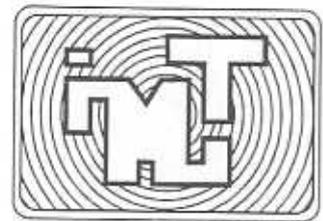
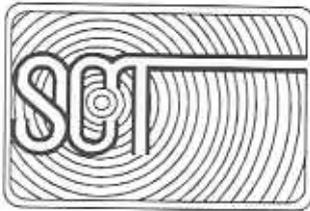


ISSN 0188-7297



MODELO DE CARGAS VIVAS VEHICULARES PARA DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES EN MEXICO

Instituto Mexicano del Transporte
Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Publicación Técnica No. 118
Sanfandila, Qro. 1999

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE
SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

**Modelo de cargas vivas
vehiculares para diseño
estructural de puentes
en México**

Publicación Técnica No. 118
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. Abraham Ramírez Sabag, Investigador, y Beatriz Ampudia Lámbarri, secretaria, todos del IMT; asimismo, por Juan Ramón Leyva Castro, estudiante de la Universidad Autónoma de Sinaloa, quien elaboró en el IMT los programas de cómputo requeridos en este trabajo.

También se reconoce la revisión de este documento que realizó el Ing. Amilcar Galindo Solórzano, Director de Apoyo Técnico de la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT, y sus valiosos comentarios.

INDICE

Resumen	III
Abstract	V
Resumen Ejecutivo	VII
1. Introducción	1
2. Diseño conceptual del modelo de cargas vivas. Análisis estadísticos	3
2.1 Diseño conceptual del modelo de cargas vivas	3
2.2 Composición y manejo de la muestra de vehículos registrados en 1996	5
2.3 Análisis estadísticos del peso bruto vehicular con datos de 1996	6
2.4 Análisis estadísticos de los pesos en grupos de ejes con datos de 1996	9
2.5 Análisis estadísticos de las distancias entre ejes con datos de 1996	17
2.6 Análisis estadísticos de los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos, con datos de 1993 y 1996	17
3. Análisis de correlación y regresión de algunas variables con datos de 1993 y 1996	33
3.1 Análisis de correlación y regresión con datos de 1996	33
3.2 Análisis de correlación y regresión con los datos de 1993	43
4. Análisis estadísticos y de correlación y regresión de las muestras de 1993 y 1996 juntas	61
5. Análisis comparativo con reglamentos para diseño de puentes	69
6. Desarrollo cuantitativo del modelo de cargas vivas vehiculares	73
6.1 Metodología para integrar cuantitativamente el modelo de cargas vivas	73

6.2	Determinación de la ley de probabilidades de PT1	75
6.3	Cálculo del valor de la carga virtual CV2	79
6.4	Determinación de la ley de probabilidades de PT2 y Cálculo de la carga virtual CV3	81
6.5	Determinación de la carga virtual CV1	85
6.6	Cálculo de las separaciones entre las cargas virtuales	85
6.7	Determinación del factor de carga viva	89
6.8	Validación parcial del modelo de carga viva	91
6.8.1	Validación utilizando los elementos mecánicos reales más grandes	91
6.8.2	Validación utilizando los elementos mecánicos máximos esperados según los análisis probabilísticos	91
6.8.3	Validación utilizando los valores máximos que se predicen con las regresiones múltiples	111
6.9	Determinación del valor de la carga uniformemente distribuida del modelo de cargas vivas	114
6.9.1	Determinación del valor de α	116
7.	Validación final del modelo de cargas vivas vehiculares	137
8.	Factores de carga viva, de carriles múltiples y de efectos dinámicos. Fuerzas centrífuga y de frenado	147
8.1	Factores de carga viva para diseño	147
8.2	Factores de carga viva para revisar por condiciones de servicio y por fatiga	148
8.3	Presencia múltiple de cargas vivas	150
8.4	Efecto dinámico de la carga viva vehicular y fuerzas centrífuga y de frenado	151
9.	Modelo de cargas vivas vehiculares. Conclusión y recomendación	155
9.1	Conclusión	155
9.2	Recomendación	156
	Referencias	157

Resumen

El propósito fundamental de esta investigación es **generar un modelo o sistema de cargas vivas vehiculares**, que tome en cuenta los enormes pesos que regularmente transportan en nuestro país los grandes vehículos de carga, y que, por consiguiente, pueda proponerse para realizar el análisis estructural de puentes carreteros en México.

La necesidad de contar con dicho modelo surgió como recomendación de la investigación reportada en la referencia 1, misma que fue reconfirmada ampliamente como parte de este trabajo, al comprobarse que el modelo que se especifica en el actual reglamento de la AASHTO no es aplicable al caso de la República Mexicana, porque con él se obtienen elementos mecánicos para diseño muy inferiores a los que ocasionan los vehículos de carga más pesados.

El desarrollo del modelo de cargas vivas se sustenta en las evidencias empíricas contenidas en las colecciones de datos sobre pesos y dimensiones de vehículos de carga, que fueron captados por la SCT en 1993 y 1996, en 26 puntos de aforo situados en distintas carreteras del país. A partir de las variables muestreadas, se generaron otras para diseñar, cuantificar y validar el modelo de cargas vivas, mediante análisis estadísticos y probabilísticos de diversa índole.

El diseño conceptual del modelo comprende un sistema 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, en tanto que la carga uniforme se determina mediante un proceso de simulación estocástica de secuencias de vehículos pesados.

Como parte del desarrollo del modelo, 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 para diseño estructural y para revisión por condiciones de servicio y fatiga. Al hacer esto, se genera un **sistema de cargas concentradas nominales**, que es congruente con el peso bruto máximo que se establece en el reglamento sobre pesos y dimensiones de vehículos que está vigente en México.

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

The first part of the paper discusses the general principles of the theory of the firm, focusing on the role of the entrepreneur and the importance of the firm's internal structure. It also touches upon the relationship between the firm and the market, and the role of the firm in the economy.

The second part of the paper deals with the specific aspects of the theory of the firm, such as the determination of the firm's size, the choice of technology, and the allocation of resources. It also discusses the role of the firm in the process of innovation and the development of new products.

The third part of the paper examines the relationship between the firm and the market, and the role of the firm in the process of competition. It also discusses the impact of government intervention on the firm's behavior and the overall performance of the economy.

The fourth part of the paper focuses on the role of the firm in the process of innovation and the development of new products. It discusses the importance of the firm's internal structure in this regard, and the role of the entrepreneur in the process of innovation.

The fifth part of the paper discusses the impact of government intervention on the firm's behavior and the overall performance of the economy. It examines the role of government in the process of innovation and the development of new products, and the impact of government intervention on the firm's internal structure.

The sixth part of the paper concludes the paper by summarizing the main findings and discussing the implications of the theory of the firm for the future of the economy. It also discusses the role of the firm in the process of innovation and the development of new products, and the impact of government intervention on the firm's behavior and the overall performance of the economy.

Abstract

The main objective of this paper is to develop a model of vehicle live loads systems, in such a manner to take into account the large weights that the big trailers regularly transport in our country and, therefore, be able to be proposed to carry out the structural highway bridge analysis in Mexico.

The necessity of having such a model came out as a recommendation in reference 1, which was widely confirmed in this paper, because it was proved that the live load model specified in the AASHTO bridge design code is not applicable in Mexico, because it produces mechanical elements for design which are much lower than those caused by the real heavy vehicles.

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

The design, quantification and validation of the live load model, was made by using statistical and probabilistical analysis of a set of random variables generated in the paper.

The configuration of this live loads model, as other models do, has a concentrated loads system and a uniformly distributed load.

The values assigned to each one of the concentrated loads are calculated by using various, probabilistic based, reliability analysis, and the value of the distributed load is obtained through a stochastic simulation process of sequences of heavy vehicles on a traffic line.

The live load factors and the nominal concentrated load system are obtained in congruence with the weights and dimensions code of vehicles in Mexico.

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 bridge design in Mexico.

The first part of the report deals with the general situation of the country and the progress of the work during the year.

The second part of the report deals with the results of the work done during the year and the progress of the various projects.

The third part of the report deals with the financial situation of the organization and the results of the various projects.

The fourth part of the report deals with the personnel situation of the organization and the results of the various projects.

The fifth part of the report deals with the general situation of the country and the progress of the work during the year.

The sixth part of the report deals with the results of the work done during the year and the progress of the various projects.

The seventh part of the report deals with the financial situation of the organization and the results of the various projects.

The eighth part of the report deals with the personnel situation of the organization and the results of the various projects.

The ninth part of the report deals with the general situation of the country and the progress of the work during the year.

The tenth part of the report deals with the results of the work done during the year and the progress of the various projects.

1. Introducción

En este trabajo se toman como antecedentes las conclusiones y recomendaciones que se establecieron en la publicación titulada Análisis Normativo y Estadístico de las Cargas Vivas en Puentes en México (referencia 1). En ella se demostró, utilizando la información correspondiente a una muestra de pesos y dimensiones de vehículos de carga captada por la SCT en 1993, 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 momentos flexionantes y fuerzas cortantes para diseño bastante inferiores a las 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 9).

Por lo anterior, se concluye que no es aconsejable seguir utilizando el modelo de cargas vivas del reglamento de la AASHTO, ni adoptar el de Ontario; aunque el modelo de cargas vivas del código europeo (referencia 6), que también fue validado, si da valores superiores, se considera poco aconsejable su adopción, porque este reglamento difiere mucho en su filosofía del de la AASHTO, con el que los diseñadores de puentes en México están familiarizados. Estos resultados fueron reconfirmados en este trabajo, utilizando para ello otra muestra que fue captada por la SCT en 1996.

Por lo tanto, es recomendable que se formule un modelo de cargas vivas que, al aplicarse para el análisis estructural de cada puente, arroje momentos flexionantes y fuerzas cortantes que sean superiores a los que ocasionan los vehículos reales más pesados, de manera que se logre un **nivel de seguridad adecuado** en el diseño de nuevos puentes en México, y que pueda ser utilizado para revisar la seguridad de los ya existentes. Esto, aunado al incremento actual del control que realiza la SCT a los vehículos de carga en ruta, para que se apeguen al RPD.

Para atender esta recomendación, se llevó a cabo la investigación que se describe en esta publicación, que tuvo los siguientes objetivos:

1. Realizar el **diseño conceptual del modelo de cargas vivas.**
2. Estudiar estadística y probabilísticamente a las muestras de vehículos de carga tipos T3-S3 y T3-S2-R4, que obtuvo la SCT en 1993 y 1996, en términos de los datos de las variables que más influyen en los **momentos flexionantes** y en las **fuerzas cortantes máximas**

(elementos mecánicos) que ellos ocasionan a los puentes. Algunas de estas variables son las directamente muestreadas, pero otras son formuladas aquí en función de ellas y **sirven para confirmar la topología y validar el modelo de cargas vivas.**

3. Calcular los valores máximos de los elementos mecánicos que son ocasionados por cada vehículo en puentes de distintas longitudes, y realizar análisis estadísticos y probabilísticos de todos ellos.
4. Realizar estudios estadísticos de las correlaciones que existen entre algunas de las variables más importantes, para identificar relaciones causa-efecto, en particular, cargas-elementos mecánicos.
5. Realizar comparaciones de los elementos mecánicos más grandes que se hayan obtenido para cada longitud de puente, con los que resultan de aplicar los modelos de cargas vivas de las normas antes referidas para diseño estructural de puentes, para validar su aplicabilidad en México.
6. **Formular y validar el modelo de cargas vivas vehiculares**, de manera que garantice un nivel de confiabilidad adecuado y, por tanto, pueda proponerse como norma para el análisis estructural de puentes en México, que sea congruente con los métodos y criterios de diseño por estados límite.
7. Formular y adoptar algunos elementos normativos complementarios que se relacionan con las cargas vehiculares, principalmente los **factores de carga viva** que se deben utilizar en cada una de las combinaciones de cargas que se utilizan para diseño, y para revisar por condiciones de servicio y fatiga, que se establecen en el reglamento de la AASHTO. 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 el **sistema de cargas nominales del modelo sea congruente** con el reglamento sobre pesos y dimensiones de vehículos que está vigente en México (RPD).

La información captada en los procesos de muestreo, que se utiliza en este trabajo, corresponde a los valores que asumen las variables aleatorias “**peso de cada eje**”, “**separación entre cada par de ejes consecutivos**” y “**peso bruto vehicular**”. La muestra de 1993 tiene 10,179 vehículos T3-S3 y T3-S2-R4, y la de 1996 se compone de 10,079.

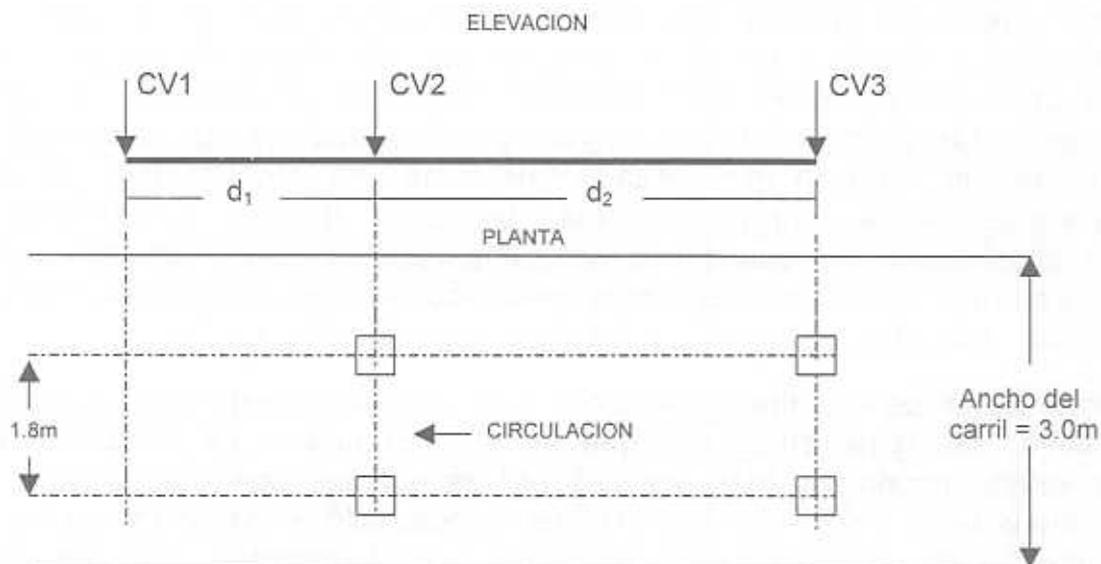
Para proponer la topología del modelo de cargas vivas a desarrollar, se toma como punto de partida que todos los modelos que se incluyen en los reglamentos de otros países consideran **dos sistemas de cargas: uno de concentradas y otro de uniformemente repartida** (referencia 1). El de cargas concentradas produce efectos en los puentes que son equivalentes a los que ocasiona un vehículo muy pesado que tiene una probabilidad muy baja de presentarse; el de carga uniforme produce efectos equivalentes a los que ocasiona una secuencia de vehículos 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.

Para diseñar los estudios estadísticos y probabilísticos establecidos en el primer objetivo, se tomó en cuenta que en la referencia 1 se comprobó que los elementos mecánicos más grandes en los puentes son ocasionados por los vehículos tipos T3-S3 y T3-S2-R4, por lo cual sólo éstos se toman en cuenta; asimismo, se consideró que las cargas más grandes que los vehículos involucrados transmiten a la estructura de un puente, se agrupan en los ejes de rodamiento que conforman tándems, tridems y dobles tándems.

Por lo anterior, 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 las cargas totales (resultantes) de cada grupo de ejes y de la ubicación de sus líneas de acción, y se comprobó estadísticamente que esta hipótesis es correcta.

Por otra parte, se toma en cuenta la conclusión de la referencia 1, de que los elementos mecánicos más grandes calculados que producen a los puentes los vehículos T3-S3, muestreados en 1993, son muy parecidos a los que ocasionan los T3-S2-R4. Por esto se decide en este trabajo que el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas vehiculares, podría tener una topología simple de sólo tres ejes de aplicación, creando así un "vehículo virtual" (no existe) que tiene un eje delantero, un intermedio y un trasero; el delantero corresponde al de igual posición en el tractor, el intermedio representa la carga total que se transmite por el tándem del tractor, y el trasero representa el peso total que baja por el tridem de los T3-S3 y por el doble tándem de los T3-S2-R4. Por lo mismo, con el modelo que resulta se sobrestiman los efectos en puentes en que no se permite el tránsito de estos tipos de vehículos (carreteras alimentadoras).

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



En esta figura los símbolos CV1, CV2 y CV3 representan a las “cargas virtuales” del “vehículo virtual”, y d_1 y d_2 son las distancias 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) se determinan en función de las magnitudes de las cargas virtuales.

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, CV2 y CV3, se formularon las siguientes variables aleatorias, en función de las variables aleatorias “pesos de los ejes”, PE_i , donde i es el número del eje:

PE_1 = peso del eje 1 (delantero)

PT_1 = peso del tándem 1 (del tractor) = $PE_2 + PE_3$

PT_2 = peso del “tándem” 2 (del trídem en los T3-S3 y del doble tándem en los T3-S2-R4) = $PE_4 + PE_5 + PE_6 + (PE_7)$

El nombre de PT_2 se asigna arbitrariamente, para dar secuencia a la nomenclatura. Las cargas virtuales CV1, CV2 y CV3 se relacionan, respectivamente, con PE_1 , PT_1 y PT_2

Para realizar los análisis estadísticos, es necesario calcular primero los valores que asumen PE_1 , PT_1 y PT_2 para cada vehículo de las muestras de 1993 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 vehicular, PBV, se pudo concluir lo siguiente, para el caso de 1996.

1. Los datos de pesos brutos vehiculares rebasan en el 52% de los casos a los valores permitidos en el RPD. El valor más grande de los T3-S3 fue 96t, el cual rebasa en 98% al permitido (48.5t); el más grande de los T3-S2-R4 fue 130.4t, que rebasa en 96% al autorizado (66.5t).
2. Los datos de pesos del tándem 1 rebasan al permitido (19.5t) en el 50% y 25% de los casos en los T3-S3 y T3-S2-R4, respectivamente; el mayor de los primeros (38t) rebasa en 95% al autorizado, de 19.5t, en tanto que en los segundos, el mayor, 30t, lo rebasó en 54%.
3. Los datos de pesos del tándem 2 rebasan al permitido (22.5t) en el 61% de los casos en los T3-S3, y en el 28% se rebasan las 36t autorizadas en los T3-S2-R4. El más grande de los primeros, de 58t, es 158% mayor en los T3-S3 y, en los segundos, el mayor, de 63t, rebasa al tolerable en 75%.

3. Análisis estadísticos de los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos

Como siguiente paso de esta investigación, se calcularon los momentos flexionantes y fuerzas cortantes máximos (elementos mecánicos) que cada vehículo de la muestra de 1996 le ocasiona a puentes de 15, 30 y 45m de claro, idealizados como vigas simplemente apoyadas, los cuales se denotan como M15, M30, M45, V15, V30 y V45, respectivamente.

Asimismo, se calcularon los elementos mecánicos que producen ambos tipos de vehículos, utilizando los valores máximos de los pesos por eje que se especifican en el RPD, con el fin de realizar comparaciones con los valores más grandes que se obtuvieron con los cálculos señalados en el párrafo anterior.

Los resultados se resumen en las figuras 2.18 y 2.19, de las cuales se extraen las siguientes conclusiones:

1. Los valores más grandes que se obtuvieron con los vehículos tipo T3-S3, correspondientes a los dos años de muestreo, son muy parecidos entre sí, y estos, a su vez, también lo son con los del T3-S2-R4 de 1993. Los de este último tipo, de 1996, son mayores a los anteriores entre 15 y 23%, salvo en el claro de 15m, en que los momentos del T3-S3 son un poco superiores.
2. Al comparar los casos del T3-S3 con los que se derivan del RPD, se aprecia que los primeros son mucho mayores, entre 226% y 303%. Para el T3-S2-R4 estas diferencias en exceso son entre 180% y 240%. Por lo tanto las cargas especificadas en el RPD no deben utilizarse para el diseño estructural de puentes, sino que es indispensable generar un modelo de cargas vivas para tal efecto.

4. Estudios estadísticos de correlación y regresión. Justificación del modelo conceptual

Un propósito importante que se tuvo al calcular los elementos mecánicos, fue realizar estudios de regresión y correlación estadística de éstos con los pesos de los tandems 1 y 2, para verificar si estos últimos pueden sustituir a las cargas de los grupos de ejes individuales que los conforman y, por tanto, justificar que el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas tenga sólo tres ejes de aplicación. En este proceso de análisis estadístico, se incluyó también a la separación entre los ejes 3 y 4 de cada vehículo, DE3.

De esta forma, se estableció un estudio de regresión y correlación lineal múltiples, en que el modelo matemático fue

$$M \text{ (o } V) = A + B PT2 + CPT1 + E DE3$$

en el cual A, B, C y E son los 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 correspondiente.

Este estudio se realizó con las muestras de 1993 y 1996 por separado, y con ambas conjuntando una sola. Asimismo, se estudiaron las muestras de los vehículos T3-S3 separadas de los T3-S2-R4, y las de ambos tipos conjuntando una sola, tanto para cada año por separado como para ambos años juntos.

