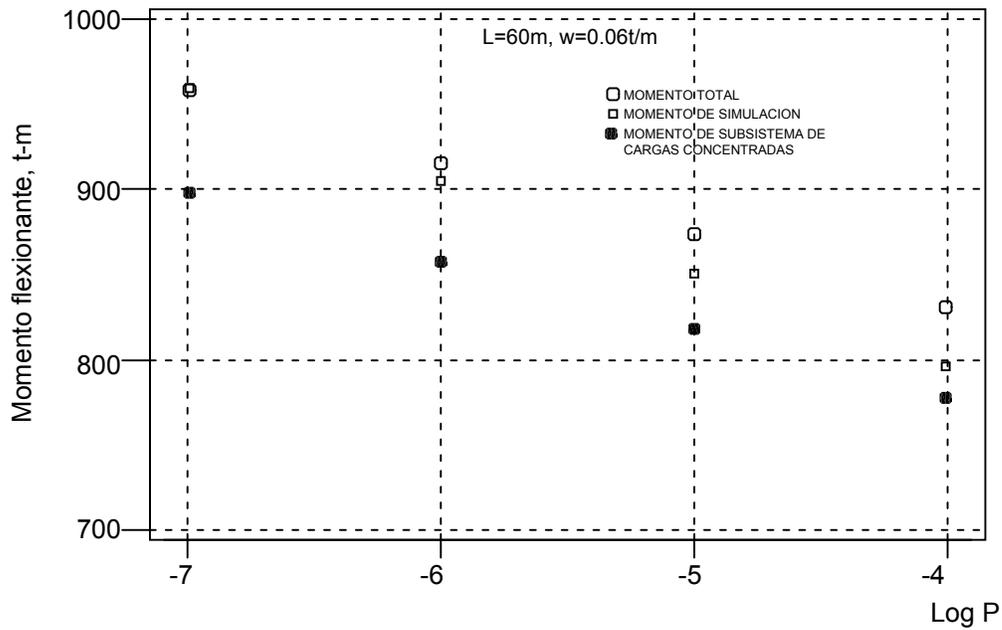
| <b>P</b>  | <b>FCV</b> | <b>Con V45<br/><math>\omega</math>, t/m</b> | <b>Con V60<br/><math>\omega</math>, t/m</b> | <b>Con M60<br/><math>\omega</math>, t/m</b> |
|-----------|------------|---|---|---|
| $10^{-4}$ | 1.95       | 0.05  | 0.08  | 0.02  |
| $10^{-5}$ | 2.05       | 0.07  | 0.10  | 0.04  |
| $10^{-6}$ | 2.15       | 0.10  | 0.12  | 0.05  |
| $10^{-7}$ | 2.25       | 0.11  | 0.13  | 0.06  |

Con base en estos resultados, se decidió tomar  $\omega = 0.06$  t/m para calcular los momentos flexionantes en puentes con claros mayores a 45m, y  $\omega = 0.13$  t/m para obtener las fuerzas cortantes en claros de más de 30m.

**7. Cálculo de la carga uniformemente distribuida del sistema de cargas vivas**



**Fig. 7.5 Comparación de resultados: simulación vs subsistema de cargas**



**Fig. 7.6 Efectos de la carga uniforme**

## 7. Cálculo de la carga uniformemente distribuida del sistema de cargas vivas

En la figura 7.6 se presentan los **momentos totales**, que resultan de aplicar el sistema completo de cargas vivas y superponer los efectos de los subsistemas de cargas concentradas y uniforme, en un puente con claro de 60m. También se muestran los que se obtienen con el primero de éstos, así como los momentos flexionantes máximos que se calcularon en la simulación para cada probabilidad de excedencia.

Las diferencias entre los primeros y los segundos son las contribuciones de la carga uniforme. Se observa que los momentos flexionantes que produce el sistema de cargas vivas igualan (en Log P=-7) o superan un poco a los simulados, por lo que se considera razonable el valor de  $\omega = 0.06$  t/m.

En las figuras 7.7 y 7.8 se hacen comparaciones semejantes a las anteriores, pero con las fuerzas cortantes máximas asociadas a claros de 45 y 60m, respectivamente. En ambas se aprecia que las totales son iguales (en Log P = -7) o un poco mayores que las simuladas, por lo que se considera adecuado el valor de  $\omega = 0.13$  t/m.

### **7.2 Comparaciones con otros sistemas de cargas vivas**

En las figuras 7.9 y 7.10 se comparan los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes totales que se obtienen al aplicar el sistema de cargas vehiculares aquí desarrollado, con los que resultan con otros modelos de cargas vivas. En ellas se observa que tanto los modelos de AASHTO 94 y OHBDC, como el propuesto en la referencia 3 para aplicarse en carreteras primarias y troncales, **sobrestiman** mucho los valores requeridos para diseño de puentes en carreteras alimentadoras.

Para apreciar los niveles de sobrestimación, en la figura 7.11 se presenta la gráfica de los momentos flexionantes relativos, que resultan de dividir a los que corresponden a cada modelo entre los que se obtienen con el nuevo sistema de cargas vehiculares. En ella se observa que el canadiense sobrestima entre 13% en claros de 15m hasta 90% en claros de 60m; el de la AASHTO, entre 39 y 124%, y el de la referencia 3, entre 81 y 169%.

Asimismo, en la figura 7.12 se comparan las gráficas de las fuerzas cortantes relativas. En ella se aprecia que el modelo de OHBDC sobrestima entre 25 y 78%; el de la AASHTO, entre 50 y 181%; y el de la referencia 3, entre 115 y 163%.