Las conclusiones fueron las siguientes:

1. En todos los casos se obtuvo una magnífica relación lineal; como ilustración, basta señalar que los respectivos valores del coeficiente de correlación fueron 95.5, 98.4, 98.5, 88.3, 97.7 y 98.1 por ciento, para el caso de todas las muestras conjuntadas en una sola.
2. Los efectos de las cargas por eje de los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4 pueden modelarse muy bien utilizando las correspondientes resultantes PT1 y PT2, con lo cual **se comprueba que el sistema de cargas concentradas que se propone para el modelo de cargas vivas, es adecuado** para realizar los análisis estructurales que se requieren para el diseño de los puentes en México, ya que las variables principales PT1, PT2 y DE3 son las que más influyen en los valores que asumen los elementos mecánicos.
3. Por lo anterior, las magnitudes de las cargas virtuales CV2 y CV3 del modelo de cargas vivas, se pueden calcular mediante análisis probabilísticos de las variables aleatorias PT1 y PT2, respectivamente.
4. Mediante diversos análisis de variancia, se determinó que PT2 es la variable aleatoria que más influye en cada uno de los elementos mecánicos. En la figura 4.5 se presenta, como ejemplo, la regresión lineal marginal de M45 con PT2, en la que se aprecia la magnífica relación que existe entre ellas; el coeficiente de correlación, en este caso, es 98%.

5. Análisis de los modelos de cargas vivas de tres reglamentos para diseño de puentes

Con el fin de verificar, utilizando las muestras de 1993 y 1996, si los modelos de cargas vivas que se establecen en los reglamentos de la AASHTO, Ontario, Canadá, y Europa, para diseño estructural de puentes, son adecuados para cubrir el caso de los vehículos de carga en México, se calcularon los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos que dichos modelos producen en los puentes de 15, 30 y 45m de claro, idealizados como vigas simplemente apoyadas. Los resultados se comparan con los valores más grandes que resultaron de la muestra completa de 1993 y 1996, en las figuras 5.1 y 5.2; en ninguno de los casos se aplicaron factores de carga ni de impacto.

En la figura 5.1, correspondiente a los momentos flexionantes, el código europeo tiene valores que son inferiores entre 9% y 16%, los de la AASHTO y Canadá

son muy parecidos entre sí, pero son inferiores a los de la muestra, entre 17% y 74%.

En la figura 5.2, que contiene las fuerzas cortantes, el europeo subestima en 20% a 40%, y los de la AASHTO y de Canadá, cuyos resultados son muy parecidos entre sí, los resultados son inferiores a los de la muestra, entre 75% y 107%.

Estos resultados confirman que ninguno de los modelos de cargas vivas de los reglamentos antes señalados, son adecuados para representar a las grandes cargas vehiculares que transitan en las carreteras de México, por lo cual **se justifica plenamente la formulación del modelo** que se realiza como parte central de esta investigación

6.- Desarrollo cuantitativo del modelo de cargas vivas

Tomando en cuenta los resultados y conclusiones de los análisis estadísticos realizados en los capítulos anteriores, se establece que el diseño conceptual del modelo de cargas vivas vehiculares que se realizó en el capítulo 1 es adecuado, el cual tiene dos sistemas de cargas:

El primero se conforma con tres cargas concentradas con diferentes magnitudes y separaciones entre sí; el segundo tiene una carga uniformemente distribuida que se aplica a lo largo del carril de circulación, el cual se asume de 3.0m de ancho.

El sistema de tres cargas concentradas representa a un “vehículo virtual” (no existe), que ocasiona elementos mecánicos máximos **equivalentes** a los que producirían los vehículos reales, con una **pequeñísima probabilidad** de ser excedidos en el lapso de vida útil de un puente, el cual se considera de **50 años**. Por su parte, el sistema de carga uniformemente distribuida ocasiona elementos mecánicos que, **sumados** a los del vehículo virtual, corresponden a una secuencia de vehículos pesados que puede circular, con baja probabilidad, a lo largo de un puente.

Las magnitudes de todas las cargas virtuales se determinan aquí realizando diversos análisis probabilísticos de riesgos de excedencia que se presentan en este capítulo, de manera que al aplicarse para diseñar o revisar un puente, se logre un alto nivel de seguridad estructural. Las separaciones entre ellas se proponen mediante ajustes estadísticos.

El primer sistema se formula con sólo tres cargas, no únicamente por razones de simplicidad sino, primordialmente, porque se demostró en el capítulo anterior que las cargas de los dos grupos de ejes que transfieren las cargas más altas a los puentes se pueden representar por sus resultantes, que se denominaron PT1 y PT2, toda vez que los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos que producen los vehículos reales T3-S3 y T3-S2-R4 están fuertemente correlacionados con las magnitudes de PT1 y PT2. La tercer carga representa al peso del eje delantero del vehículo virtual, PED.

Metodología para integrar cuantitativamente el modelo

Con el fin de determinar qué valores asignarles a cada una de las variables aleatorias que participan en el modelo de cargas vivas y quede definido éste en términos cuantitativos, como parte de esta investigación se ideó la siguiente metodología:

1. Determinar las leyes de probabilidades que pueden representar adecuadamente el carácter aleatorio de las variables PT1, PT2 y PED que intervienen en el modelo, con el fin de poder realizar los análisis probabilísticos de riesgos.
2. Con base en las leyes de probabilidades que se asignen, determinar los valores que corresponden a PED, PT1 y PT2, de manera que éstos sólo sean rebasados en un periodo de 50 años con una probabilidad muy baja, es decir, que el riesgo sea muy pequeño. Los resultados que así se obtengan serán los valores de las **cargas virtuales** que integren el modelo de cargas vivas, las cuales se denotan como CV1, CV2 y CV3, respectivamente.
3. Asignar, con base en los resultados estadísticos, los dos valores de las separaciones que se propongan entre las cargas.
4. Con el fin de valorar el modelo, 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).
5. Determinar los valores de dichas variables que corresponden a una probabilidad pequeña de que **no sean excedidas en un periodo de 50 años**. Esta probabilidad es igual a la que se utilice para calcular a CV2 y CV3.

6. Comparar estos valores con los que resultan de calcularlos usando las ecuaciones de las respectivas regresiones múltiples.
7. Aplicar el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas y validar los resultados, comparándolos con los determinados en los puntos 5 y 6. En caso necesario, hacer ajustes al modelo.
8. Calcular el **factor de carga viva vehicular básico** y generar el **sistema de cargas concentradas nominales** del modelo.
9. Calcular la **magnitud de la carga virtual uniformemente repartida**, que constituye el segundo sistema de cargas del modelo.
10. Validar exhaustivamente el modelo completo de cargas vivas vehiculares.

Cálculo del sistema de cargas concentradas

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 PT1 y PT2, asociadas a cada tipo de vehículo y a cada año, se determinó que la distribución de Weibull resultó la más razonable en todos los casos.

Como ilustración, en la figura 6.3 se muestra el caso de la variable PT1 para la muestra de 1996.

Para calcular el valor de cada carga virtual, CV2 y CV3, mediante los análisis probabilísticos de riesgo, se tomó la decisión de que el **periodo de no excedencia** de la carga para diseño de los puentes sea de **50 años**, con lo cual se logra un nivel de seguridad razonable.

Tomando en cuenta las cantidades de vehículos de cada tipo y los lapsos de muestreo, se estimaron frecuentemente las probabilidades de excedencia correspondientes. Para el caso de juntar ambos tipos de vehículos de 1996 en una sola muestra, dicha probabilidad es 2.44×10^{-7} , a la cual corresponde un percentil, CV2, en la distribución de Weibull que se obtuvo para PT1, igual a 43.9t.

Al realizar esto mismo con los datos de 1993, la probabilidad de excedencia es 3.12×10^{-7} , a la cual corresponde un percentil, CV2, en la distribución de Weibull de PT1 que se calculó para este año, igual a 42.7t, que se parece bastante al obtenido en el párrafo anterior.

Al conjuntar las muestras de 1993 y 1996 en una sola, la probabilidad de excedencia es 2.78×10^{-7} , y el percentil correspondiente, CV2, es 44.4t, que es un poco mayor que los otros dos, por lo que se decidió tomar este último como valor de CV2.

Para calcular el valor de la carga virtual CV3, se realizaron análisis semejantes a los anteriores, con las distribuciones de probabilidades de Weibull de PT2 que se obtuvieron en cada caso, habiéndose calculado los percentiles 67.5t, 70.4t y 71.2t, con las muestras de 1993 y 1996 por separado, y con ambas juntas, respectivamente, que son bastante parecidas entre sí. La distribución de probabilidades de Weibull de PT2 que se obtuvo para este último caso, se presenta en la figura 6.8. Para el modelo se tomó la carga mayor, es decir, CV3 = 71.2t.

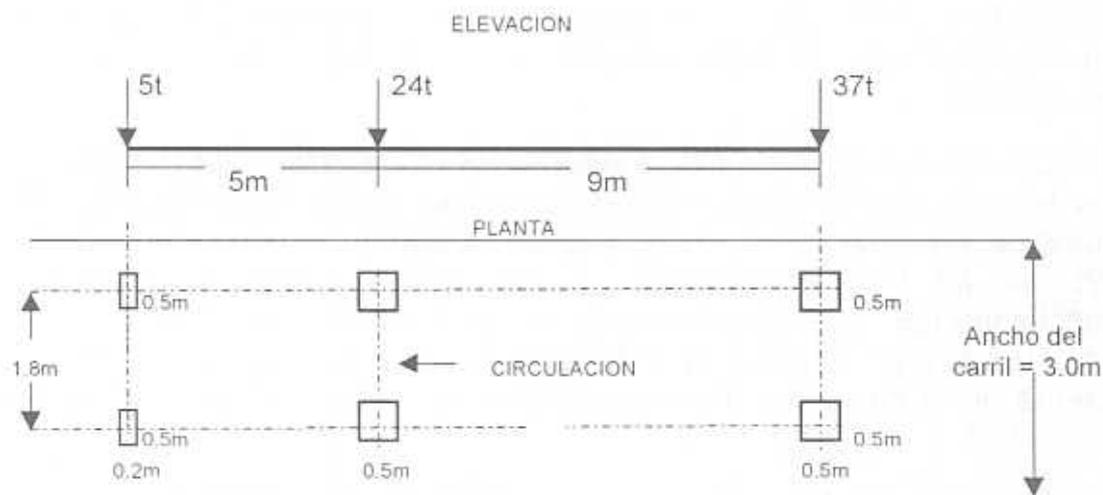
Para calcular el valor de la carga virtual CV1, se hicieron análisis probabilísticos de riesgo de la variable aleatoria PED, con las distribuciones normal y log-normal, resultando, para la probabilidad de excedencia de 2.78×10^{-7} , los percentiles 8.1t y 10.9t, respectivamente. En este caso se tomó CV1 = 9t.

Para calcular las distancias d_1 y d_2 del sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas, se calcularon los promedios utilizando las muestras de 1993 y 1996 juntas. De ellos se determinó que $d_1 = 5\text{m}$ y $d_2 = 9\text{m}$.

Los valores de las cargas virtuales antes calculados son los máximos que intervendrían para el análisis estructural; sin embargo, para que el modelo sea congruente con los criterios de diseño por estados límite, que prevalecen en los reglamentos para diseño de puentes, en los que intervienen factores de carga y de resistencia, es necesario reducirlos dividiéndolos entre el **factor de carga viva básico** que se determinará a continuación, para generar el **sistema de cargas concentradas nominales** del modelo de cargas vivas.

Tomando como valor nominal el peso bruto vehicular máximo que permite el RPD, redondeado a las unidades, de 66t, y considerando que la suma de las cargas virtuales es 124.6t, se obtiene que el **factor de carga viva básico** es el cociente del segundo entre el primero, o sea 1.88, el cual, redondeado a una decimal, es 1.9.

Dividiendo entre 1.88 a las cargas virtuales, redondeando a las unidades y ajustando a que la suma sea 66t, se obtiene que las cargas nominales son $P_1 = 5\text{t}$, $P_2 = 24\text{t}$ y $P_3 = 37\text{t}$. Con las mitades de estos valores se calcularon las áreas de aplicación en cada lado de los ejes virtuales, utilizando la fórmula que propone la AASHTO. Por tanto, el **sistema de cargas concentradas nominales del modelo** de cargas vivas que se desarrolla en este trabajo, queda con la siguiente topología:



Este sistema de cargas debe 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 el valor de 1.9 el aplicable a la combinación de cargas denominada en el reglamento de la AASHTO como “**Resistencia I**”, y a partir del cual se calculan, en el capítulo 8 de este trabajo, los factores de carga viva para otras combinaciones de cargas, mismos que aparecen en la columna sombreada de la Tabla 1.

Validación del sistema de cargas concentradas

Para validar este sistema de cargas concentradas, con el factor de carga viva de 1.9, se compararon los resultados de su aplicación en puentes con claros de 5m a 90m, con los elementos mecánicos de los tres casos siguientes:

1. Con los valores reales más grandes.
2. Con los valores máximos esperados en 50 años, que resultan de diversos análisis probabilísticos.
3. Con los valores que se predicen a partir de los análisis de regresión múltiple.

En las figuras 6.11 y 6.12 se presentan las comparaciones del caso 1. En ambas se aprecia que los resultados del modelo superan a los más grandes reales, por lo cual se califican como **satisfactorios**.

En las figuras 6.29 y 6.30 se comparan los resultados de aplicar el sistema de cargas concentradas del modelo, con los valores máximos esperados en 50 años que se obtuvieron en los análisis probabilísticos realizados para esta validación, en las cuales se observa que los del modelo son ligeramente mayores que los esperados, por lo cual el sistema de cargas propuesto es **satisfactorio**.

Los resultados del proceso de validación correspondiente al caso 3 se presentan en la tabla que aparece en la sección 6.8.3 de este trabajo. En ella se aprecia que los resultados de aplicar el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas son mayores entre 1.2 y 11.2 por ciento, que los que se predicen con los análisis de regresión múltiple, que resultan en las ecuaciones (1) a (6), por lo que se concluye que este sistema de cargas es **satisfactorio**.

En conclusión, las tres validaciones realizadas al sistema 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.

Cálculo de la carga uniformemente distribuida

Con el fin de calcular el valor de la carga virtual uniformemente repartida, que conforma la segunda parte del modelo de cargas vivas, se diseñó y realizó un proceso de simulación estocástica de la ocurrencia secuencial de vehículos pesados sobre un solo carril de un puente, tomando tres vehículos, uno tras otro, de acuerdo con el procedimiento señalado en la sección 6.9 de este trabajo. El total de tercias generadas fue de 132, de las cuales la mitad fue de cada año.

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, se obtuvieron las gráficas, ecuaciones de regresión e intervalos de predicción del 95% de nivel de confianza que se muestran en las figuras 6.31 a 6.38, en las que aparecen los elementos mecánicos máximos de cada caso, versus el logaritmo de la probabilidad de que los tres vehículos de cada tercia excedan el valor del peso del tándem 2 que cada uno tiene. En todos los casos se logran regresiones con coeficientes de correlación lineal de 59 a 70%.

Para calcular el valor de la carga virtual uniformemente distribuida, w , se empleó la probabilidad de excedencia de 2.74×10^{-7} , que es la misma que se utilizó para el sistema 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. Con cada uno de los momentos flexionantes y fuerzas cortantes se calculó el valor de ω y se adoptó el mayor. Al dividir éste entre el factor de carga viva de 1.9, se llegó a que ω vale 0.5t/m, para claros de puentes inferiores a 60m.

Para extender la aplicación del modelo para **claros de 60 a 90 metros**, se realizaron ajustes de curvas de segundo grado a cada uno de los elementos mecánicos máximos de las secuencias de vehículos (figuras 6.43 y 6.44), en el intervalo de claros de 15 a 60m, y se extrapolaron hasta 90m. Las ecuaciones de dichas curvas están en las mismas figuras.

Con los momentos y cortantes que resultaron, se calcularon los valores de ω para distintas longitudes, y se determinó la siguiente ecuación:

$$\omega = 0.5 + (L - 60)/60, \text{ si } 60\text{m} < L \leq 90\text{m}$$

donde L es la longitud del claro.

En las figuras 6.45 y 6.46 se muestran los elementos mecánicos que resultan al aplicar el modelo completo de cargas vivas. En ellas se utilizó el factor de carga de 1.9.

7. Validación final del modelo

Para realizar la validación final del modelo, se tomaron como **casos extremos** los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes que se predicen con la distribución de Weibull que se calculó para los vehículos T3-S2-R4 únicamente (figuras 7.1 y 7.2), asociados a la probabilidad de excedencia de 2.15×10^{-6} , que corresponde a un periodo de no excedencia de 50 años y al número esperado de este tipo de vehículos en ese lapso, de acuerdo con las muestras de 1993 y 1996 juntas. Estos son los casos extremos, porque son mayores que los que se predicen al conjuntar las muestras de estos vehículos con las de los T3-S3.

En la figura 7.3 se muestran los momentos flexionantes que se obtienen al aplicar el modelo propuesto de cargas vivas vehiculares, con **factor de carga** de 1.9, y **factores de impacto** de 1.33 y 1.0 para las cargas concentradas y uniforme, respectivamente; asimismo, se presentan los valores extremos afectados por el factor de impacto de 1.33, identificados como "*máximo maximorum*", notándose una gran coincidencia entre las respectivas poligonales, por lo que **el modelo cubre satisfactoriamente esta situación**.

En dicha figura se comparan también ambos resultados con los que resultan de aplicar los modelos de cargas vivas que establecen los reglamentos europeo

(eurocódigo), americano (AASHTO-94) y canadiense (OHBOC); en ellas se aprecia que estos dos últimos quedan por debajo, por lo que son inadecuados para aplicarse en México, y que el primero queda por arriba, salvo en $L = 30\text{m}$.

En la figura 7.4 se presentan los valores relativos de los momentos flexionantes de los mismos casos anteriores, con respecto a los que arroja el modelo aquí propuesto. En ella se confirma que el **modelo propuesto cubre muy bien los casos extremos** (máximo maximorum), con diferencias que van de +12, -3, -1 y +2 por ciento para longitudes de 15, 30, 45 y 60 metros, respectivamente.

Por otra parte, en la misma figura se nota que los momentos flexionantes que se obtienen al aplicar el reglamento AASHTO-94, tienen **déficits superiores al 20%**, en tanto que con el OHBCD éstos son mayores, del 30% al 40%. En contraste, los resultados del Eurocódigo son parecidos a los del modelo propuesto en longitudes de 15 y 30m, y un poco mayores, hasta del 10%, en 45 y 60m.

En lo que se refiere a las fuerzas cortantes, en la figura 7.5 se muestran los resultados. En ella se aprecia que los valores del modelo propuesto superan un poco a los máximos maximorum, **por lo que son muy satisfactorios**; asimismo, se aprecia que los resultados de aplicar los modelos de carga viva de los reglamentos americano y canadiense **están muy por debajo** de éstos, lo cual confirma que **no son adecuados** para aplicarse en México, en tanto que el Eurocódigo da valores inferiores en 15, 30 y 45 metros, y superiores en 60m.

Asimismo, en la figura 7.6 se muestran las fuerzas cortantes relativas con respecto a las que resultan del modelo aquí propuesto, en la que se aprecia que este modelo da resultados por arriba de los máximos maximorum entre 3 y 5 por ciento, por lo que son muy razonables.

Por su parte, el Eurocódigo subestima en 12% y 9% a los máximos maximorum asociados a 15 y 30m, da casi exacto en 45m y sobrestima en 7% en 60m. En contraste, el AASHTO proporciona valores por debajo de los máximos maximorum, entre 17% y 27%, y el OHBDC arroja resultados deficitarios entre 29% y 39%.

Como conclusión, las evaluaciones realizadas arrojaron resultados muy satisfactorios y acreditan al modelo de cargas vivas vehiculares aquí desarrollado, como apto para ser usado en la práctica profesional para el análisis estructural de los puentes en México.

Por tanto, se recomienda que para el diseño de las estructuras de los puentes en carreteras tipos A, B y C, se utilice el reglamento de la AASHTO, pero cambiando el modelo de cargas vivas vehiculares y los factores de carga y de carriles múltiples por los que se generaron en el capítulo 8 de este trabajo.

1. Introducción

En diversos estudios estadísticos que se han realizado sobre los pesos y dimensiones de los vehículos que transitan en las carreteras federales (referencias 1, 2 y 3, relacionadas al final de este trabajo), se ha concluido que éstos violan sistemáticamente las normas señaladas en el Reglamento sobre el Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Autotransporte que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal (RPD), publicado en el Diario Oficial el 4 de septiembre de 1995.

En particular, en la referencia 1 se estudiaron estadísticamente los efectos, en términos de momentos flexionantes y fuerzas cortantes máximos (elementos mecánicos), que podrían ocasionar a los puentes los vehículos registrados en un proceso de captura de información que se realizó en el año 1993. La muestra en cuestión fue recabada en 15 puntos carreteros por la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT, y consistió de 70,267 vehículos cargados, de diferentes tipos o configuraciones, a las cuales se les midieron los pesos totales, los pesos por eje y las distancias entre ejes consecutivos, además de otras características.

Los valores más grandes de dichos elementos mecánicos que se obtuvieron en la referencia 1, para puentes simplemente apoyados de 15, 30 y 45 metros de claro, fueron comparados con los que resultan de aplicar los **modelos de cargas vivas** que especifican diversos reglamentos para el diseño estructural de puentes: el estadounidense de la AASHTO (ref. 4), el canadiense de Ontario, OHBDC (ref. 5) y el europeo (ref. 6), así como con los que arrojan los pesos y dimensiones del RPD.

La conclusión genérica que resultó en la referencia 1, es que muchos vehículos de carga que circulan en las carreteras mexicanas, **producen elementos mecánicos** en los puentes que superan ostensiblemente a los que se obtienen al aplicar los **modelos de cargas vivas** de las normas antes referidas, excepto a los del eurocódigo; en particular a las antiguas y nuevas de la AASHTO que, según el caso, se han utilizado o se utilizan en México para el diseño estructural de los puentes, por lo que, salvo quizá el europeo, **resultan inadecuados para aplicarse en nuestro país.**

Como recomendación principal, en la referencia 1 se estableció que se estudiaran estadísticamente a los elementos mecánicos correspondientes a otra muestra, que se haya captado en otro año y en otros puntos carreteros, para ampliar el número de datos, confirmar las conclusiones que se obtuvieron en dicha referencia y, en su caso, **generar un modelo de cargas vivas vehiculares de alta confiabilidad** que pueda adoptarse como norma para el análisis estructural de puentes, que tome en cuenta las características de pesos y dimensiones de los vehículos de carga que transitan en México, y brinde niveles de seguridad y servicio adecuados.

Para actuar en consecuencia, los objetivos generales que se formularon para la investigación que se reseña en esta publicación son:

1. Realizar el diseño conceptual del modelo de cargas vivas.
2. Estudiar estadística y probabilísticamente a las muestras de vehículos de carga tipos T3-S3 y T3-S2-R4, que obtuvo la SCT en 1993 y 1996, en términos de los datos de las variables que más influyen en los **momentos flexionantes** y en las **fuerzas cortantes máximos** (elementos mecánicos) 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 modelo de cargas vivas**.
3. Calcular los valores máximos de los elementos mecánicos que son ocasionados por cada vehículo en puentes de distintas longitudes; así como realizar análisis estadísticos y probabilísticos de todos ellos.
4. Realizar estudios estadísticos de las correlaciones que existen entre algunas de las variables más importantes, para identificar relaciones causa-efecto, en particular, cargas-elementos mecánicos.
5. Realizar comparaciones de los elementos mecánicos más grandes que se hayan obtenido para cada longitud de puente, con los que resultan de aplicar los modelos de cargas vivas de las normas antes referidas para diseño estructural de puentes, para **validar su aplicabilidad en México**.
6. **Formular y validar el modelo de cargas vivas vehiculares**, de manera que garantice un nivel de confiabilidad adecuado y, por tanto, pueda proponerse como norma para el análisis estructural de puentes en México, que sea congruente con los métodos y criterios de diseño por estados límite.
7. Formular y adoptar algunos elementos normativos complementarios que se relacionan con las cargas vehiculares, principalmente los **factores de carga viva** que se deben utilizar en cada una de las combinaciones de cargas que se utilizan para diseño y para revisar por condiciones de servicio y fatiga, que se establecen en el reglamento de la AASHTO. 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 el **sistema de cargas nominales del modelo sea congruente con el RPD**.

2. Diseño conceptual del modelo de cargas vivas. Análisis estadísticos

En este capítulo se realiza el diseño conceptual del modelo de cargas vivas que se desarrolla en este trabajo, previa formulación de las hipótesis de trabajo que sirven para generar la topología del mismo. Además, se llevan a cabo diversos análisis estadísticos de los datos correspondientes a las variables aleatorias que se consideran más influyentes en el cálculo de los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes que los vehículos de carga ocasionan a los puentes, los cuales, a su vez, se relacionan con los componentes del diseño conceptual del modelo de cargas vivas. Concretamente, se analizan el "peso bruto vehicular," cuyos valores se encuentran en la base de datos que se genera con los pesajes en campo, así como el "peso del tándem 1" y el "peso del tándem 2", que son variables aleatorias que se formulan sumando los pesos de los ejes correspondientes, como se verá más adelante.

Asimismo, se calculan y estudian estadísticamente los **momentos flexionantes** y las **fuerzas cortantes** que los vehículos tipos T3-S3 y T3-S2-R4 de la muestra pueden ocasionar en puentes idealizables como vigas simplemente apoyadas, por ser éstos los que producen los efectos más grandes, los cuales servirán para validar el modelo de cargas vivas. Para todos los cálculos estadísticos se utilizó el paquete de cómputo MINITAB-11.

Para fines de comparación, también se calcularon dichos elementos mecánicos utilizando los valores máximos de los pesos por eje de esos tipos de vehículo, que se autorizan en el Reglamento sobre Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Autotransporte que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal (RPD); a estos valores se les denomina aquí como momentos y cortante máximos asociados al RPD.

2.1 Diseño conceptual del modelo de cargas vivas

Para diseñar la topología del modelo de cargas vivas, en este trabajo se toma en cuenta que una de las conclusiones que se obtuvieron en la referencia 1, señala que los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos que se calcularon para los vehículos T3-S3 son muy parecidos a los que se obtuvieron para los T3-S2-R4. Esto hace suponer que en un tren simplificado de cargas que se consideran para diseño estructural, podría prescindirse del último tándem del T3-S2-R4.

Asimismo, se considera que los reglamentos modernos para diseño estructural de puentes que existen en diversos países, utilizan los criterios de estados

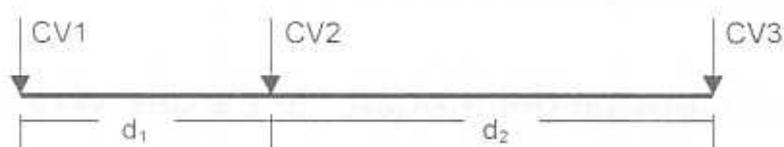
límites de resistencia, servicio y fatiga, los cuales involucran la participación simultánea de diversas combinaciones de cargas, cada una de éstas afectadas por los factores de carga correspondientes, así como la utilización de factores de resistencia.

Como punto de inicio para generar el diseño conceptual, se toma en cuenta 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 de 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 modelo que aquí se formula tiene también estos dos sistemas de cargas.

Tomando como hipótesis de partida:

- a) Que las cargas que se transmiten a través de los ejes vehiculares que forman tándems o tridems pueden sustituirse por sus resultantes, para fines del análisis estructural, y obtenerse con ello resultados estadísticamente equivalentes a los que se obtienen con las cargas que bajan por cada eje
- b) Que la configuración básica y suficiente del vehículo que produce efectos máximos equivalentes tiene un eje delantero, un tándem intermedio y un tridem o un doble tándem trasero

Se propone la siguiente topología, en vista lateral, para el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas que se desarrolla en este trabajo:



De esta manera se crea un “vehículo virtual” (no existe) con tres “cargas virtuales” CV1, CV2 y CV3, una por cada “eje virtual”, separadas por las dos distancias d_1 y d_2 .

En el cuerpo de este trabajo, se demuestra que la topología propuesta para este modelo de cargas vivas es válida y se cuantifican, mediante métodos probabilísticos y estadísticos, los valores de los cinco componentes del sistema de cargas concentradas, de manera que se logren niveles de seguridad estructural adecuados a las condiciones reales del tránsito vehicular en 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.

2.2 Composición y manejo de la muestra de vehículos registrados en 1996

La colección de vehículos que se captó en 1996 corresponde a los once puntos de muestreo que se indican en la siguiente tabla:

Estaciones de Aforo

No	NOMBRE	UBICACION			FECHA DE REALIZACION	
1	Champtomón	Escárcega - Champtomón	Km.	80+000	Sep 24 -27	1996
2	Villamar	Ciudad del Carmen - Campeche	Km.	132+000	Sep 24 -27	1996
3	Rancho El Rodeano	La Tinaja - Santa Cruz	Km.	18+000	Oct 01 - 04	1996
4	Cosamaloapan	La Tinaja - Minatitlán	Km.	60+925	Oct 01 - 04	1996
5	Tejada	Paso del Toro - Acayucan	Km.	80+850	Oct 08 -11	1996
6	La Ventosa	La Ventosa - Tapanatepec	Km.	0+200	Oct 15 - 18	1996
7	El Viejón	Poza Rica - Veracruz	Km.	76+000	Oct 15 - 18	1996
8	Calpulalpan	Los Reyes - Zacatepec	Km.	60+925	Oct 22- 25	1996
9	Atzacmulco	Toluca - Palmillas	Km.	56+100	Oct 29 - Nov 1°	1996
10	Coixtlahuaca	Cuacnopalan - Oaxaca	Km.	142+300	Nov 05 - 08	1996
11	Telixtlahuaca	Tehuacán - Huitzo	Km.	200+000	Nov 05 - 08	1996

Para extraer los datos que fueran útiles para este estudio, 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. 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 como parte de este trabajo, y 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. Los detalles de este programa de cómputo y del referido en un párrafo anterior se encuentran en la referencia 7.

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.

En virtud de que en la referencia 1 se determinó que los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4 son los que producen mayores elementos mecánicos a los puentes, en este trabajo sólo se utilizaron los datos asociados a ellos, eliminando de la muestra a los que no portaban carga, quedando 8605 vehículos del primer tipo y 1474 del segundo.

El vehículo T3-S3 se configura con un tractor que tiene un eje delantero y dos traseros en tándem y un semiremolque con tres ejes traseros en trídem; el T3-S2-R4 tiene un tractor igual al anterior, un semiremolque con dos ejes traseros en tándem y un remolque de dos ejes delanteros y dos traseros, ambos en tándem. El peso bruto vehicular que el RPD permite para el primero es de 48.5t y, para el segundo, 66.5t; el peso máximo para el eje delantero sencillo con dos llantas, es de 6.5t; para el tándem motriz con ocho llantas, es de 19.5t; para el tándem no motriz, es de 18.0t; y para el trídem no motriz con 12 llantas, es de 22.5t.

2.3 Análisis estadísticos del peso bruto vehicular con datos de 1996

Toda vez que una de las variables importantes es el "Peso Bruto Vehicular" (PBV), 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 conocer su comportamiento estadístico en la muestra de 1996.

Por tanto, en las figuras 2.1 y 2.2 se muestran las distribuciones de frecuencias (histogramas) de los datos de la variable aleatoria PBV correspondientes a los vehículos tipo T3-S3 (8605 datos) y T3-S2-R4 (1474 datos); en cada una de ellas se ha marcado el valor máximo permitido por el RPD, que son 48.5t y 66.5t, respectivamente.

Al examinar estas gráficas se aprecia que los datos tienen gran dispersión y que son bimodales (tienen dos jorobas); esto último se explica por el hecho de que

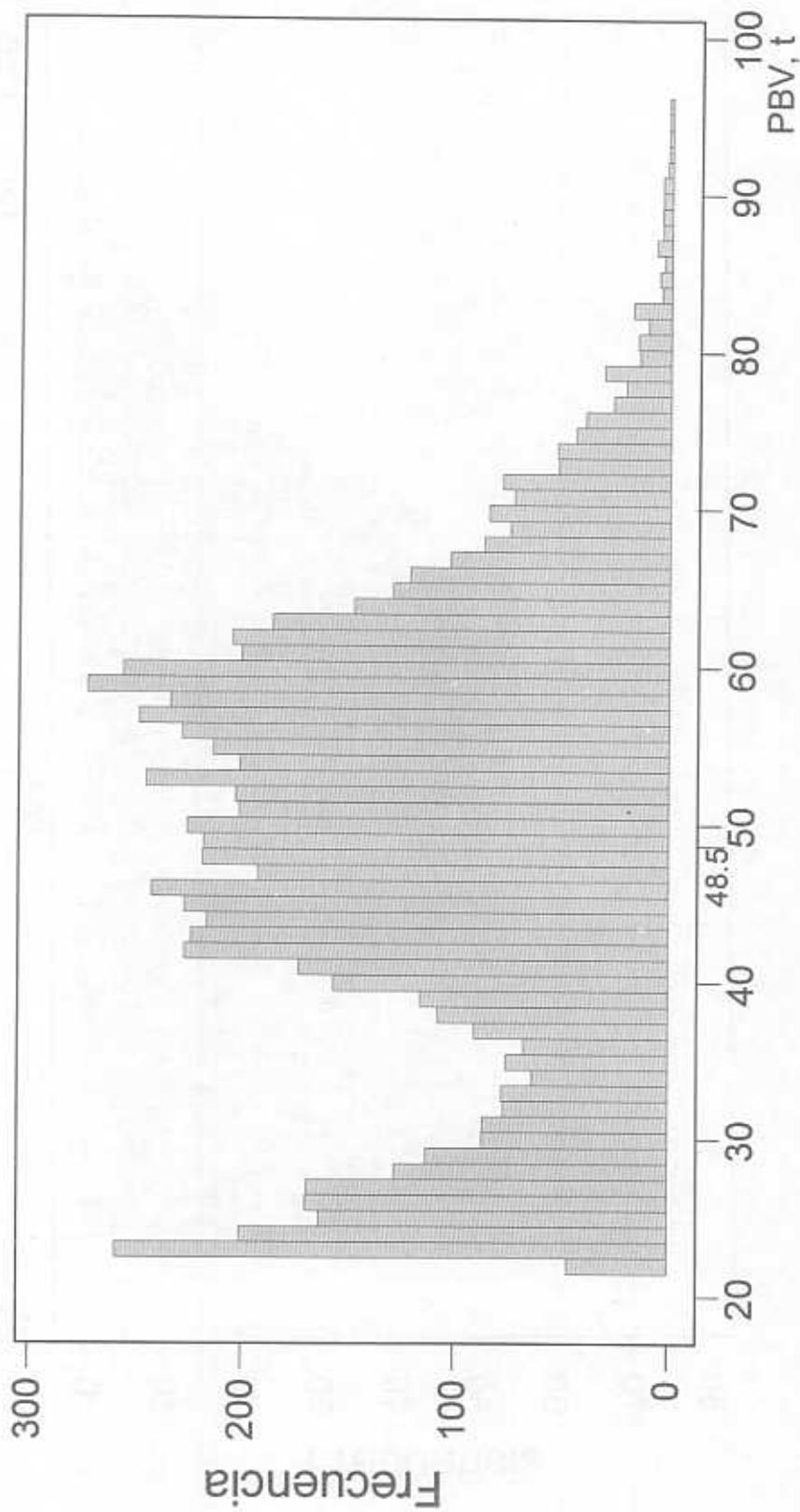


Fig. 2.1 Histograma del peso bruto vehicular, T3-S3, 1996

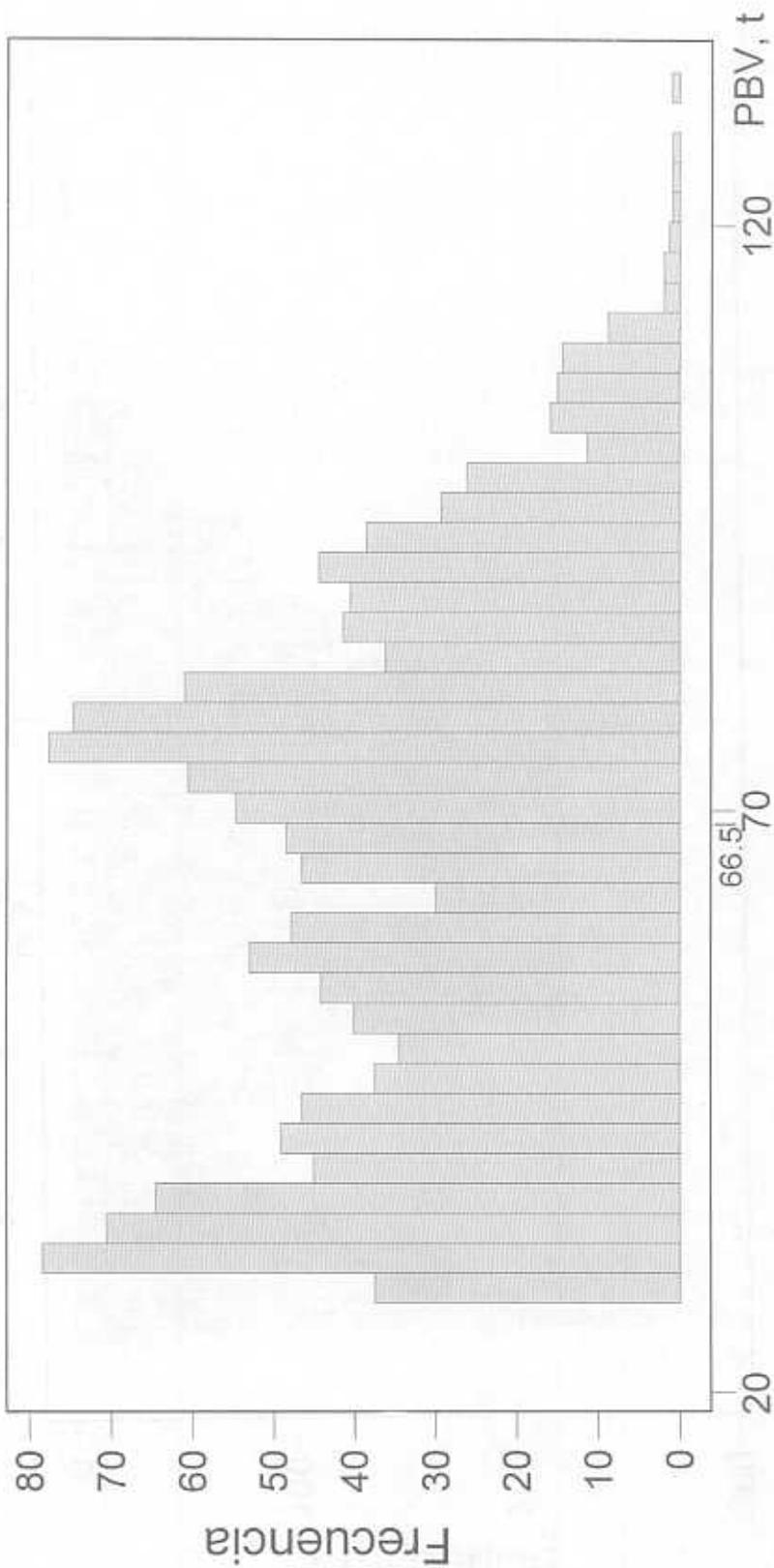


Fig. 2.2 Histograma del peso bruto vehicular, T3-S2-R4, 1996

un buen número de vehículos transitan semicargados o con mercancías de peso volumétrico bajo, lo cual produce un agrupamiento de datos que genera la joroba asociada a los valores pequeños. Asimismo, se observa que las cantidades permitidas en el RPD se rebasan considerablemente, tanto en frecuencia como en valores; en efecto, al realizar cálculos de frecuencias relativas acumuladas hasta los máximos permitidos, se concluye que en ambos casos el 52% de los resultados son mayores y que los más grandes de las muestras (96.0t y 130.4t) se exceden en 98 y 96 por ciento, respectivamente.

Lo anterior, sin duda, es un primer indicio de que los elementos mecánicos que ocasionan muchos vehículos de la muestra también excederán a los momentos flexionantes y a las fuerzas cortantes asociados al RPD, ya que aquellos se calculan con los pesos registrados para los distintos ejes de los vehículos muestreados.

Como información descriptiva complementaria se tienen los siguientes resultados, en toneladas:

Estadísticas	T3-S3	T3-S2-R4
Valor Mínimo	22.3	30.0
Valor Máximo	96.0	130.4
Promedio	49.0	64.8
Desviación Estándar	14.5	21.8

2.4 Análisis estadísticos de los pesos en grupos de ejes con datos de 1996

Como ya se indicó, los elementos mecánicos que producen los vehículos en los puentes, dependen de las cargas que se transmiten por cada eje de rodamiento y de la ubicación de éstos; sin embargo, como se confirmará más adelante, algunos grupos de cargas individuales se pueden considerar en términos de sus resultantes cuando las separaciones que hay entre los ejes consecutivos son relativamente pequeñas, como sucede con los grupos de ejes que conforman los tándems, los trídems y los dobles tándems; por consiguiente, para continuar con el análisis estadístico, considérense las siguientes variables aleatorias:

PE_i = peso del eje i

PT_1 = peso del tándem 1 = $PE_2 + PE_3$

Las cargas virtuales CV1 y CV2 del modelo que se formuló, se relacionan con PE1 y PT2, respectivamente.

En las figuras 2.3 y 2.4 se presentan los histogramas de los valores que resultan al calcular PT1 con los datos de los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4, respectivamente. En ellas se ha marcado el valor máximo permitido en el RPD, de 19.5t. En ambas se aprecia también la naturaleza bimodal de las distribuciones de frecuencias, las cuales se explican por el mismo motivo que para el peso bruto vehicular.

Al examinar la figura 2.3 y realizar cálculos de las frecuencias relativas acumuladas, se obtiene que el valor reglamentario (19.5t) se excede en el 50% de los casos, y que el valor máximo de la muestra (38.0t) rebasa a éste en 95%. Procediendo en igual forma, con la figura 2.4 se concluye que el máximo permitido (19.5t) se sobrepasa en el 25% de los casos y que el dato más grande (30.0t) resulta 54% mayor. Los parámetros descriptivos de estas muestras, en toneladas, son:

Estadísticas	T3-S3	T3-S2-R4
Valor Mínimo	4.0	6.0
Valor Máximo	38.0	30.0
Promedio	19.0	15.8
Desviación Estándar	5.7	5.2

Para fines comparativos, vale la pena señalar que con los datos de 1993, para los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4 se obtiene que los promedios del peso del tándem 1 son 22.6t y 17.3t, las desviaciones estándar son 5.1t y 5.3t, y los valores máximos son 40.0t y 33.1t, respectivamente, notándose que los promedios y máximos de este año son un poco mayores que los de 1996 y que las desviaciones estándar son muy parecidas.