7. Cálculo de la carga uniformemente distribuida del sistema de cargas vivas

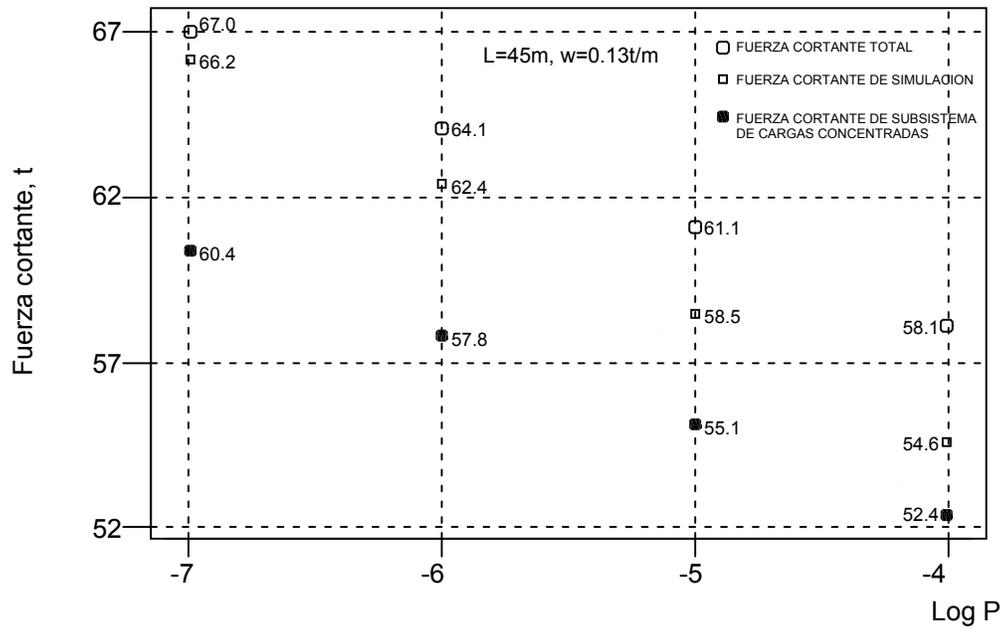


Fig. 7.7 Efectos de la carga uniforme

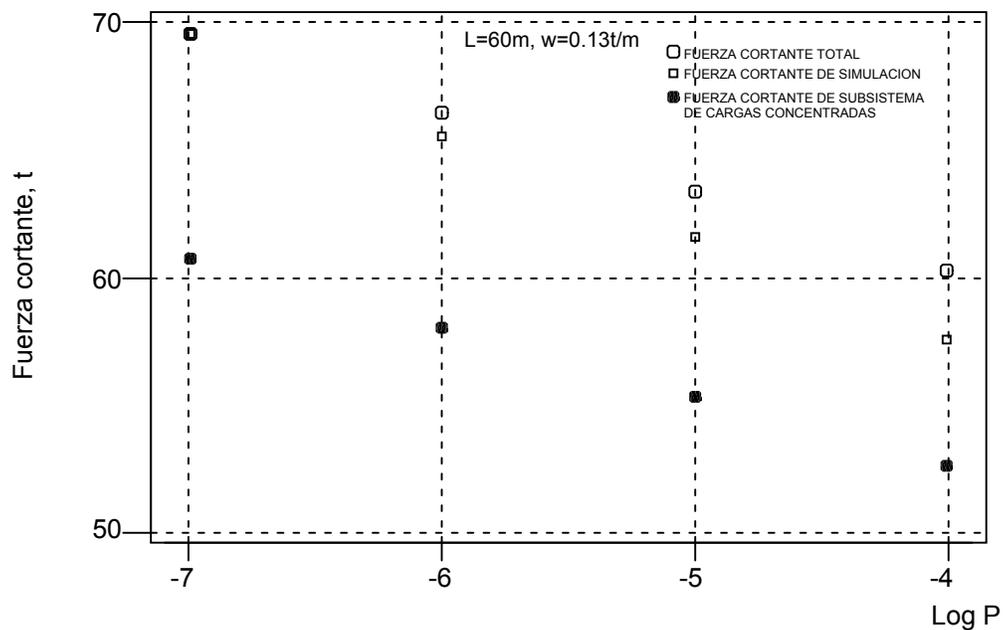
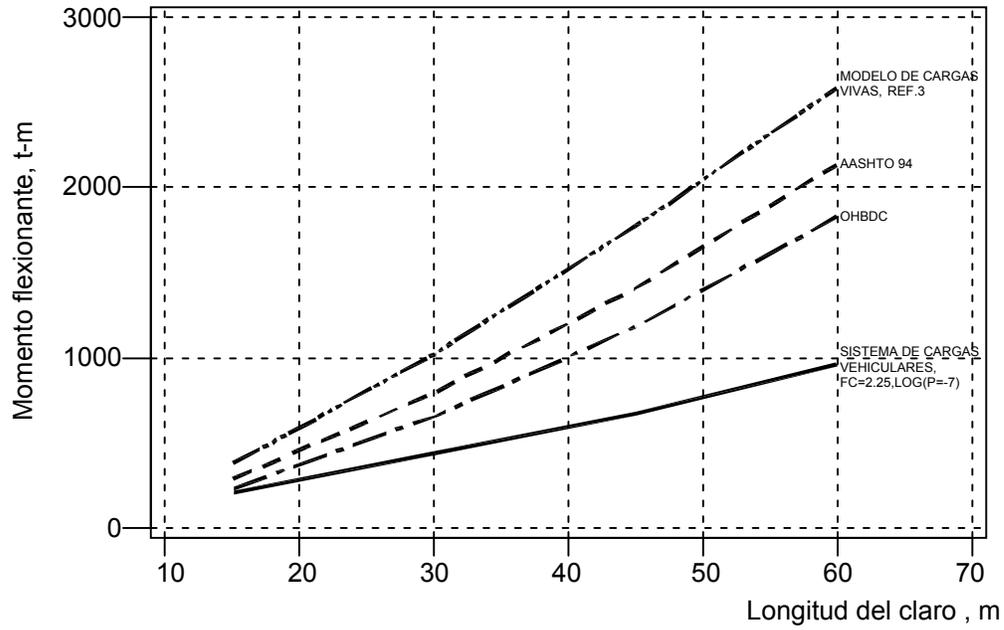
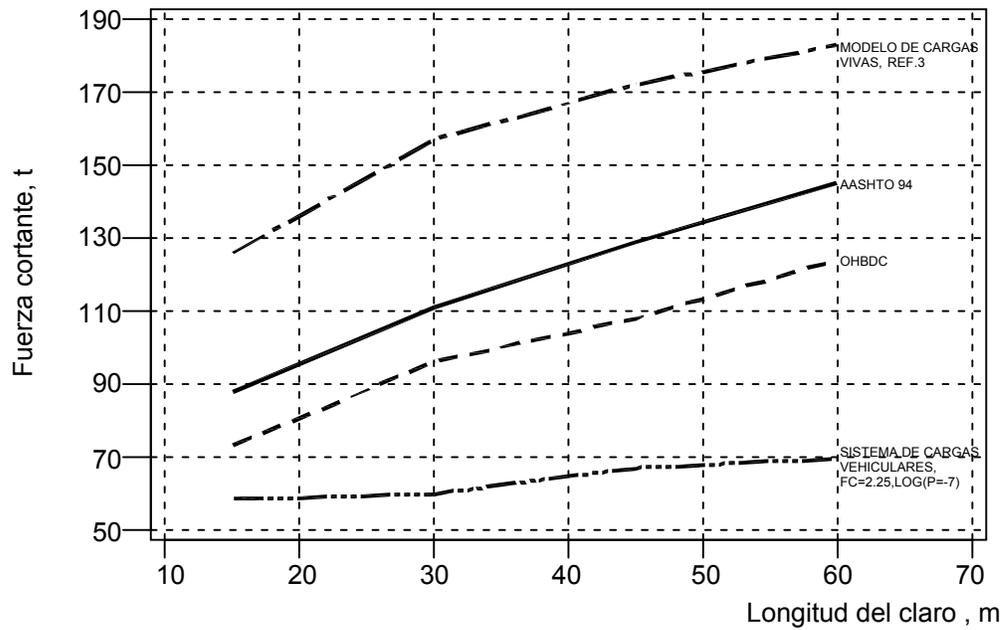


Fig. 7.8 Efectos de la carga uniforme

**7. Cálculo de la carga uniformemente distribuida del sistema de cargas vivas**

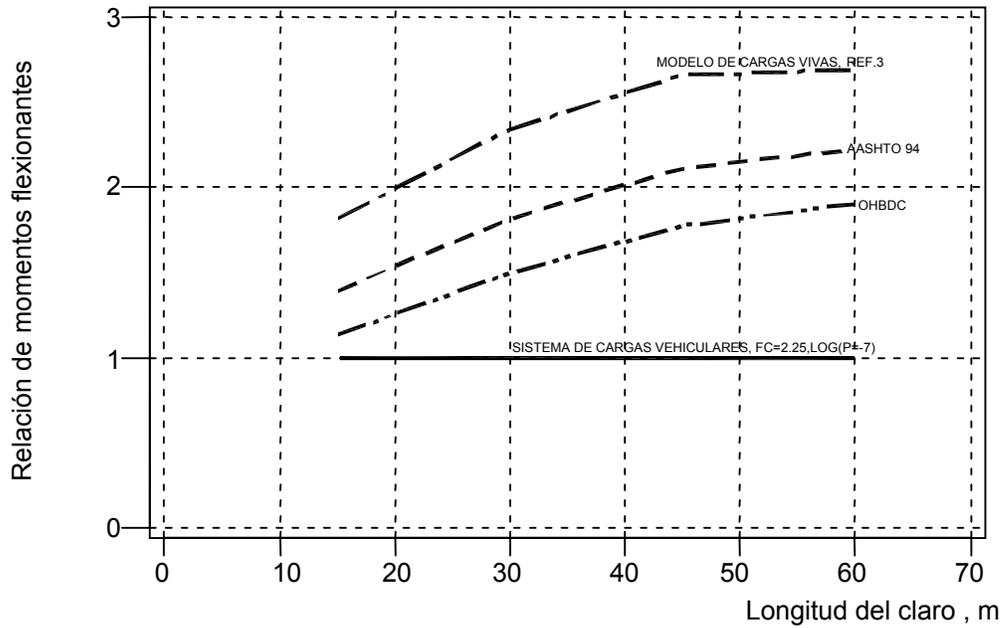


**Fig. 7.9 Sistema de cargas vehiculares vs otros modelos de cargas vivas**

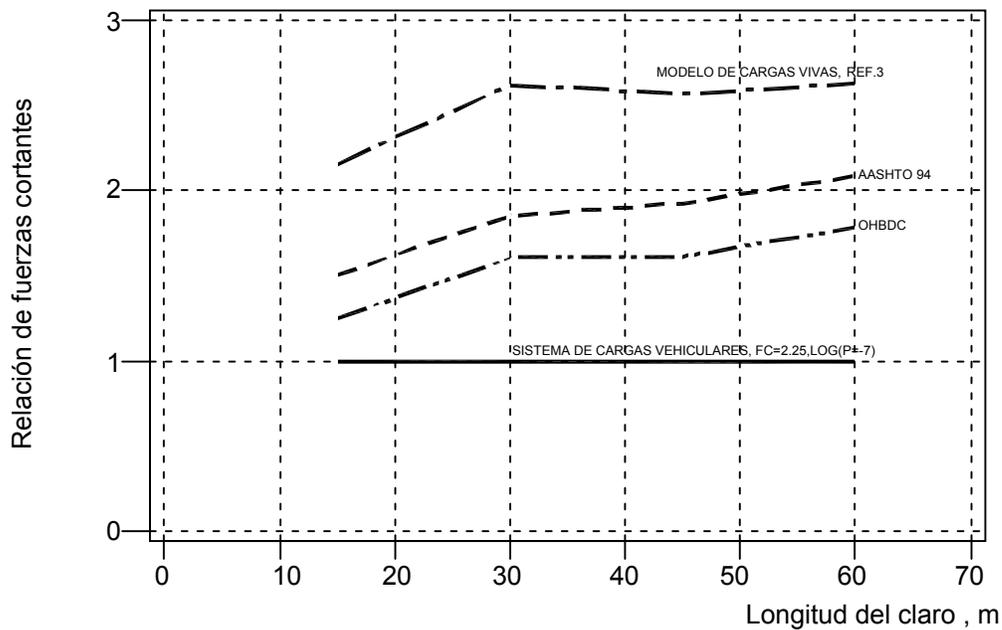


**Fig. 7.10 Sistema de cargas vehiculares vs otros modelos de cargas vivas**

## 7. Cálculo de la carga uniformemente distribuida del sistema de cargas vivas



**Fig. 7.11 Momentos flexionantes relativos respecto al sistema de cargas vehiculares**



**Fig. 7.12 Fuerzas cortantes relativas respecto al sistema de cargas vehiculares**

## 7. Cálculo de la carga uniformemente distribuida del sistema de cargas vivas

Las observaciones anteriores conducen a la conclusión de que la aplicación de los modelos de cargas vivas de los reglamentos AASHTO y OHBDC, y de la referencia 3, **conduce a estructuras de puentes sobrediseñados** y, consecuentemente, a costos excesivos, en tanto que **la utilización del sistema de cargas vehiculares aquí desarrollado conduce a puentes suficientemente seguros y, a la vez, económicamente adecuados**, ante el tránsito de los camiones C3 (o menores) que circulan con grandes cargas en las carreteras alimentadoras de México.

## **8. Factores de carga viva, de carriles múltiples y de efectos dinámicos. Fuerzas centrífuga y de frenado**

---

Dado que en el reglamento vigente de la AASHTO para diseño estructural de puentes se vierten una gran experiencia y una serie de resultados experimentales, se propone aquí seguir utilizando en México la normativa general que en él se establece, **cambiando el modelo de cargas vivas por el sistema de cargas desarrollado en este trabajo**, y utilizando factores de carga para diseño, servicio y fatiga congruentes con las magnitudes del sistema de cargas concentradas nominales del mismo, que se calcularán a continuación.