Considérese ahora la variable aleatoria “peso del tridem” (PT2) del vehículo T3-S3 como la siguiente suma de variables aleatorias:

$$PT_2 = PE_4 + PE_5 + PE_6$$

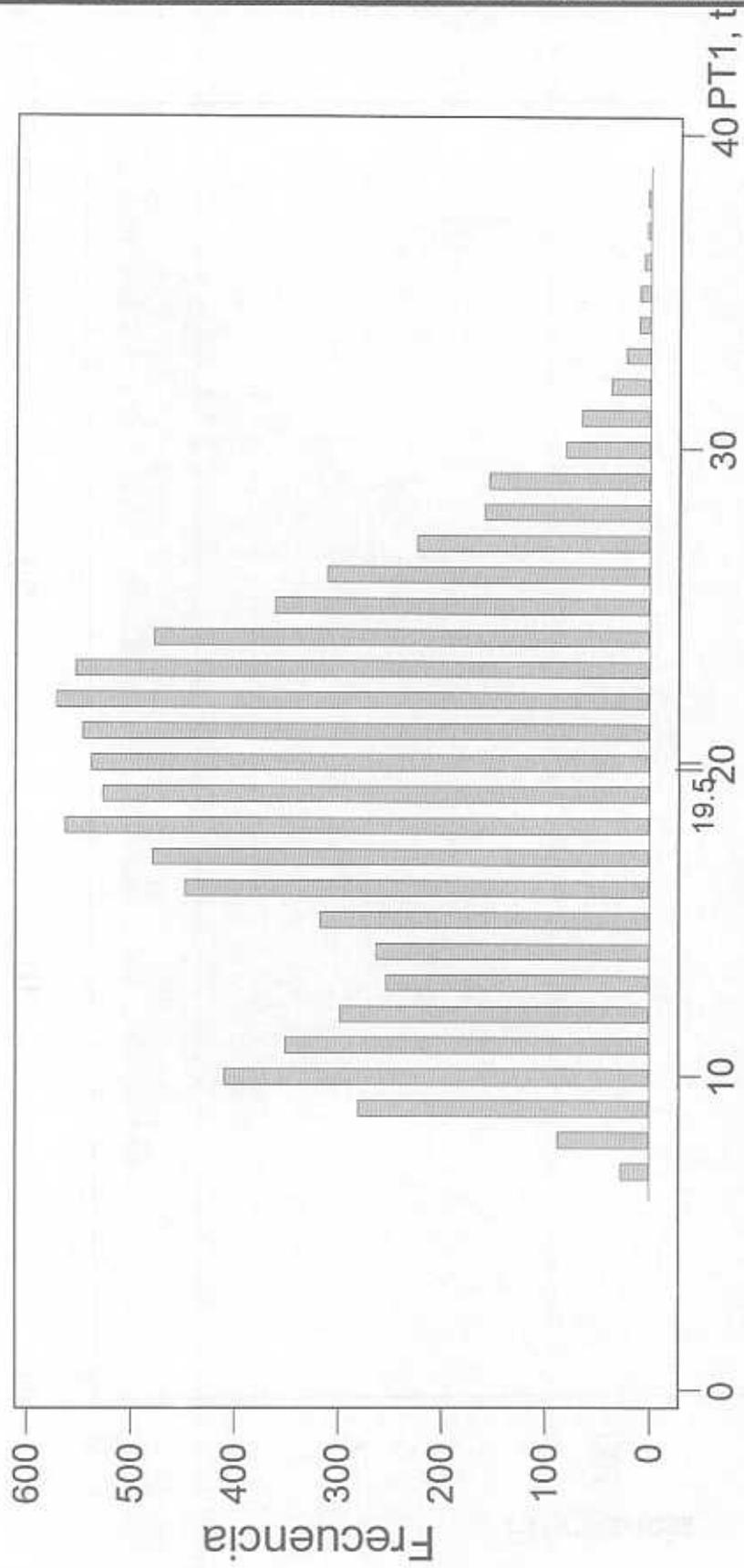


Fig. 2.3 Histograma del peso tándem 1, T3-S3, 1996

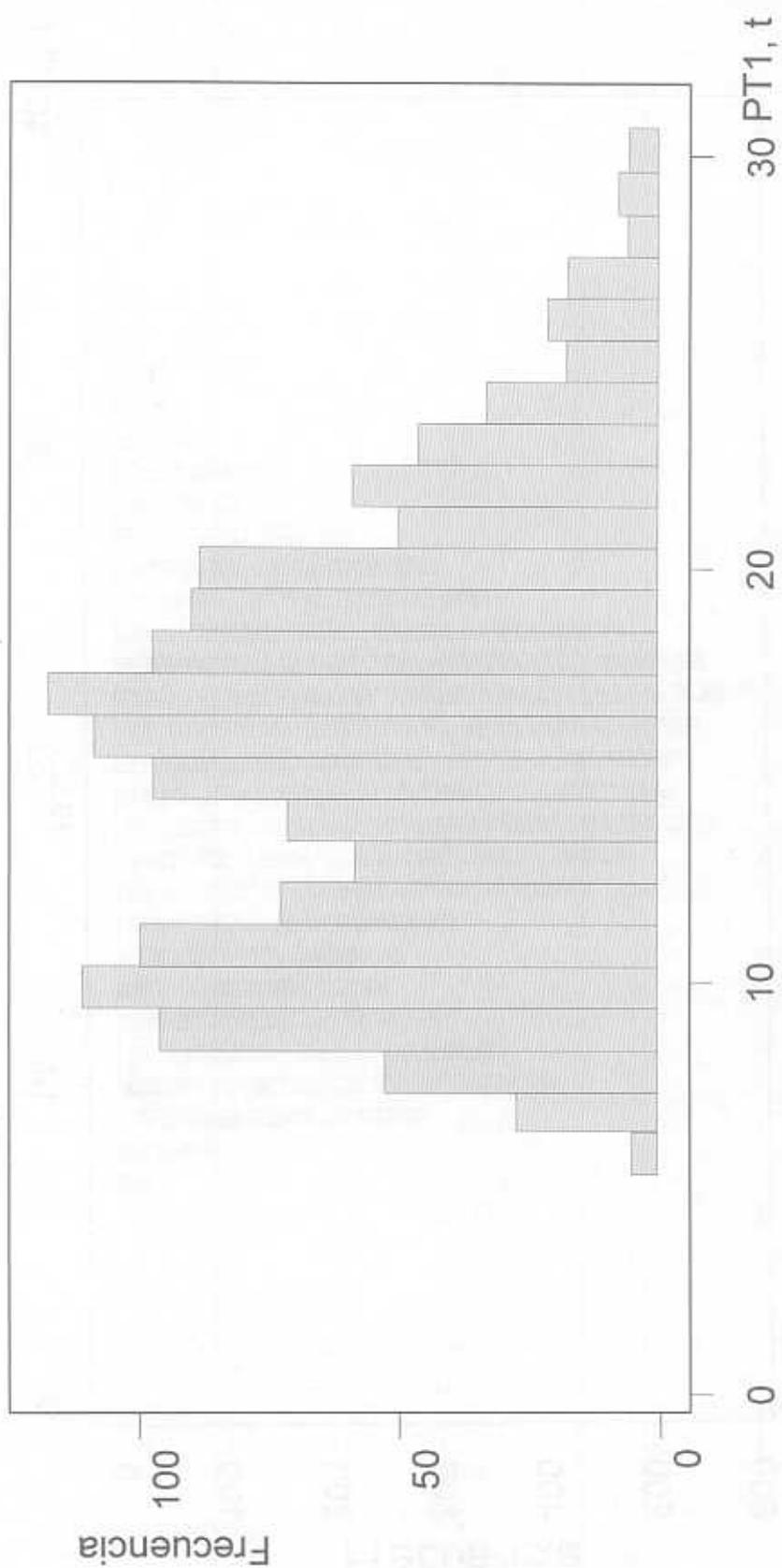


Fig. 2.4 Histograma del peso del tándem 1, T3-S2-R4, 1996

a la cual arbitrariamente aquí (para seguir una secuencia en la notación) se le ha llamado "peso del tándem 2"; la carga virtual CV2 se relaciona con P2. Al realizar esta operación con todos los datos de la muestra se obtiene el histograma mostrado en la figura 2.5, en que se ha marcado el valor máximo permitido en el RPD (22.5t). Al analizar esta gráfica con el auxilio de la distribución de frecuencias relativas acumuladas correspondiente, mostrada en la figura 2.6, se concluye que la norma se viola en el 61% de los casos reales y que el dato más grande (58.0t) rebasa al permitido en 158%.

Por razones que se justificarán más adelante, considérese ahora la variable aleatoria "peso del doble tándem" (PT2') del vehículo T3-S2-R4, a la cual también arbitrariamente llamaremos aquí "peso del tándem 2". Esta variable resulta ser la siguiente suma de variables aleatorias:

$$PT2' = PE4 + PE5 + PE6 + PE7$$

Al realizar esta operación para todos los datos de la muestra se obtiene el histograma de la figura 2.7, en la cual se ha anotado el valor máximo permitido (36t) por el RPD. En este caso, al hacer los cálculos correspondientes, se concluye que el valor reglamentario es excedido por el 28% de los datos y que el más grande de éstos (63t) lo rebasa en 75%.

Además, en ambas figuras 2.6 y 2.7 se nota también la naturaleza bimodal de las distribuciones de frecuencias, lo cual es explicable nuevamente porque un buen número de los vehículos transitan semicargados o con mercancías de pesos volumétricos bajos. Los parámetros descriptivos de ambos grupos de datos son:

Estadísticas	T3-S3	T3-S2-R4
Valor Mínimo	7.0	10.0
Valor Máximo	58.0	63.0
Promedio	25.9	29.7
Desviación Estándar	8.9	11.0

Para fines comparativos, vale la pena señalar que con los datos de 1993, para los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4, se obtiene que los promedios del peso del tándem 2 son 32.1t y 32.8t, las desviaciones estándar son 8.2t y 11.4t y los máximos son 62.0t y 61.0t, respectivamente, notándose que los promedios y los máximos son muy parecidos entre sí y con los de 1996, aunque un poco mayores los promedios de 1993.

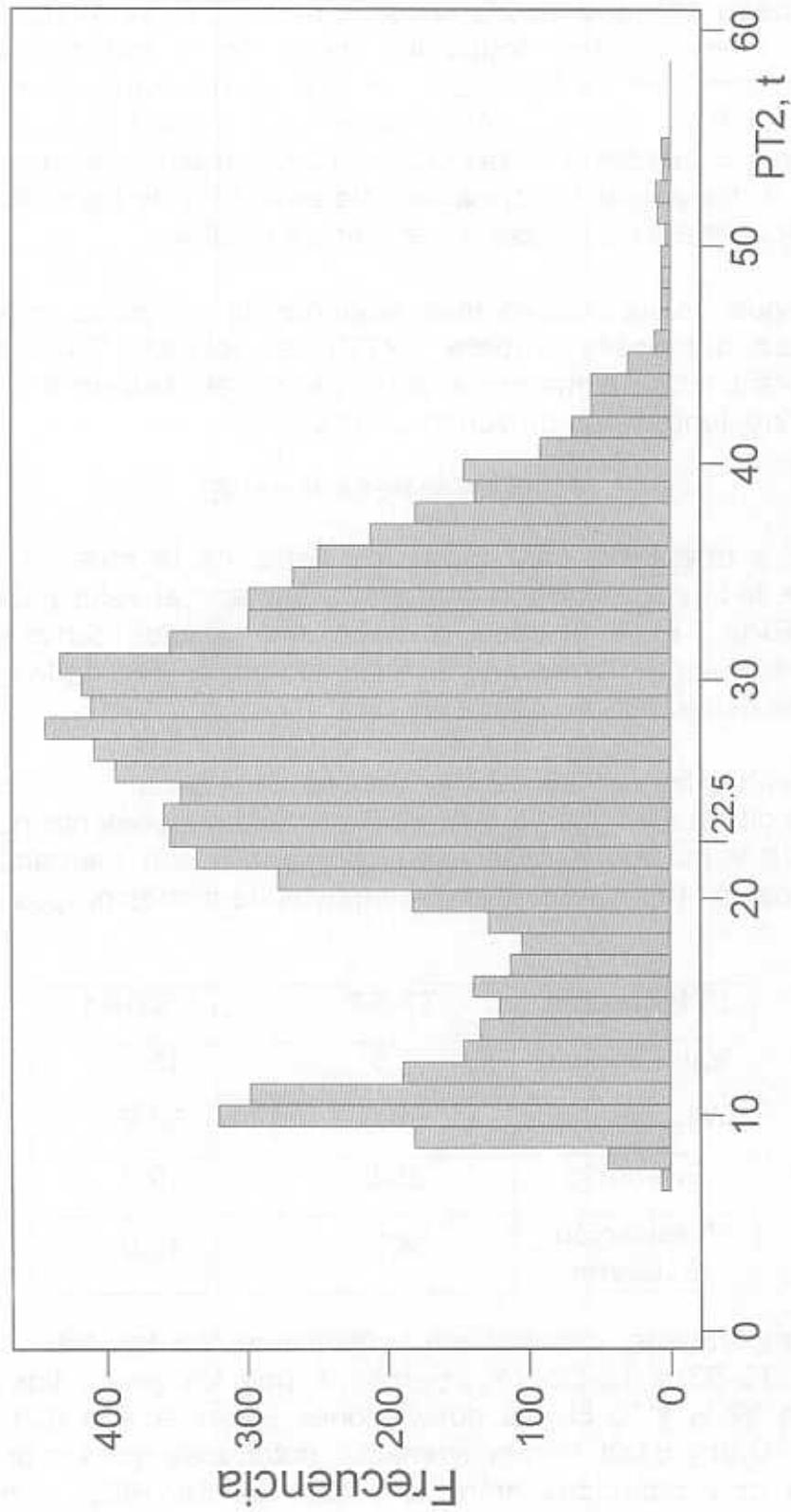


Fig. 2.5 Histograma del peso tándem 2, T3-S3, 1996

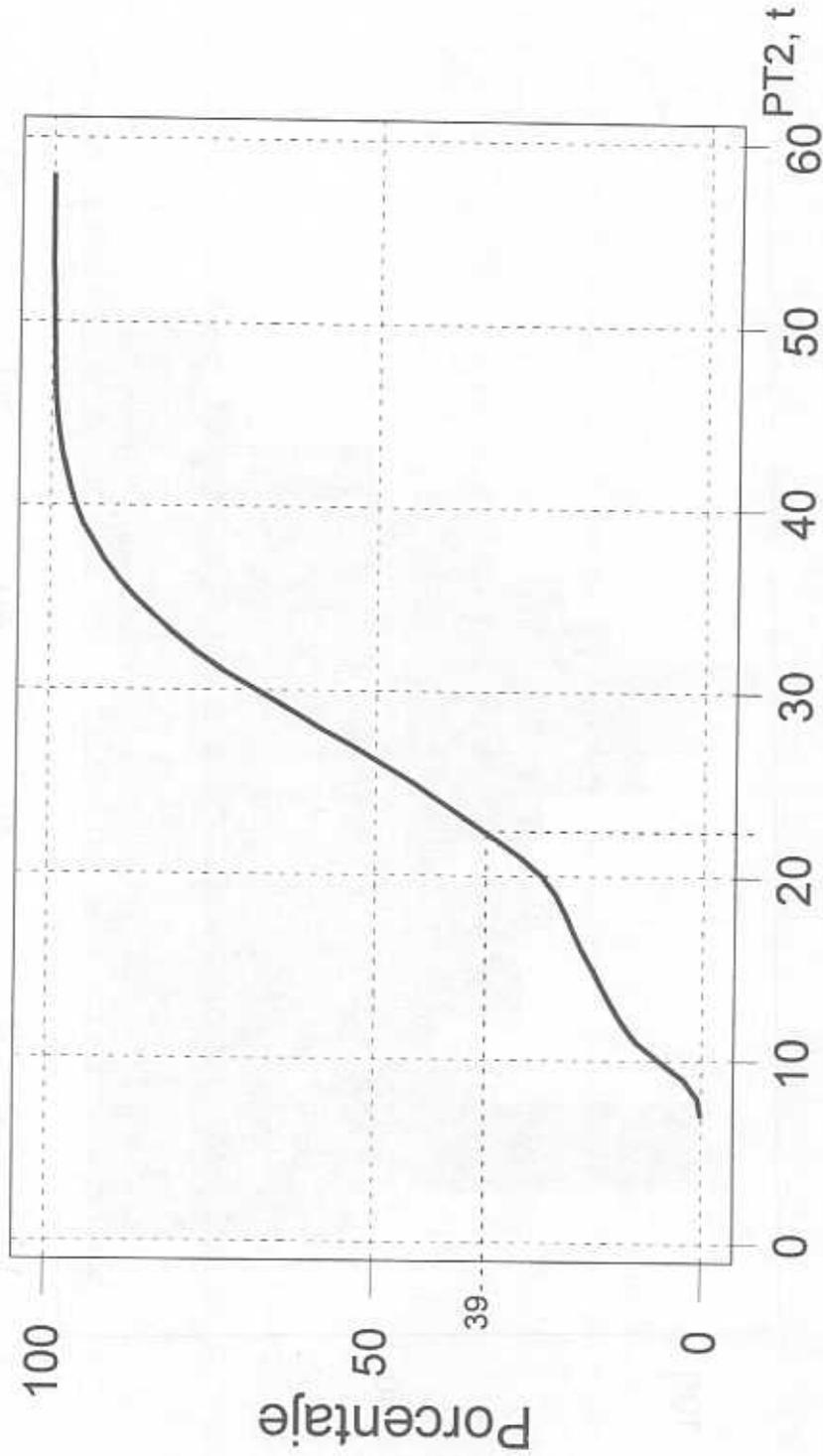


Fig. 2.6 Frecuencias relativas acumuladas del peso tándem2, T3-S3, 1996

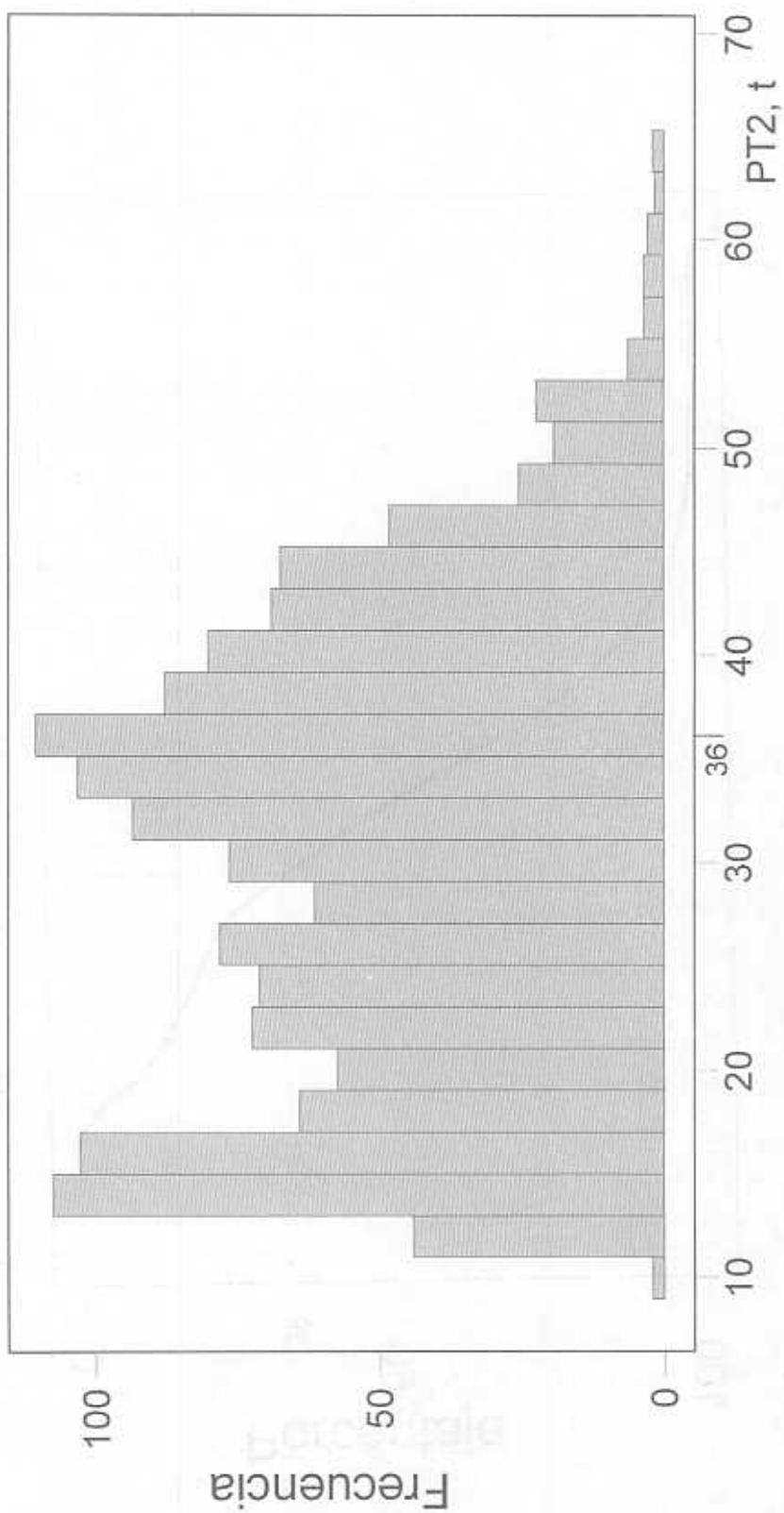


Fig. 2.7 Histograma del peso tándem 2 , T3-S2-R4, 1996

2.5 Análisis estadísticos de las distancias entre ejes con datos de 1996

Con el fin de conocer el comportamiento estadístico de las distancias entre ejes consecutivos, se obtuvieron las distribuciones de frecuencias de cada una. En ellas se detectó que la dispersión de los datos es mayor en las distancias que no corresponden a las separaciones de los ejes que forman tándem o tridem.

Con el fin de ilustrar lo que se observó, en las figuras 2.8 y 2.9 se muestran los histogramas de los datos correspondientes a la variable aleatoria "longitud del entre eje 3" (entre los ejes 3 y 4), de los vehículos tipos T3-S3 y T3-S2-R4, respectivamente. Los valores, en metros, de algunos parámetros descriptivos son:

Estadísticas	T3-S3	T3-S2-R4
Valor Mínimo	2.5	2.1
Valor Máximo	14.2	10.6
Promedio	6.7	6.9
Desviación Estándar	0.9	1.3

De las figuras y del cuadro anterior se concluye que si bien las distancias promedio en ambos tipos de vehículo son parecidas, la dispersión, medida en términos de la desviación estándar, es mayor en el T3-S2-R4, aunque en el T3-S3 se observaron algunos valores muy grandes, como el de 14.2m y otros tres mayores de 11.0m.