### **8.1 Factores de carga viva para diseño**

El factor de carga viva para diseño, según la AASHTO, es un parámetro que asume diversos valores, cada uno de los cuales se aplica según las combinaciones de cargas que se utilicen. En principio, tres de éstos aparecen en las combinaciones denominadas “**Resistencia I**”, “**Resistencia II**” y “**Resistencia V**”.

**Los valores del factor de carga viva básico 1.95, 2.05, 2.15 y 2.25, que se calcularon en este trabajo, se aplicarán al caso “Resistencia I”, que es la considerada como básica para diseño, según sea la probabilidad de excedencia que se utilice o el número, N, de vehículos C3 que se espera transiten por la carretera en el tiempo de vida útil previsto en el diseño del puente.**

Para calcular los otros factores de carga, se adopta aquí el criterio de mantener la misma proporcionalidad que existe en los valores establecidos en el código AASHTO, por lo que para “**Resistencia II**” y “**Resistencia V**”, se tiene que los valores del factor de carga viva básico se multiplicarán por la relación  $1.35/1.75 = 0.77$ , con lo cual se obtienen **1.50, 1.58, 1.66 y 1.73**, respectivamente. En estas dos combinaciones, el valor de la carga viva concentrada que resulta al aplicar el factor de carga 1.73, tiene una probabilidad de excedencia de 0.15%, según la función de riesgo de Weibull para PT.

En adición a las combinaciones de cargas antes referidas, en el reglamento de la AASHTO se establecen dos casos adicionales para diseño, denominados “**Evento extremo I**” y “**Evento extremo II**”.

El “**Evento extremo I**” corresponde a combinaciones de cargas que incluyen los efectos de temblores de tierra y, según dicho reglamento, el valor del factor de carga que se aplica a la carga viva se determina para cada proyecto; sin embargo, en él se comenta que según estudios probabilísticos de combinación de cargas no correlacionadas, como lo son las sísmicas y las vehiculares, un valor razonable es 0.5; por lo tanto, si no se tiene mejor opción, se sugiere adoptar uno que guarde la proporcionalidad  $0.5/1.75 = 0.29$ , al igual que para el “**Evento extremo II**”. Al hacer esto, los valores del factor de carga viva son **0.57, 0.60, 0.62 y 0.65**, respectivamente.

Además, tomando en cuenta que las cargas de frenado (BR), centrífuga (CE), sobrepeso de la carga viva (LS) y de efecto dinámico (IM) dependen directamente de la magnitud de la carga viva vehicular, a éstas **se aplican los mismos valores del factor de carga viva** antes calculados para cada estado límite (los símbolos utilizados son los del reglamento vigente de la AASHTO).

## **8.2 Factores de carga viva para revisar por condiciones de servicio y por fatiga**

Con el fin de calcular los valores del factor de carga viva que se deben emplear para revisar por condiciones de servicio, se tomó arbitrariamente aquí el criterio de que la carga vehicular resultante fuera excedida, cuando mucho, una vez por semana en promedio. Si para diseño se toman  $N = 10,000,000$  y una vida del puente de 25 años, el número de vehículos promedio que pasarían sobre el puente en una semana sería de 7,692, por lo que la probabilidad de excedencia (riesgo) es  $p=0.00013$  y la confiabilidad es  $q=0.99987$ .

Utilizando la distribución de probabilidades de Weibull que se determinó para la variable aleatoria PT, se obtiene, para las probabilidades anteriores, que  $PT=33.5t$ , a la cual corresponde un factor de carga de  $33.5/18 = 1.86$ . Para  $N = 1,000,000$  el factor de carga resulta ser **1.70**, para  $N = 100,000$ , es **1.50**, y para  $N = 10,000$  es **1.20**. Estos valores se aplican a las mismas condiciones que en el actual reglamento de la AASHTO se engloban con el nombre de “**Condiciones de Servicio II**”: *“para combinaciones de cargas tendientes a controlar el flujo del acero en estructuras construidas con este tipo de material, y para deslizamientos en conexiones críticas debidas a carga viva vehicular”*.

Para la revisión por “**Condición de Servicio I**”, se propone aquí conservar la misma proporcionalidad (1.0/1.3) que existe en el reglamento de la AASHTO, con respecto a cada uno de los cuatro valores anteriores; los respectivos valores del factor de carga viva que así se obtienen son **1.43, 1.31, 1.15 y 0.92**.

Esta Condición de Servicio I corresponde a: “*combinación de cargas relacionadas con la operación normal del puente, viento de 90 km/h sobre la estructura y viento sobre la carga viva, ambas con factor de carga de 0.3, fricción, temperatura uniforme y contracción con sus valores nominales, y gradiente de temperatura y asentamientos, con factores de carga que se determinan de acuerdo con lo que en dicho reglamento se señala*”.

De acuerdo con la función de riesgo de Weibull para PT, el valor que resulta de usar el factor de carga de  $(1.0/1.3) \times 1.68 = 1.43$  produce una carga viva que tiene una probabilidad de excedencia de 1.8%.

Para la “**Condición de Servicio III**”, que corresponde a “*combinación de cargas para revisar la tensión en concreto presforzado para control del agrietamiento*”, manteniendo el mismo criterio de proporcionalidad, **se propone que los factores de carga se calculen multiplicando los de la “Condición de Servicio II” por  $0.8/1.3 = 0.62$** ; al hacer esto, resultan los siguientes valores **1.15, 1.05, 0.93 y 0.74**. La carga viva que resulta de esto, de acuerdo con la función de riesgo de PT, para el caso  $N = 10,000,000$ , tiene probabilidad de excedencia de 15%.

Para la **revisión por fatiga**, se utiliza solamente el subsistema de cargas concentradas con **factores de carga que van de 0.84 para  $N = 10,000$ , hasta 0.97 para  $N = 10,000,000$** , que resultan de aplicar el criterio de proporcionalidad de  $0.75/1.75 = 0.43$  por los factores de carga viva básicos.

En la Tabla 2 se presentan las combinaciones de carga que establece la AASHTO, así como los factores de carga que aquí se proponen aplicar a la carga viva y a sus consecuentes (IM, CE, BR y LS), en cada combinación en que aparecen, al utilizar el sistema de cargas vivas vehiculares desarrollado en este trabajo.

**Tabla 2 – Factores de Carga Viva**

| Estado Límite       | Factores de carga viva |                      |                      |                      |
|---------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                     | Si N=10 <sup>4</sup>   | Si N=10 <sup>5</sup> | Si N=10 <sup>6</sup> | Si N=10 <sup>7</sup> |
| Resistencia – I     | 1.95                   | 2.05                 | 2.15                 | 2.25                 |
| Resistencia – II    | 1.50                   | 1.58                 | 1.66                 | 1.73                 |
| Resistencia – V     | 1.50                   | 1.58                 | 1.66                 | 1.73                 |
| Evento extremo – I  | 0.57                   | 0.60                 | 0.62                 | 0.65                 |
| Evento extremo – II | 0.57                   | 0.60                 | 0.62                 | 0.65                 |
| Servicio – I        | 0.92                   | 1.15                 | 1.31                 | 1.43                 |
| Servicio – II       | 1.20                   | 1.50                 | 1.70                 | 1.86                 |
| Servicio – III      | 0.74                   | 0.93                 | 1.05                 | 1.15                 |
| Fatiga              | 0.84                   | 0.88                 | 0.92                 | 0.97                 |

## 7. Presencia múltiple de cargas vivas

En los diversos reglamentos que existen para el diseño estructural de puentes, es aceptable multiplicar por factores iguales o menores que uno a los efectos que producen los sistemas de carga viva, **cuando éstos se aplican a más de un carril simultáneamente**. Además, en el actual reglamento de la AASHTO, para análisis estructural utilizando un solo carril, se usa un factor de 1.2.

En virtud de que en este trabajo la magnitud de la carga vehicular para el análisis estructural, que se estableció en el sistema de cargas vivas, corresponde a una probabilidad de no excedencia (confiabilidad) adoptada como aceptable en una sola línea de tránsito, no se requiere incrementar la carga viva cuando se utiliza un solo carril. Por consiguiente, se propone utilizar los factores de presencia múltiple señalados en la siguiente tabla:

| Número de líneas cargadas | Factor de presencia múltiple, "m" |
|---------------------------|-----------------------------------|
| 1                         | 1.00                              |
| 2                         | 0.80                              |
|                           |                                   |

La propuesta del factor para dos líneas cargadas, de 0.80, se respalda aquí por el hecho de que es suficientemente baja la probabilidad de que **se exceda, simultáneamente en dos carriles**, la carga viva que se usa para un solo carril multiplicada por 0.8. En efecto, de acuerdo con la distribución de probabilidades de Weibull para PT y considerando que la excedencia en cada vehículo es estadísticamente independiente de la excedencia en el otro, la probabilidad de que esto suceda es el producto de las probabilidades de excedencia de cada uno, o sea, el cuadrado de una, por ser iguales.

En tal caso, se tiene que la carga viva reducida CV2', asociada al factor de carga de 2.25, sería de  $18 \times 2.25 \times 0.8 = 32.4t$ , para el vehículo virtual de cada carril; por lo tanto, utilizando la función de riesgo de Weibull de PT, se obtiene que la probabilidad de excedencia de este valor es de  $3.28 \times 10^{-4}$ , cuyo cuadrado es  $1.07 \times 10^{-7}$ , que es casi igual a la de excedencia de  $CV2 = 1.8 \times 2.25 = 40.5t$  en un solo carril que, como se recuerda, es de  $10^{-7}$ .

#### 8.4 Efecto dinámico de la carga viva vehicular y fuerzas centrífuga y de frenado

En algunos puntos de este escrito se ha mencionado que la carga vehicular (o sus efectos) debe multiplicarse por un factor que se denominó "**factor de impacto**", que se asumió con un valor de 1.33, el cual toma en cuenta **la amplificación dinámica** que ocurre en el puente cuando los vehículos ruedan sobre superficies rugosas, con ondulaciones o baches, o con discontinuidades entre la carpeta de la carretera y la losa del puente o entre diversos tramos de puente, lo cual ocasiona impactos sobre la estructura y vibraciones de ésta.

En este trabajo se propone utilizar los mismos valores, criterios y excepciones que se especifican en el reglamento vigente de la AASHTO en su sección 3.6.2, para incorporar el efecto dinámico.

En tal caso, las cargas estáticas establecidas en el subsistema de cargas concentradas aquí desarrollado, deben multiplicarse por el **factor de impacto**

$$FI = (1 + IM/100) \quad (10)$$

en donde IM representa el **efecto dinámico**, y asume los valores señalados en la siguiente tabla:

**Tabla 3 – Efecto Dinámico**

| Componente                                    | IM, % |
|---|-------|
| Losas con juntas, en todos los estados límite | 75    |
| Otros componentes:                            |       |
| - Fatiga y estado límite de fractura          | 15    |
| - Todos los otros estados límite              | 33    |

Para componentes enterrados y puentes de madera se especifican otros valores. Para el subsistema de carga uniforme se considera  $IM=0$ , o sea,  $FI=1$ .

En adición a lo anterior, es recomendable que se revise si la estructura del puente, al vibrar por el paso de los vehículos, sufre desplazamientos verticales que **sobrepasen a los que son confortables o preocupantes** para los conductores y los peatones. En el reglamento canadiense OHBCD se establecen las gráficas que se muestran en la figura 8.1; la **deflexión estática, d**, se calcula utilizando sólo el subsistema de cargas concentradas propuesto, situado en el centro del claro, donde su efecto sea mayor, sobre una sola línea de tránsito. Los valores aceptables son los que coinciden con la curva correspondiente a cada caso o están por debajo de ella.

Para el cálculo de las **fuerzas centrífuga y de frenado** se propone aplicar también lo que especifica el reglamento AASHTO, tomando como carga viva sólo la total del subsistema de cargas concentradas nominales, afectada por el factor de carga viva correspondiente, según la Tabla 2.

Para calcular la **fuerza centrífuga**, dicho peso se multiplica por el siguiente factor:

$$C = \frac{4}{3} \frac{v^2}{gR}$$

donde  $v$  es la velocidad del vehículo, en metros por segundo, con un valor mínimo igual al máximo permitido en la carretera en que se ubique el puente,  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $9.81\text{m/s}^2$ ) y  $R$  es el radio de curvatura de la línea de tránsito, en metros. Esta fuerza horizontal, transversal a la línea de circulación, se debe aplicar a una altura de 1.8m sobre la superficie de rodamiento, y debe tomar en cuenta la posibilidad de presencia múltiple en los diversos carriles.