2.6 Análisis estadísticos de los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos, con datos de 1993 y 1996

Con el fin de contar con más elementos para formular cuantitativamente y evaluar el modelo de cargas vivas vehiculares que se desarrolla más adelante, que sea adecuado para usarse en el análisis estructural de puentes en México, se calcularon los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos que puede ocasionar cada uno de los 10,079 vehículos de la muestra, en puentes idealizados como vigas simplemente apoyadas con longitudes de 15, 30 y 45 m.

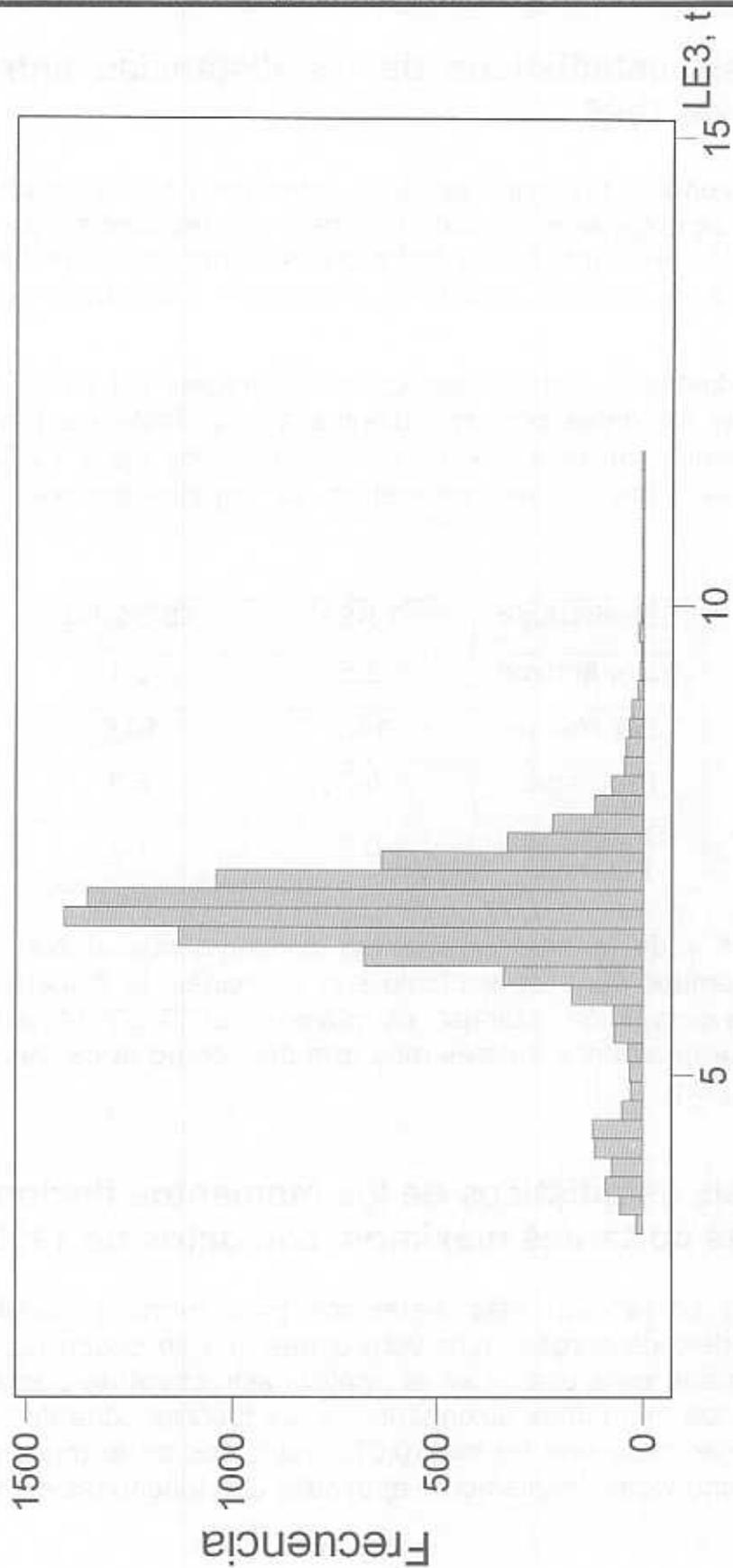


Fig. 2.8 Histograma de la longitud del entre eje 3, T3-S3, 1996

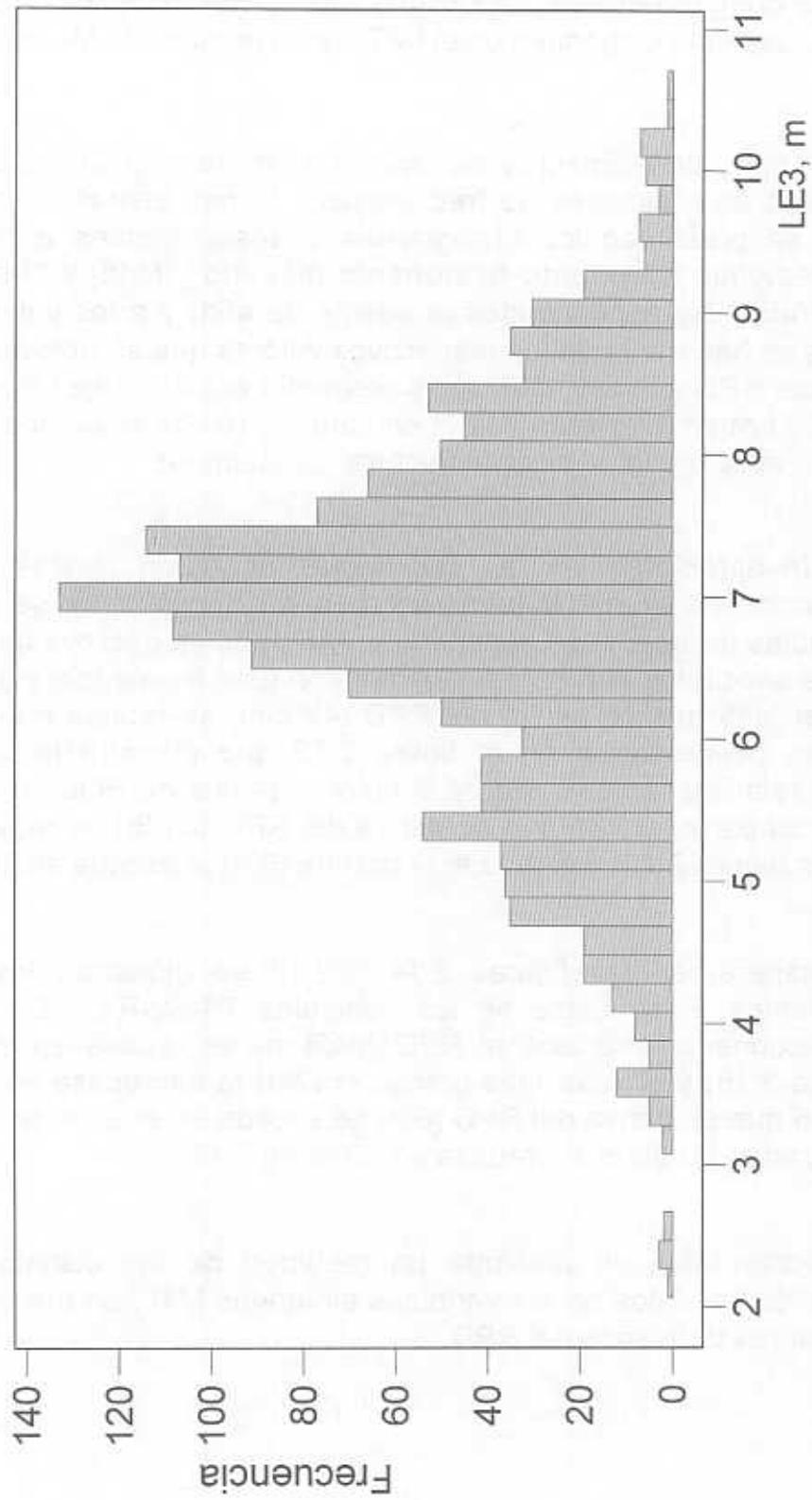


Fig. 2.9 Histograma de la longitud del entre eje 3, T3-S2-R4, 1996

Para poder hacer esta gran cantidad de cálculos, se elaboró expresamente un programa de cómputo en lenguaje VISUAL BASIC, que es aplicable para todo tipo de vehículo, que está disponible en el IMT con el nombre de MCmax.

Para ambos tipos de elementos mecánicos y las tres longitudes de puente, se elaboraron las distribuciones de frecuencias. Como ilustración, en las figuras 2.10 y 2.11 se presentan los histogramas correspondientes a los datos de las variables aleatorias “momento flexionante máximo” (M45) y “fuerza cortante máxima” (V45), correspondientes al puente de 45m y a los vehículos tipo T3-S3. En ellas se han marcado los respectivos valores que se obtuvieron utilizando las cargas del RPD con las distancias promedio entre los ejes de cada tipo de vehículo: 430 t-m en momento y 41.3t en cortante (estos serían los permisibles si el RPD fuera aplicable al análisis estructural de puentes).

Como puede apreciarse, en las dos figuras aparecen sendas distribuciones bimodales, correspondiendo la primera joroba a los camiones semi-cargados o con mercancías de bajo peso volumétrico. Además se observa que el momento y el cortante asociados al RPD se exceden con gran frecuencia y gran magnitud; en efecto, el M45 que se deriva del RPD (430t-m) se rebasa en el 55% de los casos, como puede verse en la figura 2.12 que muestra la distribución de frecuencias relativas acumuladas, y el valor más grande (930t-m) lo excede en 121%. Por su parte, el V45 que se deriva del RPD (41.3t) se rebasa en el 59% de los casos (figura 2.13) y el dato más grande (87t) lo excede en 106%.

De igual manera, en las figuras 2.14 y 2.15 se muestran los histogramas correspondientes a los datos de los vehículos T3-S2-R4. En este caso el momento flexionante asociado al RPD (642t-m) se rebasa en el 35% de los casos (figura 2.16) y el valor más grande (1174t) lo sobrepasa en 83%. Por su parte, el V45 que se deriva del RPD (60t) se excede en el 27% de los casos, y el valor más grande (108t) lo sobrepasa en 80% (fig 2.17).

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los distintos parámetros descriptivos de los datos de las variables aleatorias M45, en t-m y V45 en t, así como los valores derivados del RPD:

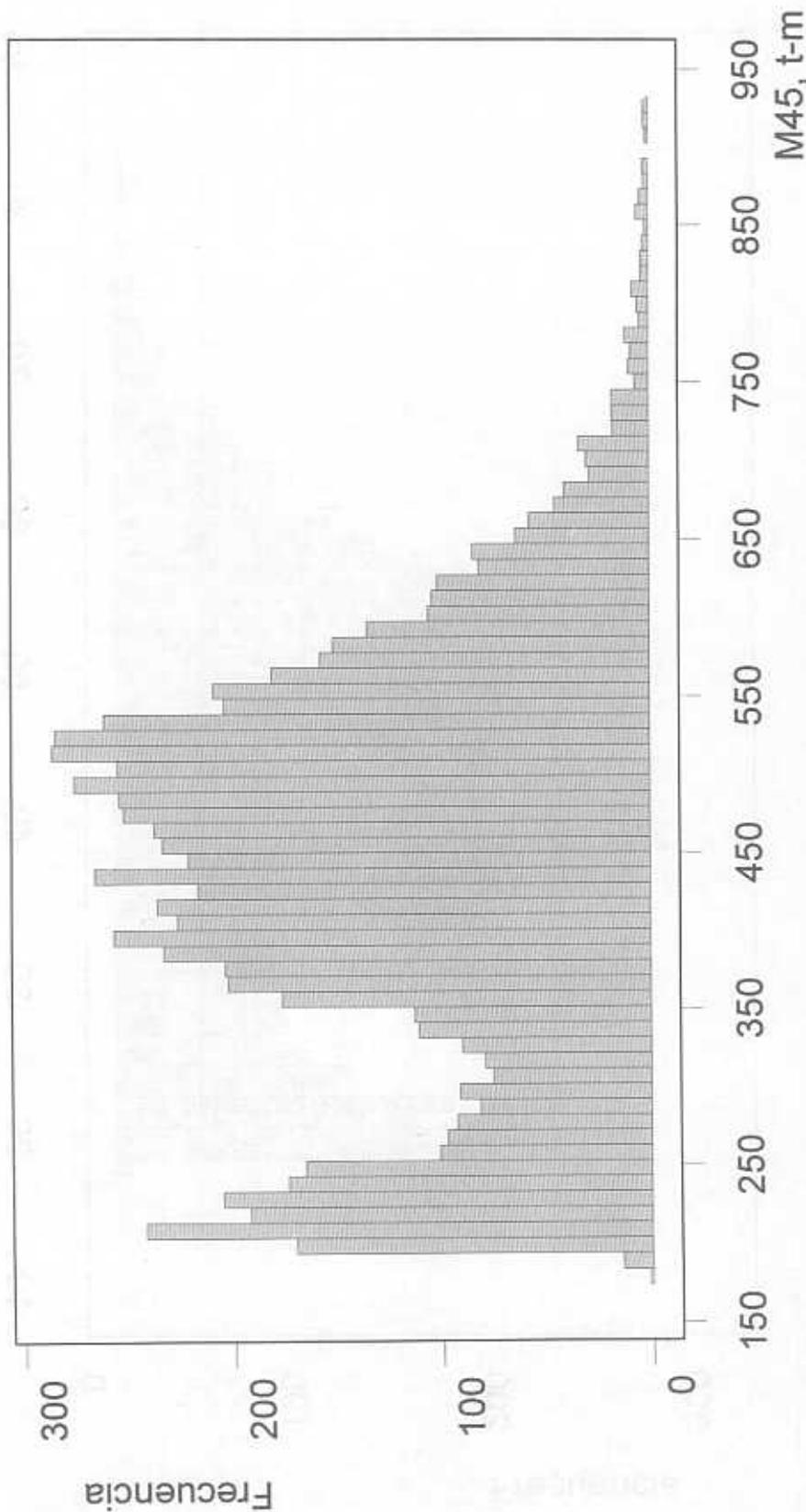


Fig. 2.10 Histograma del momento flexionante M45, T3-S3,1996

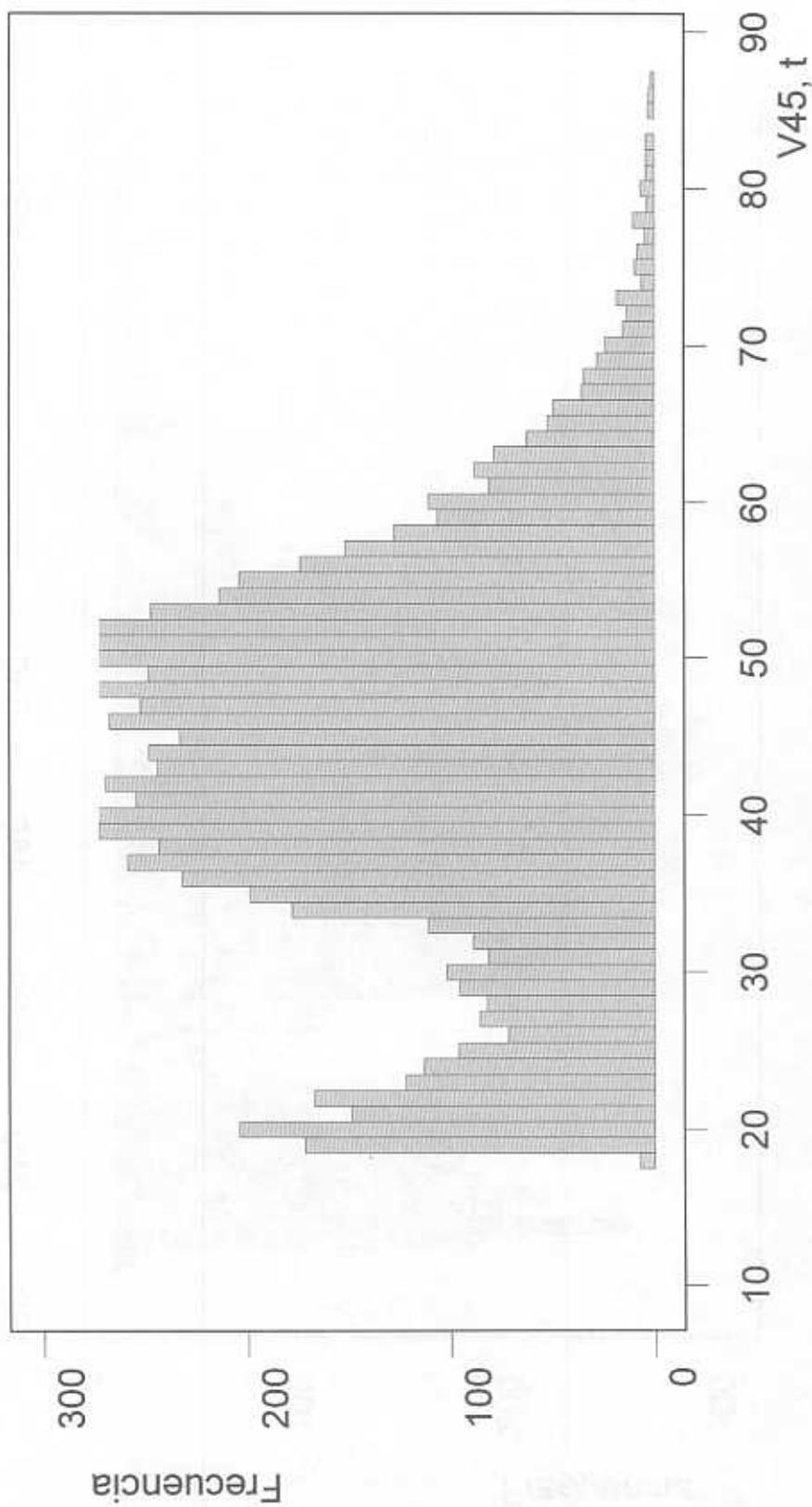


Fig. 2.11 Histograma de la fuerza cortante V45, T3-S3, 1996

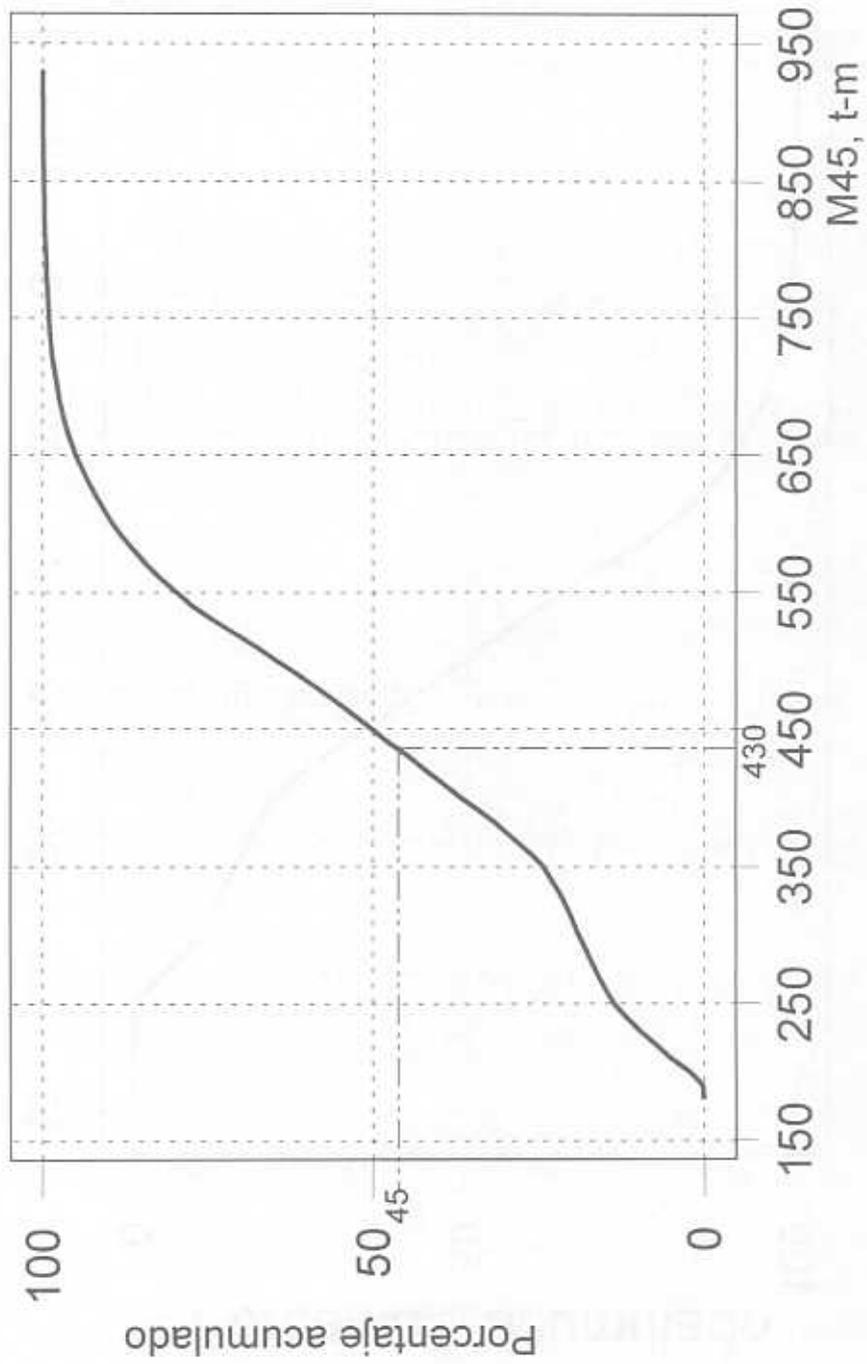


Fig. 2.12 Frecuencias relativas acumuladas de M45, T3-S3, 1996

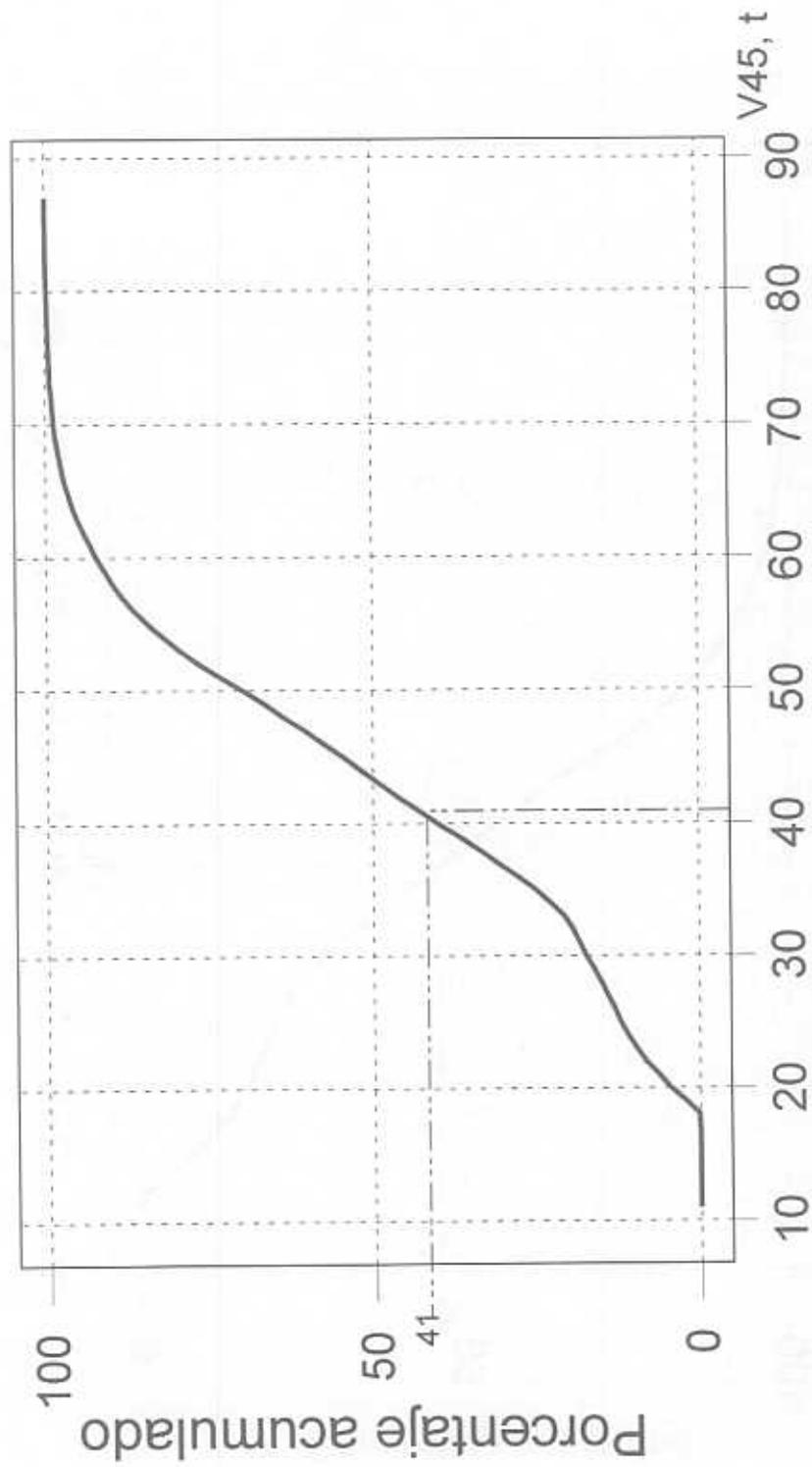


Fig. 2.13 Frecuencias relativas de la fuerza cortante V45, T3-S3, 1996

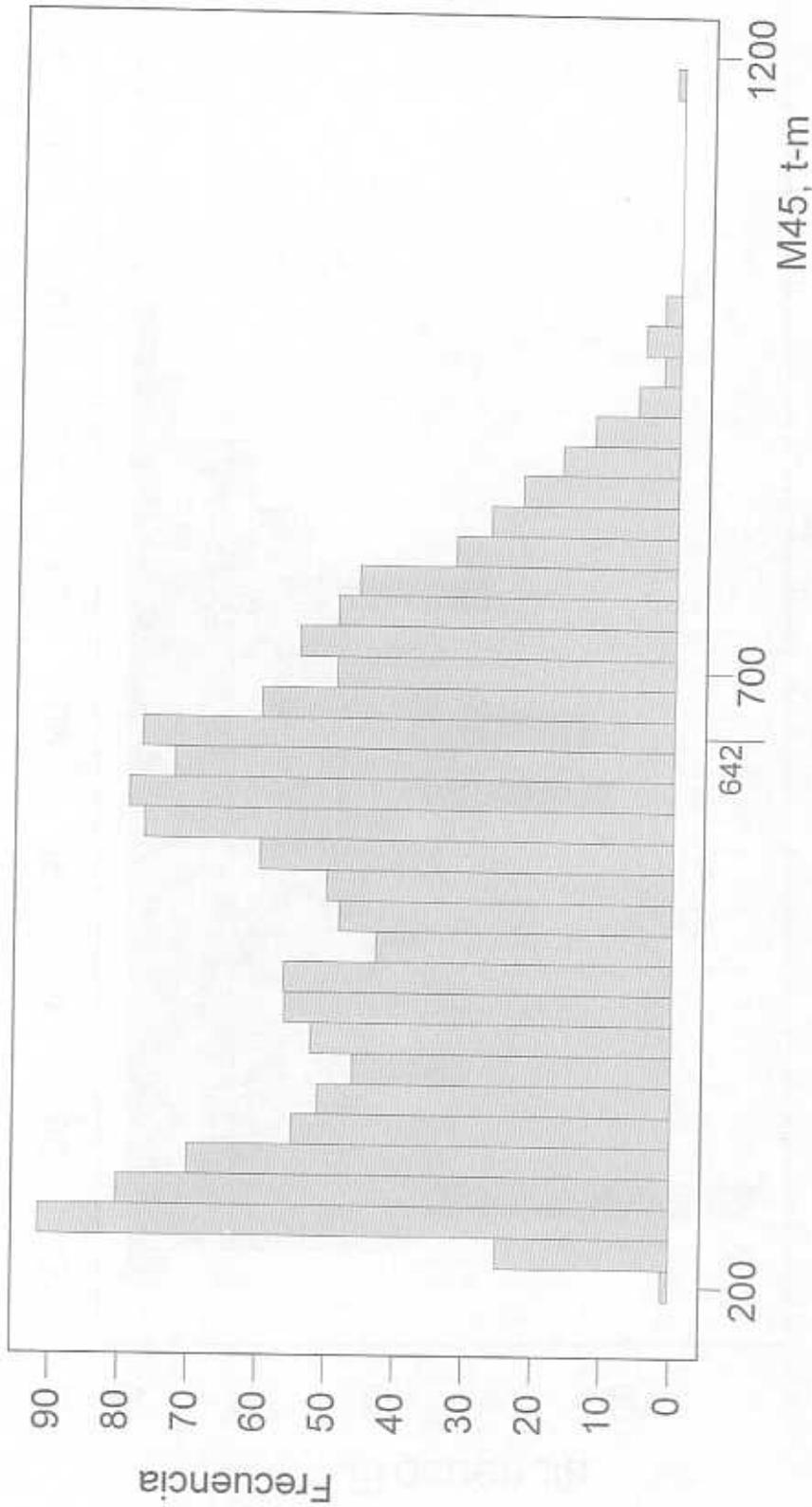


Fig. 2.14 Histograma del momento flexionante M45, T3-S2-R4, 1996

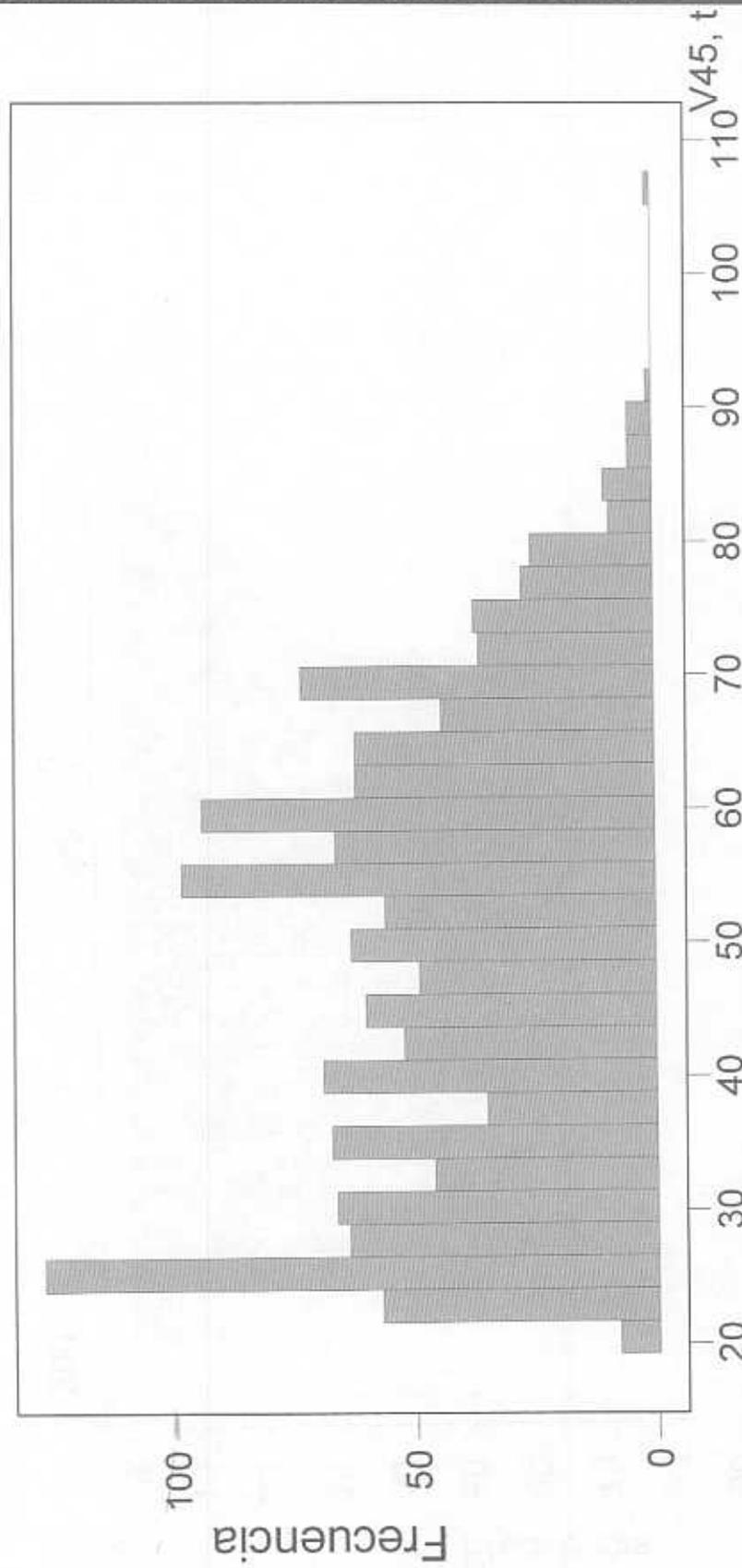


Fig. 2.15 Histograma de la fuerza cortante V45, T3-S2-R4, 1996

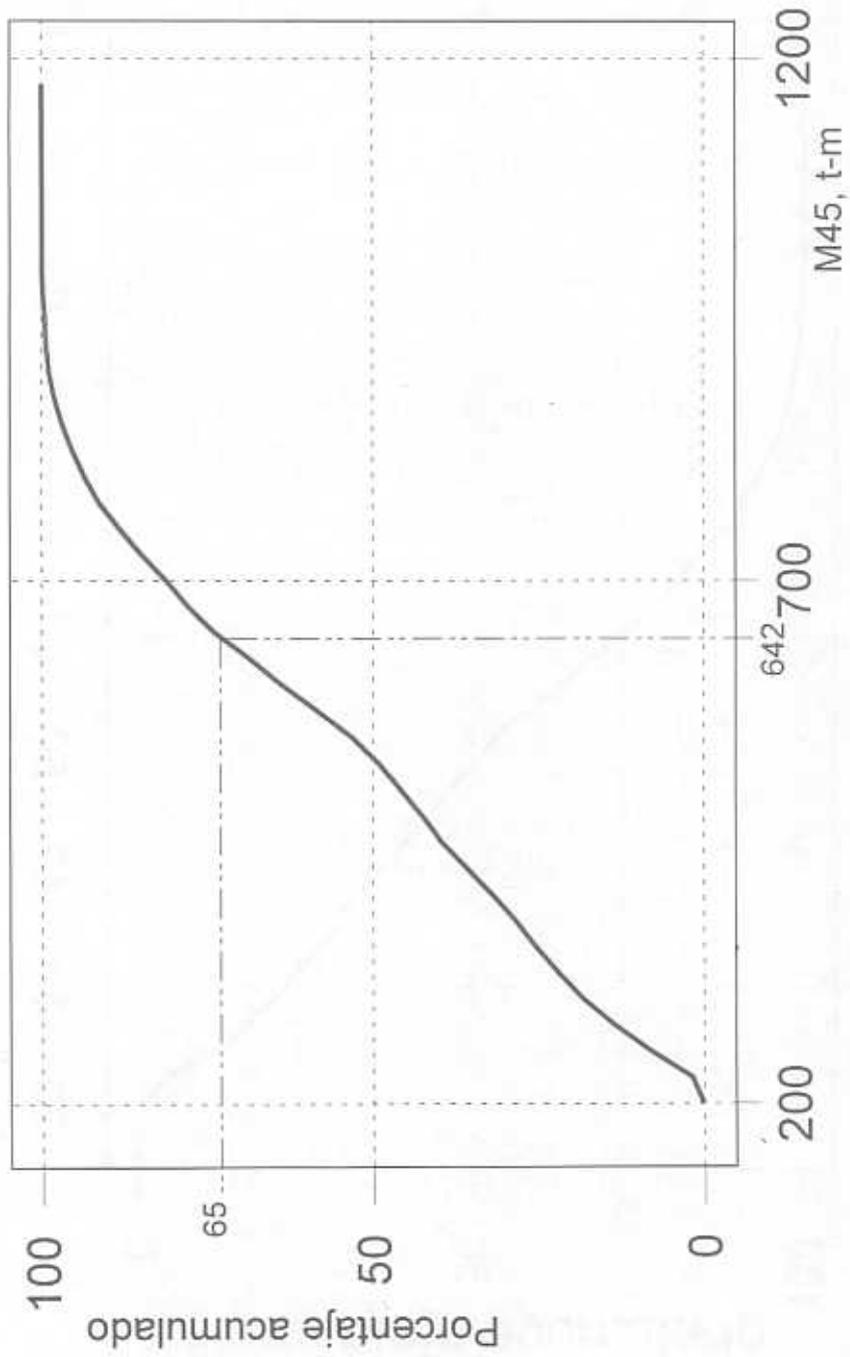


Fig. 2.16 Frecuencias relativas acumuladas de M45, T3-S2-R4, 1996

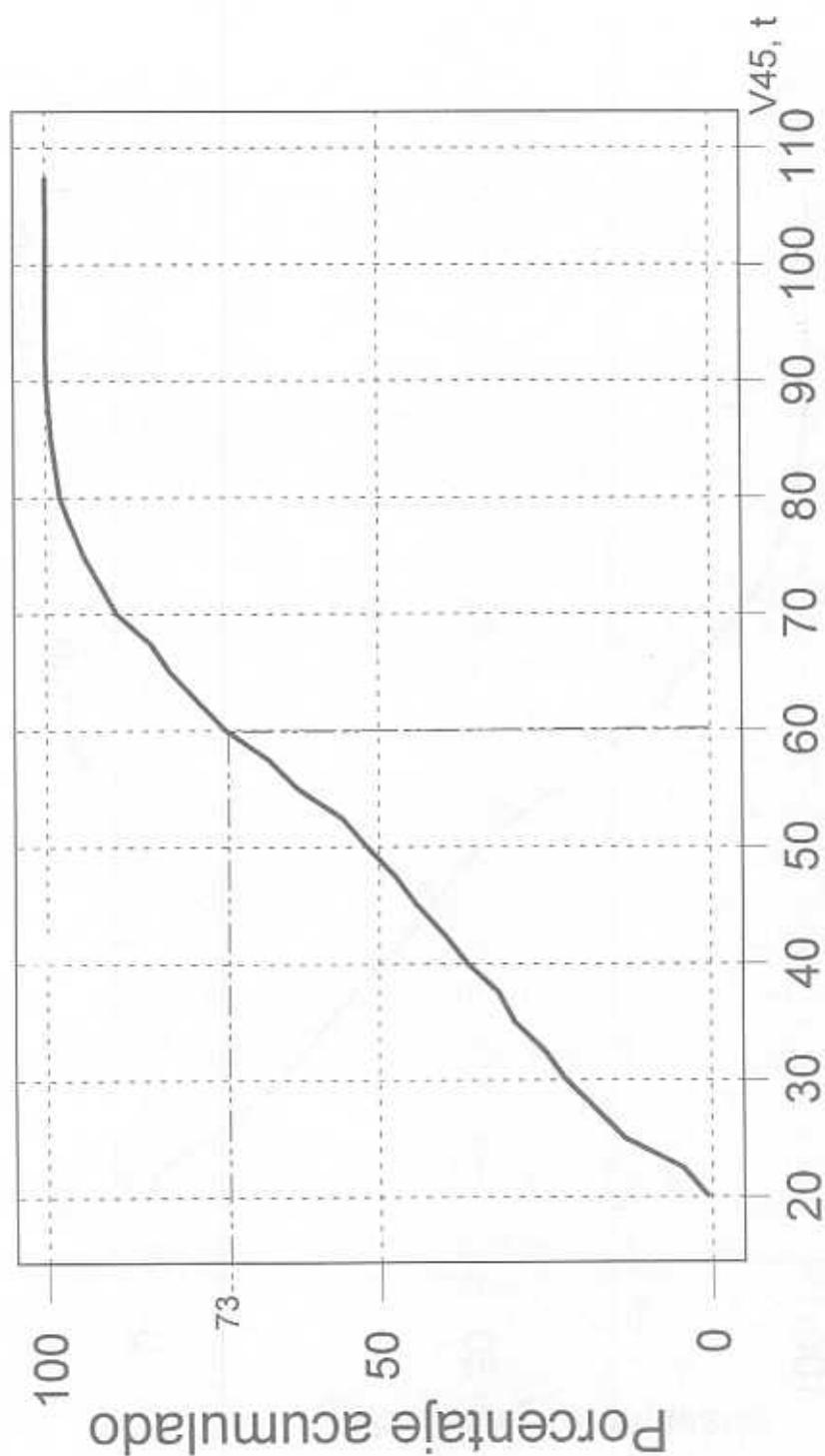


Fig. 2.17 Frecuencias relativas acumuladas de V45, T3-S2-R4, 1996

Estadísticas	T3-S3		T3-S2-R4	
	M45	V45	M45	V45
Valor Mínimo	180	18	211	20
Valor Máximo	930	87	1174	108
Promedio	444	43	529	49
Desviación Estándar	135	13	187	17
Derivado del RPD	430	41	642	60

Para los puentes de 15m y 30m las conclusiones acerca de los momentos y cortantes correspondientes son cualitativamente iguales a las antes referidas; por brevedad en el texto no se reseña aquí cada uno de los casos.

Sin embargo, en la siguiente tabla se resumen los resultados de los valores más grandes obtenidos, tanto con la muestra de 1996 como con la de 1993:

L	Momentos T3-S3		Momentos T3-S2-R4		Cortantes T3-S3		Cortantes T3-S2-R4	
	1993	1996	1993	1996	1993	1996	1993	1996
	15	232	227	190	213	75	70	59
30	593	575	604	685	86	83	84	96
45	954	930	1002	1174	89	87	93	108

Asimismo, en la figura 2.18 se presentan los valores más grandes, para las tres longitudes de puente aquí analizadas, de los momentos que se obtuvieron para cada tipo de vehículo con los datos de las muestras de 1993 y 1996, y con las cargas señaladas en el RPD.

Al comparar las poligonales formadas para el vehículo T3-S3 en ambos años, se nota que éstas están muy cercanas entre sí y, a la vez, muy próximas a la del T3-S2-R4 con datos de 1993. Por su parte, la poligonal de este último tipo de vehículo con datos de 1996 se aparta de las otras tres entre 15 y 23 por ciento para longitudes de 30m y 45m, respectivamente; para 15m todos los máximos son semejantes, aunque ligeramente mayores los del T3-S3.