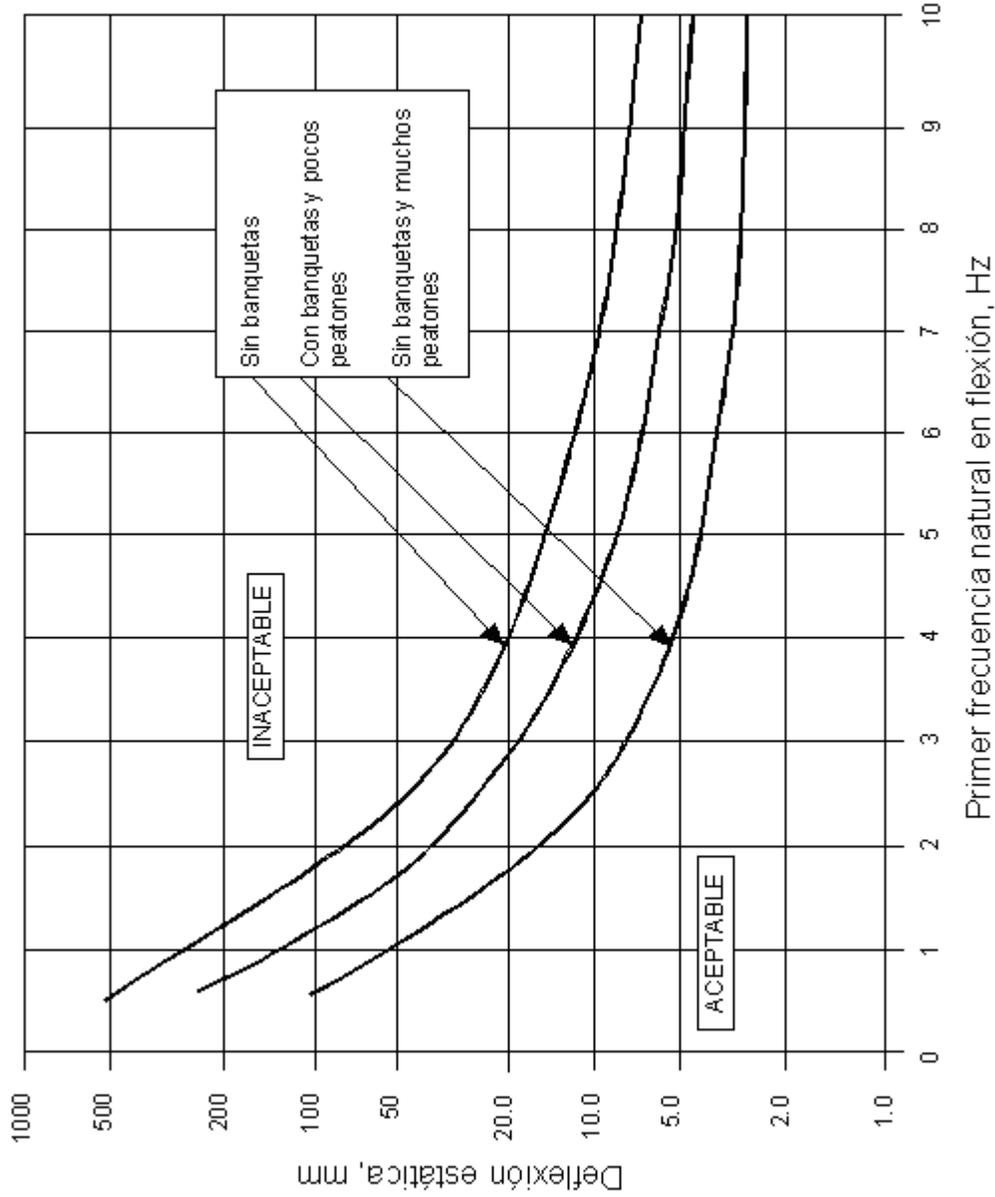


Fig 8.1 Regiones de aceptación y rechazo de deflexiones verticales

8. *Factores de carga viva, de carriles múltiples y de efectos dinámicos.*  
*Fuerzas centrífuga y de frenado*

---

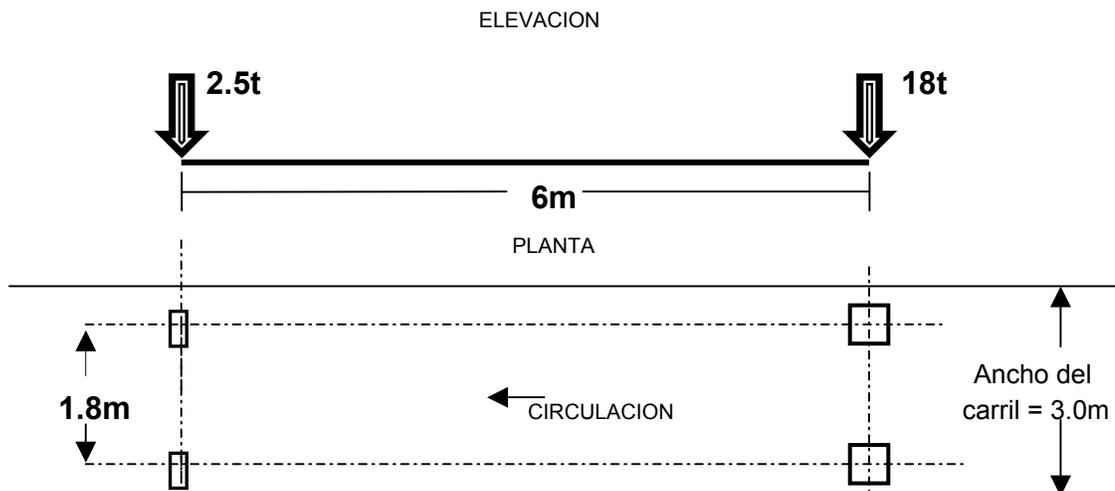
Para calcular la **fuerza de frenado**, se toma el 25% del peso total del vehículo virtual con el factor de carga viva que le corresponde, tomando sólo la línea de tránsito de un mismo sentido. La fuerza horizontal longitudinal que resulta, se aplica a una altura de 1.8m sobre la superficie de rodamiento.

## 9. Sistema de cargas vivas vehiculares. Conclusión y recomendación

### 9.1 Conclusión

El sistema de cargas vivas vehiculares que fue desarrollado en este trabajo, y que se propone para el análisis estructural de puentes en México, que se ubiquen en carreteras alimentadoras (tipo D), utilizando métodos de diseño que consideran estados límite de resistencia, servicio y fatiga, fue validado exhaustivamente y queda conformado con los dos siguientes subsistemas de cargas, que se aplican en un solo carril de tres metros de ancho y cuyos efectos son aditivos:

- 1) **Subsistema de cargas concentradas nominales**, aplicadas en dos ejes virtuales:



Los valores que puede asumir el **factor de impacto** se calculan con la ecuación 10 y la Tabla 3.

- 2) **Carga nominal uniformemente distribuida**,  $\omega$ , con los siguientes valores:

Para momentos flexionantes:  $\omega = 0$ , si  $L \leq 45\text{m}$   
 $\omega = 0.06 \text{ t/m}$ , si  $L > 45\text{m}$

Para fuerzas cortantes:  $\omega = 0$ , si  $L \leq 30\text{m}$   
 $\omega = 0.13$ , si  $L > 30\text{m}$

Factor de impacto = 1

## 9. Sistema de cargas vivas vehiculares. Conclusión y recomendación

Los valores que puede asumir el **factor de carga viva** para ambos subsistemas de carga se presentan en la Tabla 2; los **factores por presencia múltiple** en varios carriles simultáneamente, se presentan en la tabla de la sección 8.3.

Como **ayudas de diseño** para aplicar el modelo de cargas vivas, se pueden usar las curvas de resultados que se presentan en las figuras 9.1, para momentos flexionantes, y 9.2, para fuerzas cortantes, totales máximos para el nivel de confiabilidad que se escoja. En ellas se utiliza un factor de impacto de 1.33 para el sistema de cargas concentradas y de 1.0 para la carga uniformemente distribuida.

Alternativamente se pueden emplear los valores de dichos elementos mecánicos, o interpolaciones entre ellos, que se tienen en las siguientes tablas, para los factores de carga viva básicos de 1.95, 2.05, 2.15 y 2.25.

| L, m | Momentos Flexionantes, t-m |                    |                    |                    |
|------|----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|      | FC=1.95 (Log P=-4)         | FC=2.05 (Log P=-5) | FC=2.15 (Log P=-6) | FC=2.25 (Log P=-7) |
| 5    | 58                         | 61                 | 64                 | 67                 |
| 10   | 117                        | 123                | 128                | 135                |
| 15   | 180                        | 190                | 199                | 208                |
| 20   | 246                        | 259                | 272                | 284                |
| 25   | 314                        | 330                | 346                | 362                |
| 30   | 379                        | 398                | 417                | 437                |
| 35   | 446                        | 469                | 492                | 515                |
| 40   | 514                        | 540                | 566                | 593                |
| 45   | 578                        | 608                | 638                | 667                |
| 50   | 688                        | 721                | 754                | 787                |
| 55   | 762                        | 798                | 835                | 871                |
| 60   | 839                        | 879                | 919                | 959                |