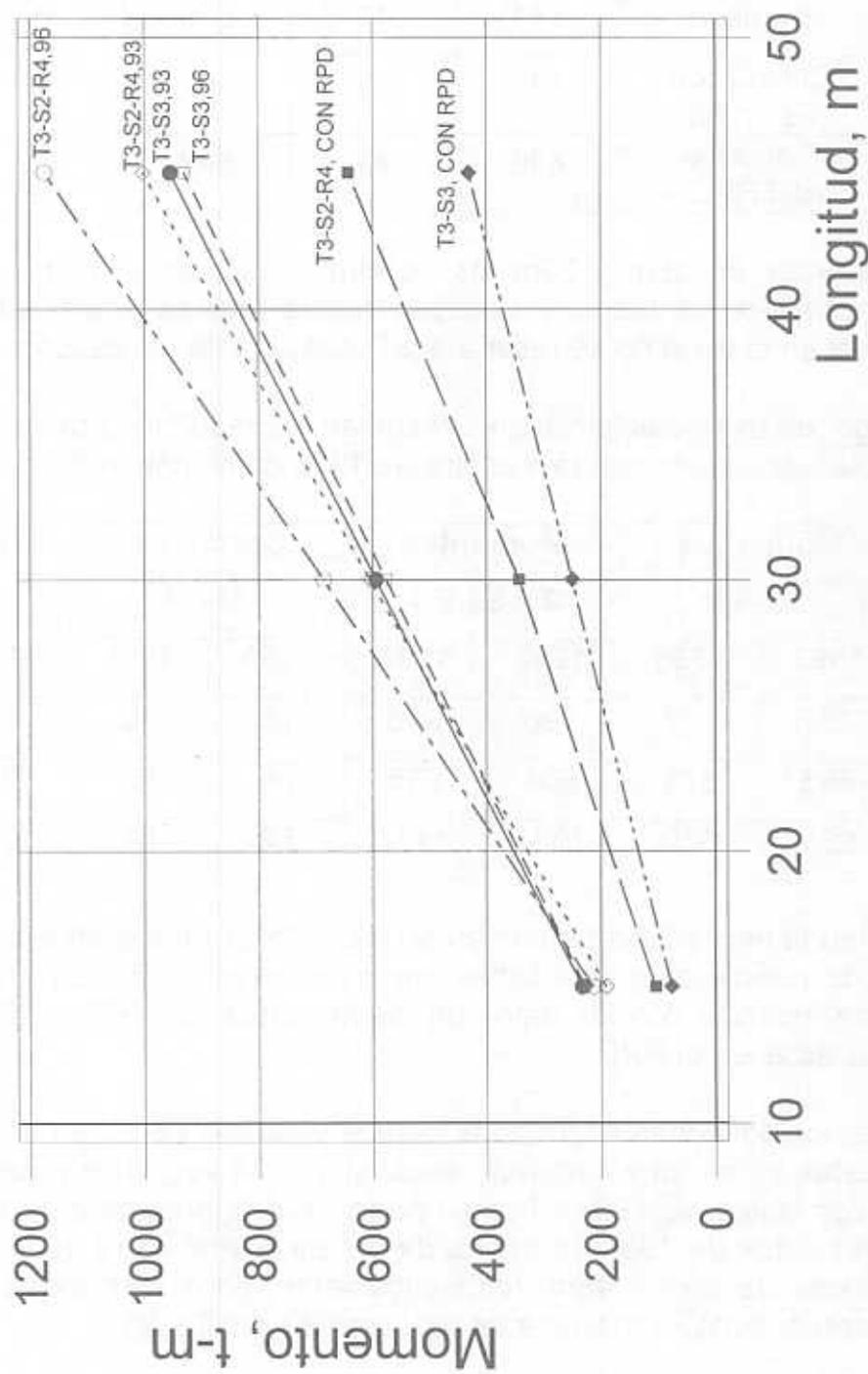


Fig. 2.18 Momentos flexionantes mayores

Por otra parte, al comparar en la misma figura los momentos más grandes (reales) que producen los vehículos contenidos en las muestras de los dos años, con los momentos que ocasionan los T3-S3 y T3-S2-R4 con las cargas máximas especificadas para cada uno de sus ejes en el RPD, se aprecia que en todos los casos estos últimos son muy inferiores a los reales, teniéndose proporciones que van del 221% al 303% en los T3-S3, y del 182% al 204% en los T3-S2-R4.

En lo que se refiere a las fuerzas cortantes, en la figura 2.19 se comparan los valores máximos correspondientes a cada uno de los casos. En ella se aprecia que también los correspondientes al T3-S3 de ambos años se parecen mucho entre sí y que los del T3-S2-R4 de 1993 también lo hacen, excepto un poco en la longitud de 15m. Por su parte, los resultados del T3-S2-R4 de 1993 y 1996 difieren entre si en un rango de 15 a 24 por ciento. Al comparar los casos de los vehículos reales con los asociados al RPD se nota que estos últimos son mucho menores, con proporciones que van del 206% al 277% en los T3-S3, y del 180% al 240% en los T3-S2-R4.

Por lo tanto, las configuraciones vehiculares y las cargas máximas señaladas en el RPD no deben ser utilizadas para el análisis estructural de puentes, sino exclusivamente para los propósitos indicados en dicho reglamento.

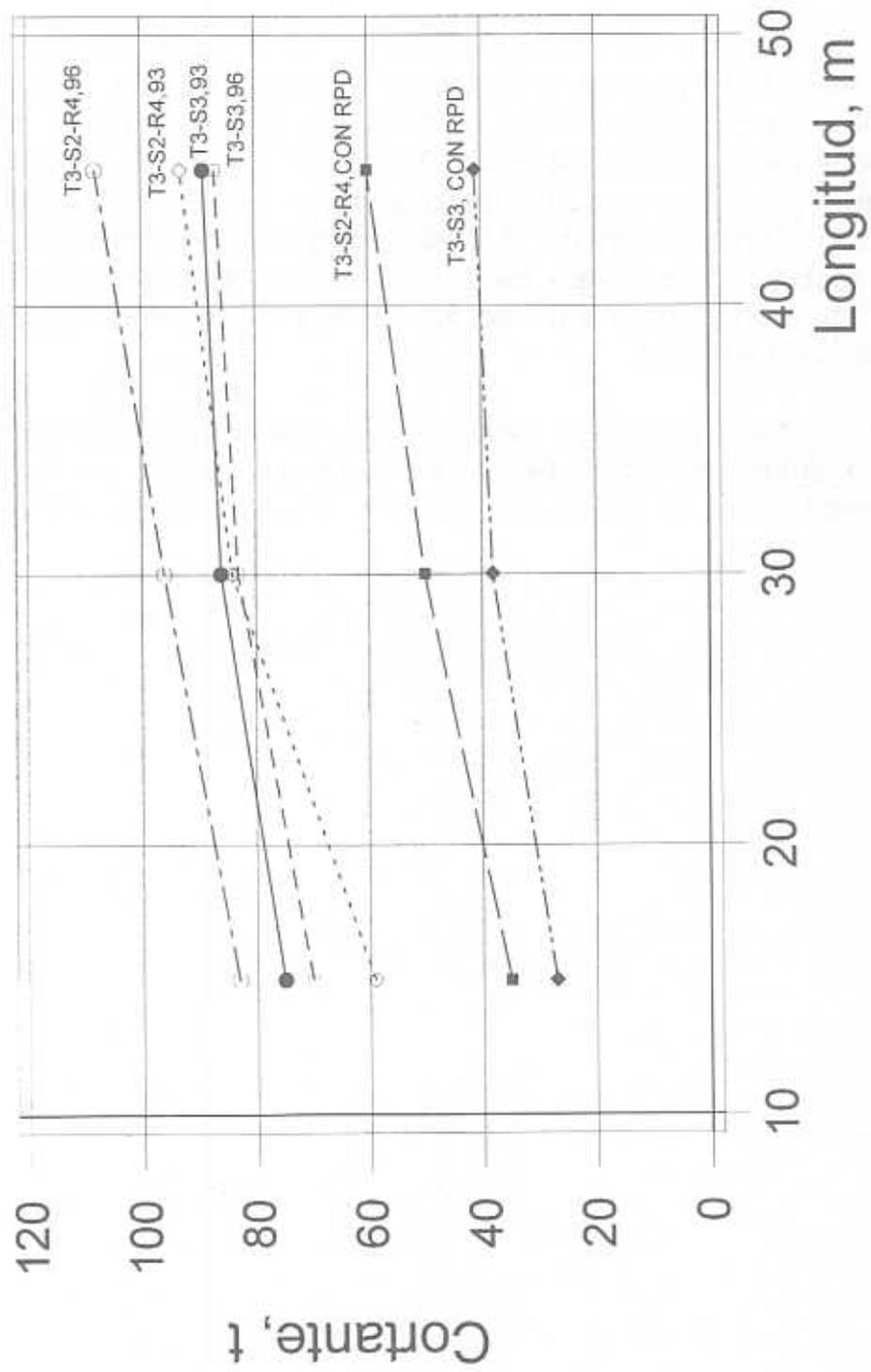


Fig. 2.19 Fuerzas cortantes mayores

3. Análisis de correlación y regresión de algunas variables con datos de 1993 y 1996

Con el propósito de obtener resultados que sirvan para confirmar la validez del diseño conceptual del modelo de cargas vivas para el análisis estructural de puentes, de manera que cubra satisfactoriamente las exigencias de las cargas vehiculares de México, se plantea aquí la hipótesis de que las cargas asociadas a las variables aleatorias antes definidas como “peso del tándem 1” (PT1), “peso del tandem 2” (PT2) y la separación entre ellas (DE3), son las que contribuyen más significativamente a producir los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos.

Esta hipótesis tiene como fundamento teórico que las cargas PT2 son las más grandes de cada vehículo, seguidas por las PT1 y que, por tanto, la fuerza resultante de ambas se ubica cerca del punto donde se produce el momento flexionante máximo que ocasionan todas las cargas por eje que se pueden colocar simultáneamente dentro del puente cuando éste ocurre, las cuales, a su vez, dependen del claro del puente; por otra parte, la fuerza cortante máxima se produce cuando la carga más grande PT2 está en un apoyo.

Para verificar estadísticamente que esta hipótesis es válida, se realizaron diversos análisis de correlación y regresión lineal múltiple de estas tres variables versus los elementos mecánicos máximos producidos por cada vehículo de la muestra. Para hacerlo, se integraron bases de datos que contienen a los valores que asumen PT1, PT2 y DE3, previamente calculados para cada vehículo de la muestra, así como a los momentos flexionantes y fuerzas cortantes que cada uno ocasiona, para puentes con claros de 15, 30 y 45m.

3.1 Análisis de correlación y regresión con datos de 1996

Como primer paso, se realizaron los cálculos de regresión y correlación lineal múltiples utilizando los datos de 1996. En este caso se presume que existe una relación lineal del tipo:

$$M45 = A + B PT2 + C PT1 + E DE3$$

donde A, B, C y E son los coeficientes cuyos valores se determinan al calcular la regresión estadística mediante el método de mínimos cuadrados.

En primer lugar, para los vehículos T3-S3, el análisis de regresión de los valores de la variable aleatoria M45, tomada como variable dependiente, con los de las tres variables aleatorias antes mencionadas, tomadas como variables

independientes, da como resultado que existe una magnífica correspondencia entre las cuatro, ya que todas las pruebas de inferencia estadística realizadas concluyeron en que todos los coeficientes de la regresión lineal son diferentes de cero con un alto nivel de confianza (superior a 99.99%), es decir, que estas variables sí contribuyen significativamente en la determinación de M45; la ecuación resultante es:

$$M45=107+9.82 PT2+8.58 PT1-11.8 DE3.$$

Asimismo, el coeficiente de correlación múltiple que se obtuvo tiene un valor muy alto, de 99.9%, y el error estándar de la estimación vale 8.75 t-m, que es bastante pequeño, al compararla con los valores que asume M45.

Además, en el análisis de variancia que se realizó, la suma de cuadrados de las tres variables independientes explica el 99.58% de la suma de cuadrados total, en tanto que la correspondiente al error de la predicción es de sólo 0.42%, por lo que la ecuación de regresión sirve muy bien para predecir a M45 en términos de PT2, PT1 y DE3; al calcular la contribución que tiene cada una de las variables independientes en la suma de cuadrados, se obtiene que PT2 contribuye con 96.44%, PT1 con 2.57% y DE3 con 0.57%, es decir, la variable que más influye al calcular M45 es PT2, luego PT1 y, finalmente, DE3.

Para tener una idea gráfica de la bondad de la regresión lineal que se obtuvo, en la figura 3.1 se presenta la distribución de frecuencias de los residuos que resultan al restar los valores reales de los valores que predice la regresión; en ella se observa que sólo en dos de los 8605 casos el residuo resulta mayor de 50 unidades; asimismo, con cálculos adicionales, se determinó que el 99.7% de los residuos se localizan dentro del intervalo de -26 a +26 unidades, que es bastante pequeño en comparación con los valores que asume la variable M45.

Con el fin de confirmar la preponderancia de PT2 y de PT1 en la regresión con M45, se calcularon también los valores del coeficiente de correlación con dos modalidades más: usando ambas variables sin DE3 y empleando a PT2 únicamente, los cuales resultaron ser 99.5% y 98.2%, respectivamente, que también son muy altos. En la figura 3.2 se muestran la recta de regresión de PT2 versus M45, ajustada a los datos por el método de mínimos cuadrados y la banda asociada a un intervalo de predicción con 95% de nivel de confianza (R es el coeficiente de correlación).

Un análisis completo de regresión y correlación múltiples, semejante al anterior, se realizó para los momentos flexionantes y fuerzas cortantes máximos que

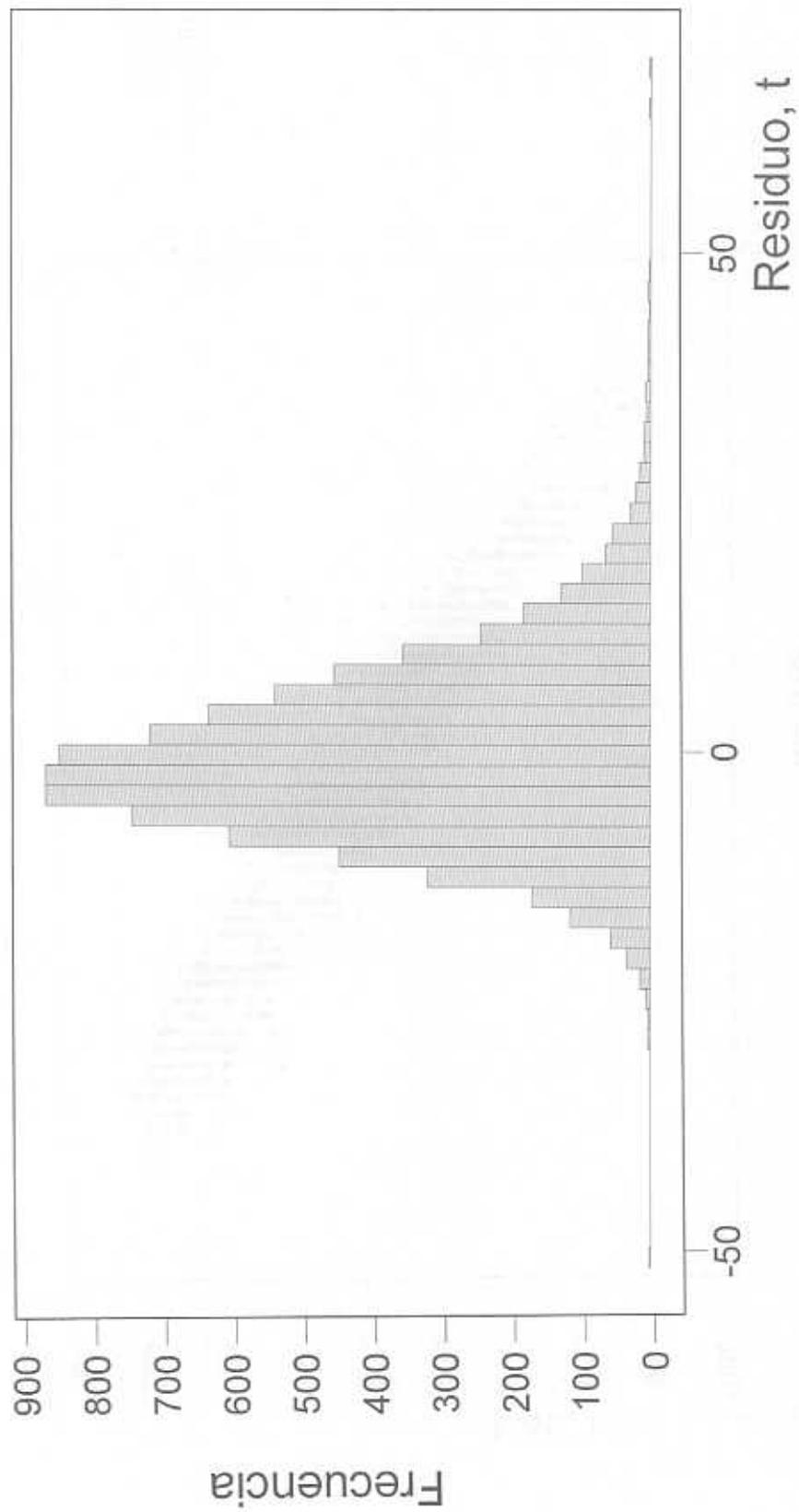


Fig. 3.1 Histograma de residuos de M45, T3-S3, 1996

$$Y = 60.3872 + 14.8324X$$
$$R = 0.98$$

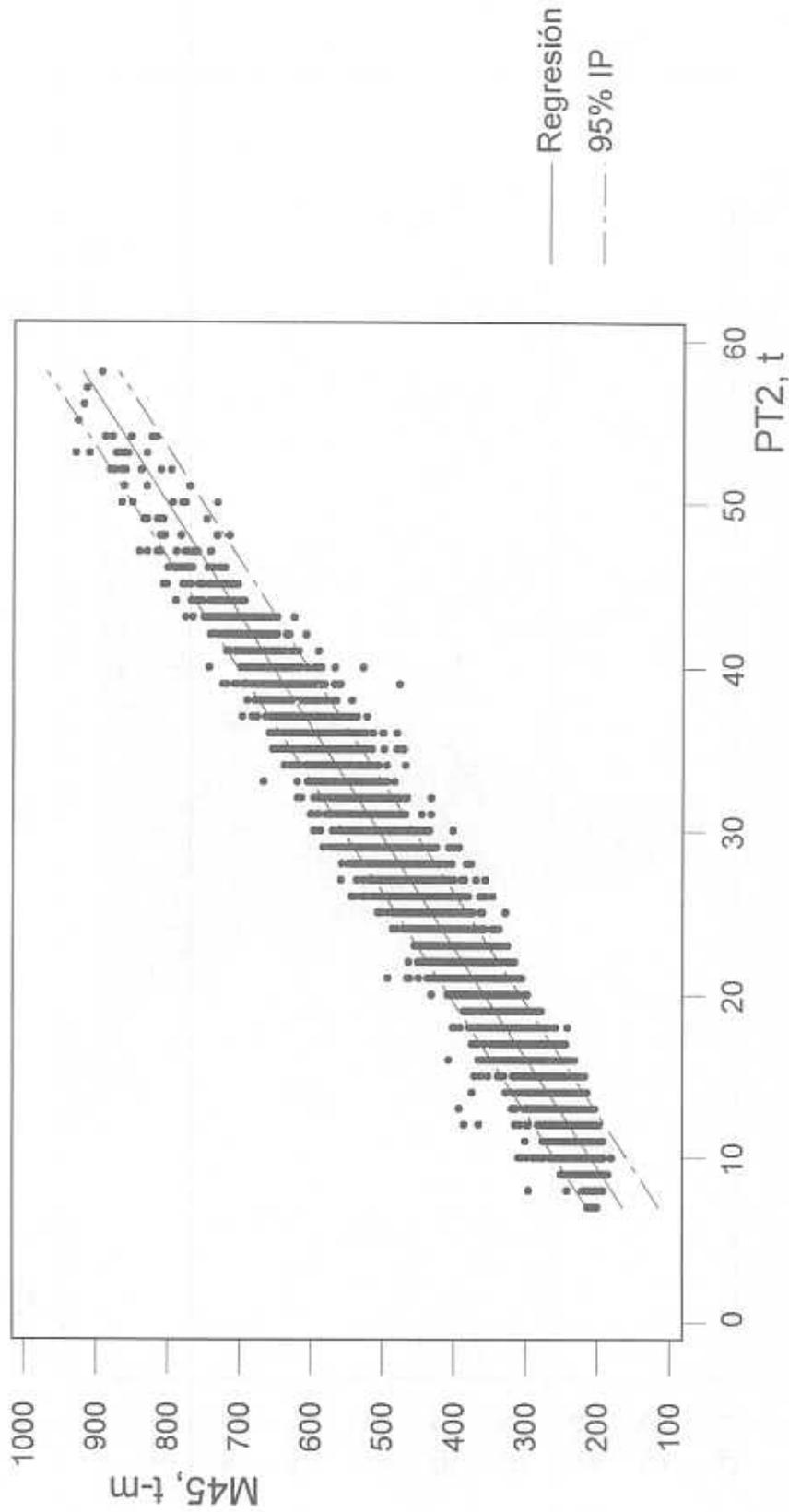


Fig. 3.2 Regresión lineal entre M45 y PT2, T3-S3, 1996

ocasionan cada uno de los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4 de la muestra en puentes con claros de 15, 30 y 45m. En la siguiente tabla se presentan los coeficientes de correlación múltiple correspondientes, notándose que todos son muy altos; también se confirmó que las variables preponderantes son, en orden de importancia, PT2, PT1 y DE3.

Longitud, m	T3-S2-R4		T3-S3	
	Coeficientes de correlación, %, para			
	Momento	Cortante	Momento	Cortante
15	98.0	86.0	98.9	77.3
30	98.4	98.4	99.7	97.0
45	99.5	99.9	99.9	97.9

En las figuras 3.3 y 3.4 se muestran los casos de la regresión lineal de los datos de las variables PT2 con V45 correspondiente a los vehículos T3-S3, y de PT2 con M45 de los T3-S2-R4; en ambas se confirma que existen muy buenas correlaciones entre ellas.