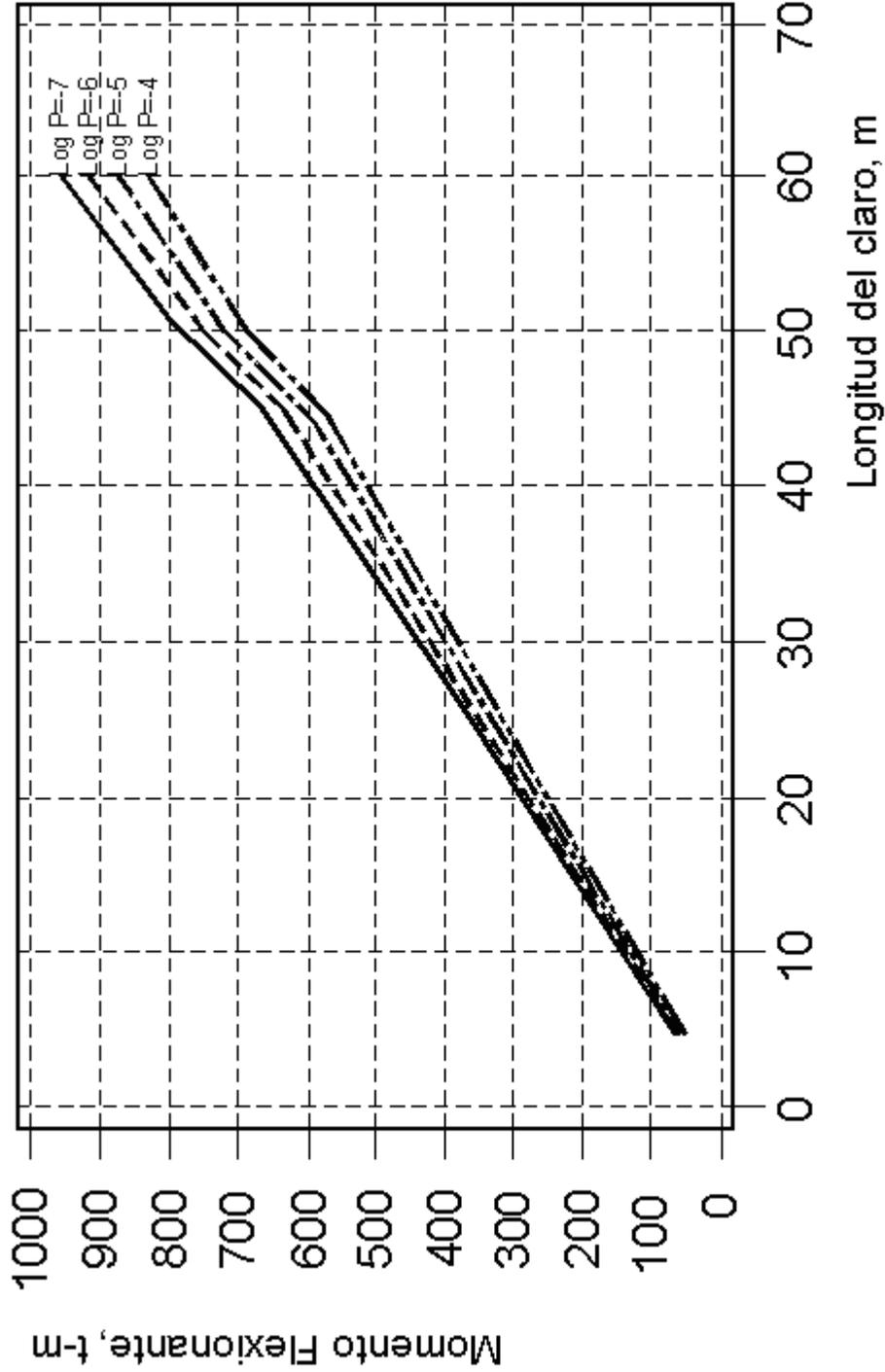


Fig 9.1 Momentos totales para diseño

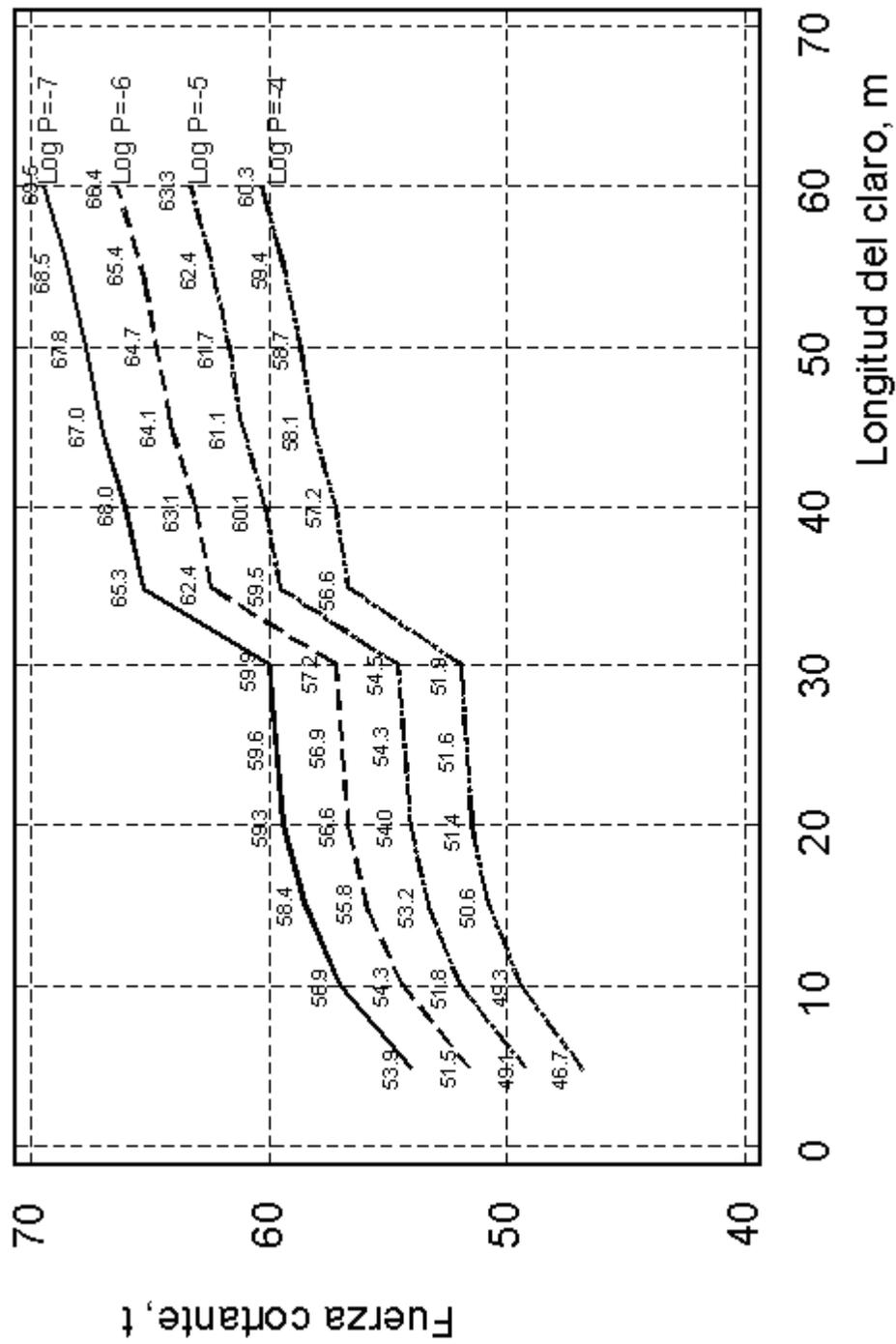


Fig 9.2 Fuerzas cortantes totales para diseño

| L, m | Fuerzas Cortantes, t |                    |                    |                    |
|------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|      | FC=1.95 (Log P=-4)   | FC=2.05 (Log P=-5) | FC=2.15 (Log P=-6) | FC=2.25 (Log P=-7) |
| 5    | 46.7                 | 49.1               | 51.5               | 53.9               |
| 10   | 49.3                 | 51.8               | 54.3               | 56.9               |
| 15   | 50.6                 | 53.2               | 55.8               | 58.4               |
| 20   | 51.4                 | 54.0               | 56.6               | 59.3               |
| 25   | 51.6                 | 54.3               | 56.9               | 59.6               |
| 30   | 51.9                 | 54.5               | 57.2               | 59.9               |
| 35   | 56.6                 | 59.5               | 62.4               | 65.3               |
| 40   | 57.2                 | 60.1               | 63.1               | 66.0               |
| 45   | 58.1                 | 61.1               | 64.1               | 67.0               |
| 50   | 58.7                 | 61.7               | 64.7               | 67.8               |
| 55   | 59.4                 | 62.4               | 65.4               | 68.5               |
| 60   | 60.3                 | 63.3               | 66.4               | 69.5               |

## 9.2 Recomendación

Por todo lo señalado en esta publicación, se recomienda seguir utilizando en México el reglamento vigente de la AASHTO para el diseño estructural de puentes en carreteras alimentadoras (tipo D), **pero cambiando tanto el sistema de cargas vivas vehiculares, como los factores de carga viva y de presencia múltiple, por los desarrollados en este trabajo.**



## **Referencias**

---

1. **Reglamento sobre el Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Autotransporte que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal.** Diario Oficial, México, D.F., 4 de septiembre de 1995.
2. Rascón, O.A., Barousse, M. y Ventura, G., **Análisis Normativo y Estadístico de Cargas Vivas en Puentes en México.** Publicación Técnica No. 97, Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 1997.
3. Rascón, O.A., **Modelo de Cargas Vivas Vehiculares para Diseño Estructural de Puentes en México.** Publicación Técnica No. 118, Instituto Mexicano del Transporte, 1999.
4. **LRFD, Bridge Design Specifications.** AASHTO, EUA, 1ª Ed., 1994.
5. **Ontario Highway Bridge Design Code.** Ministry of Transportation, Ontario, Canadá, 3ª Ed., 1991.
6. Rascón, O.A., **Desarrollo de un Modelo de Cargas Vivas para Diseño de Puentes en México.** Revista Ingeniería Civil, octubre de 1999, del Colegio de Ingenieros Civiles de México.



**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683  
Col. Mixcoac  
03730, México, D. F.  
Tel (55) 56 15 35 75  
55 98 52 18  
Fax (55) 55 98 64 57

**SANFANDILA**

Km. 12+000, Carretera  
Querétaro-Galindo  
76700, Sanfandila, Qro.  
Tel (442) 2 16 97 77  
2 16 96 46  
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>  
[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)