Por otra parte, en las figuras 3.5 y 3.6 se presentan las rectas de regresión ajustadas a los datos de PT1 y PT2, correspondientes a las muestras de los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4, respectivamente. En ambas se observa una buena relación lineal; los respectivos coeficientes de correlación valen 86.9% y 89.8%, de lo cual se concluye que estas dos variables aleatorias no son estadísticamente independientes, lo cual es congruente con la lógica del caso.

En virtud de que los coeficientes de correlación mostrados en la tabla anterior son muy parecidos entre sí, para cada tipo de elemento mecánico y longitud de puente y de que las distribuciones de frecuencias relativas acumuladas mostradas en la figura 3.7 no difieren mucho entre sí, se tomó la decisión de juntar las dos muestras y conformar una sola. Al hacer los análisis de regresión y correlación se obtuvieron relaciones lineales muy buenas de cada uno de los

$$Y = 8.20214 + 1.35573X$$
$$R = 0.96$$

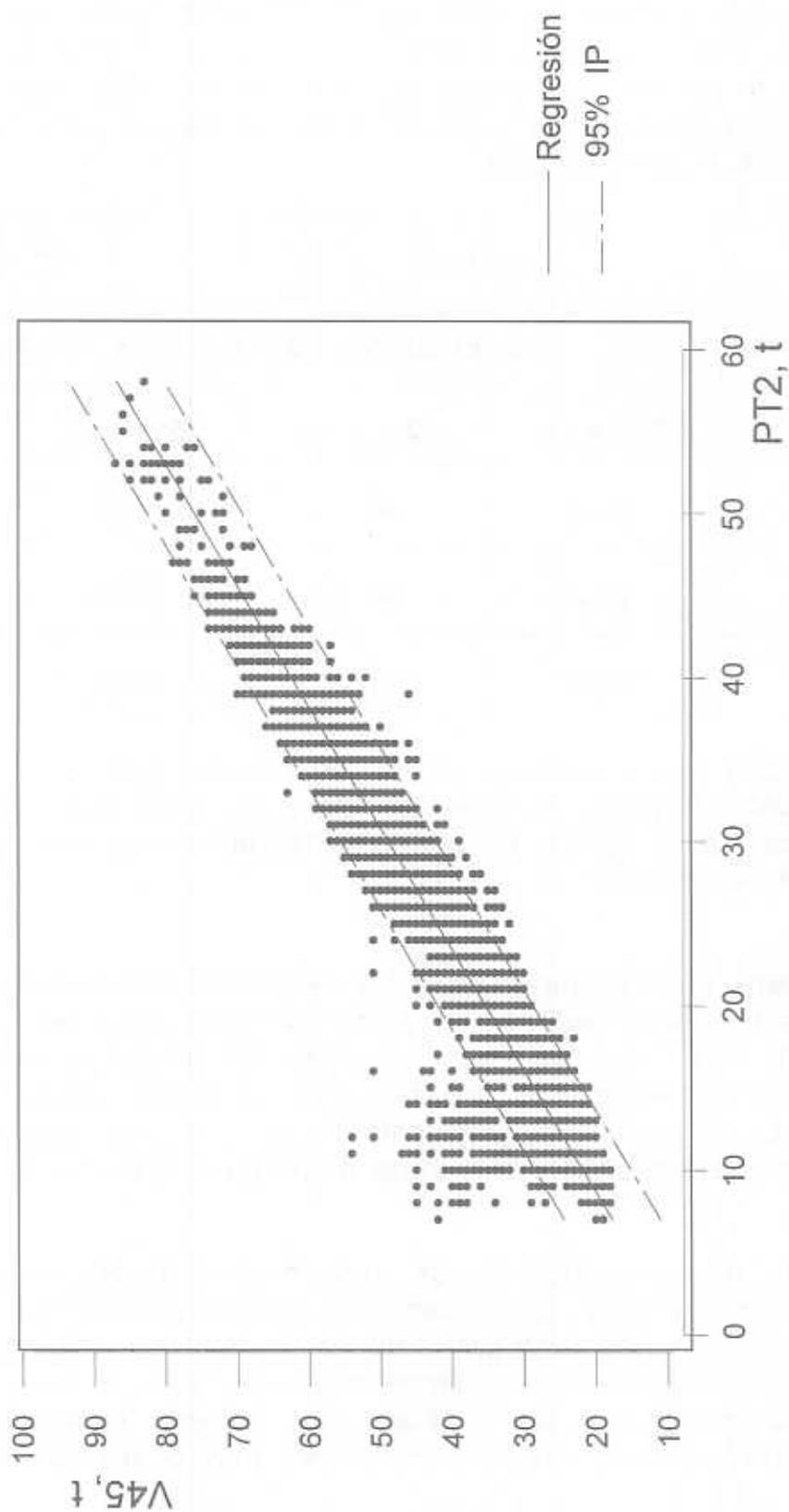


Fig. 3.3 Regresión lineal entre V45 y PT2, T3-S3, 1996

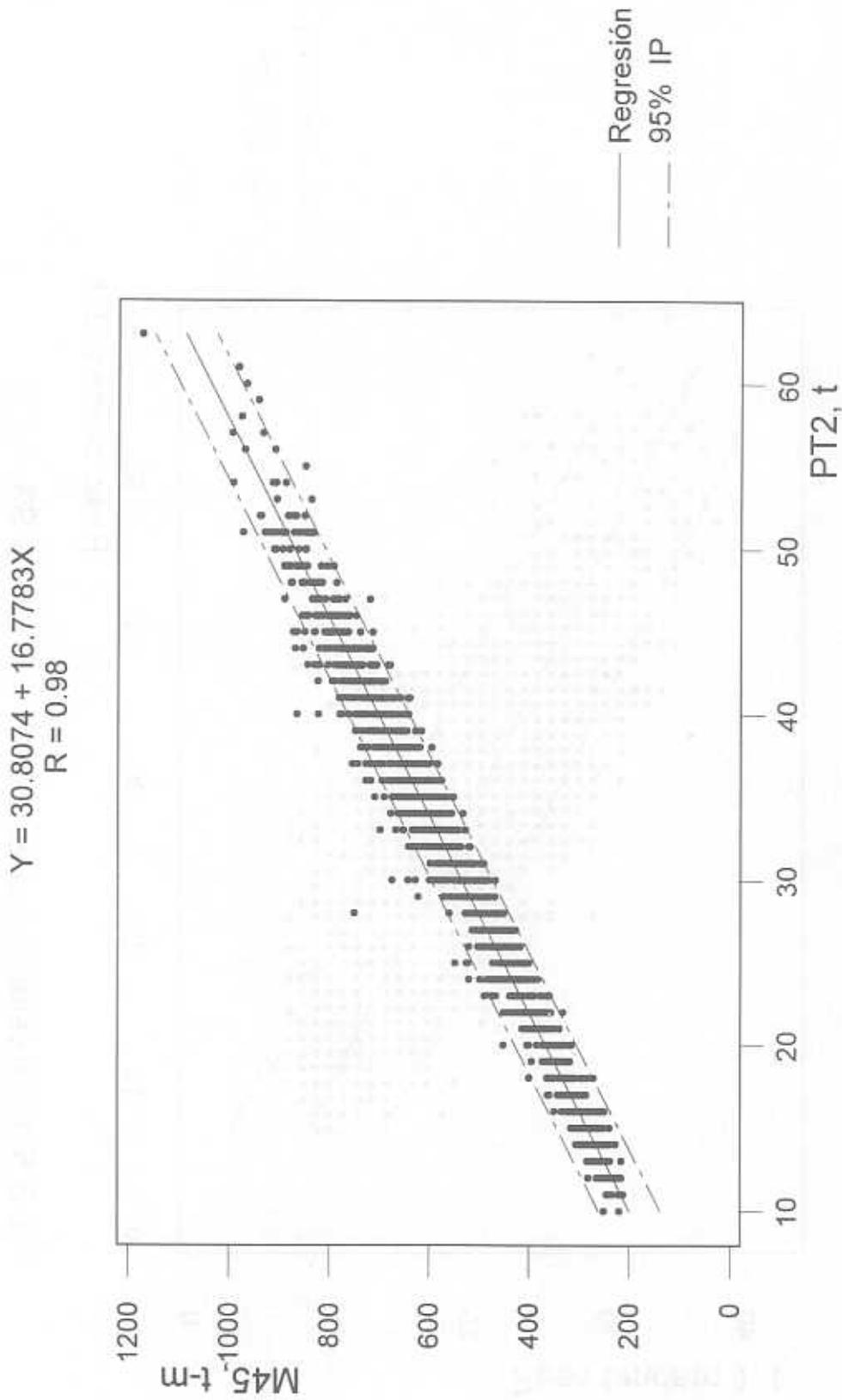


Fig. 3.4 Regresión lineal entre M45 y PT2, T3-S2-R4, 1996

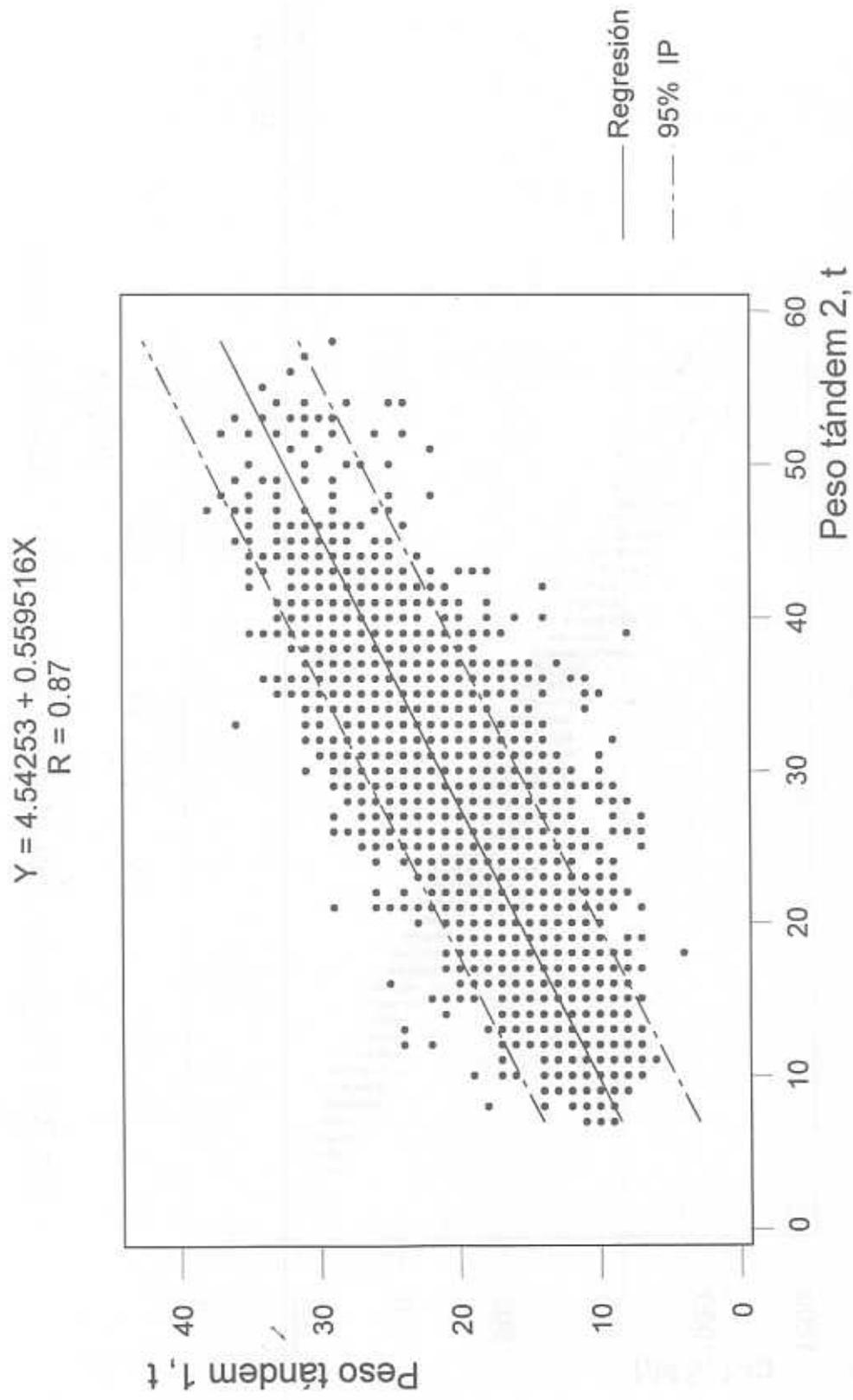


Fig. 3.5 Regresión lineal entre PT1 y PT2, T3-S3, 1996

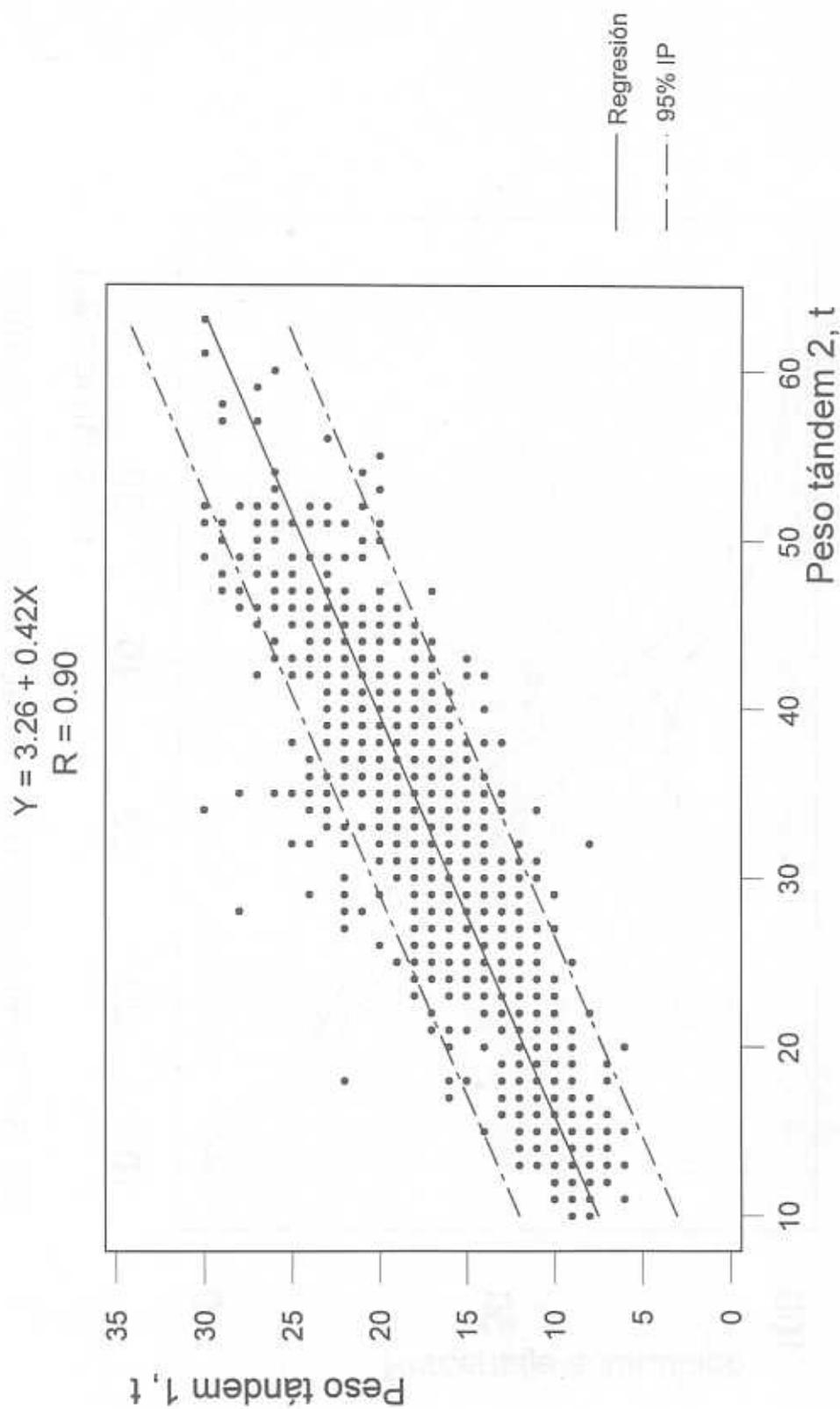


Fig. 3.6 Regresión lineal entre PT1 y PT2, T3-S2-R4, 1996

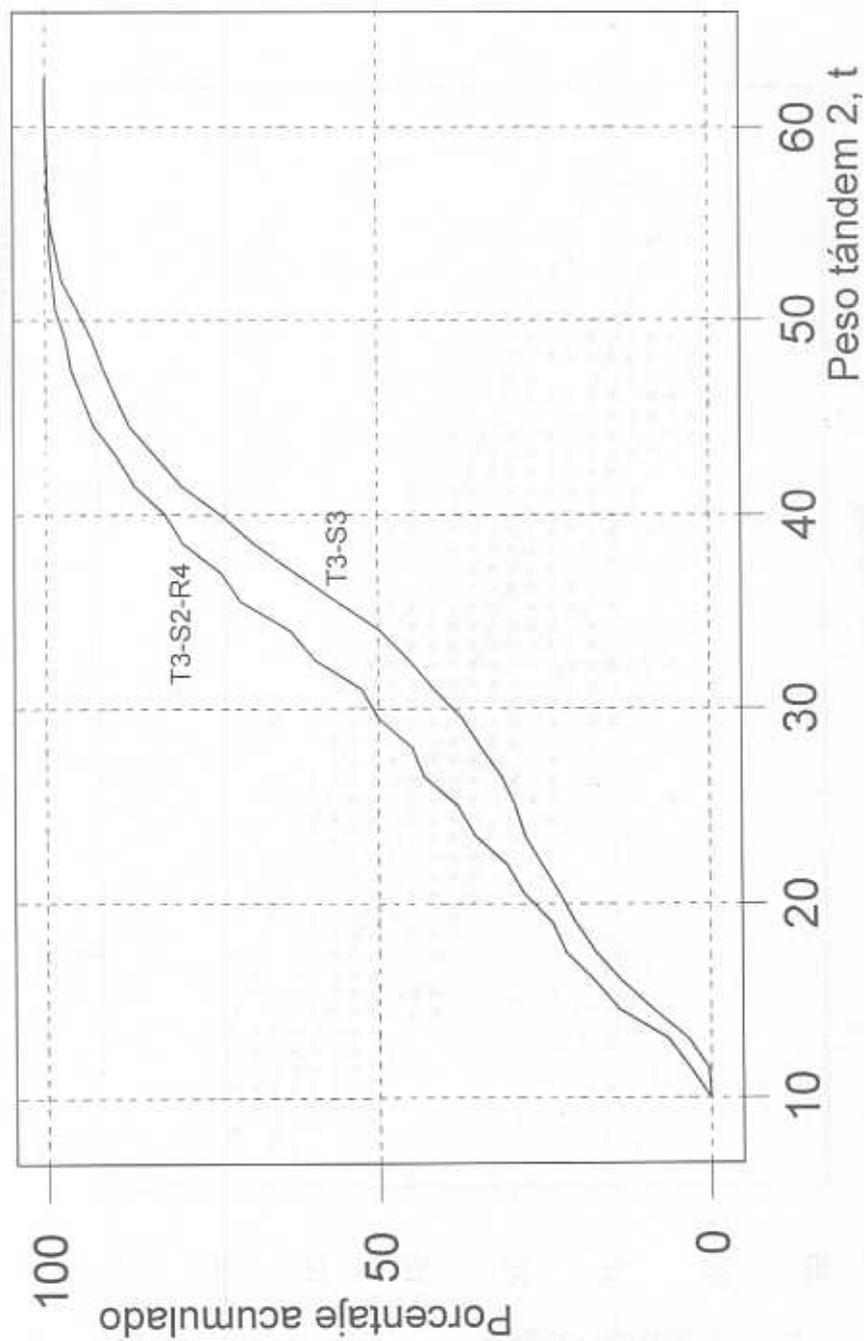


Fig. 3.7 Frecuencias relativas acumuladas de PT2, 1996

elementos mecánicos con PT2 y con PT1. En la siguiente tabla se presentan los coeficientes de correlación que se calcularon, los cuales confirman lo anterior.

Longitud, m	Coeficientes de correlación, %, para			
	Momento-PT2	Cortante-PT2	Momento-PT1	Cortante-PT1
15	96.6	75.4	83.5	70.9
30	97.8	95.3	85.7	86.6
45	98.0	96.6	83.9	84.6

Al observar los resultados se aprecia que existe una magnífica correlación de PT2 con los momentos y las cortantes, y una muy buena correlación entre éstos y PT1; en ambos casos la correlación se reduce para la fuerza cortante asociada al claro de 15m.

Para ilustrar las conclusiones anteriores, en las figuras 3.8 a la 3.12 se muestran algunas regresiones de M45, M30 y V30 con PT2 y de PT1 con M45 y V45. En ellas se tiene marcada la banda de predicción del 95% de nivel de confianza ($R-S_q$ significa el coeficiente de correlación al cuadrado).

3.2 Análisis de correlación y regresión con los datos de 1993

Debido a que en la publicación de la referencia 1 se presentó un estudio estadístico descriptivo de los datos captados en la muestra de 1993, que involucró a la mayoría de las variables que son de interés para el análisis estructural de puentes, en esta sección se estudiarán otros casos que son relevantes para la formulación y evaluación del modelo de cargas vivas que se propone más adelante en este trabajo.

Dado que ya se demostró en este trabajo que las variables aleatorias PT2 y PT1 son preponderantes en el cálculo de los elementos mecánicos que los vehículos ocasionan en los puentes, y con el fin de conocer su comportamiento estadístico en la muestra de 1993, en las figuras 3.13 y 3.14 se presentan las respectivas distribuciones de frecuencias correspondientes a los 9,050 vehículos T3-S3, con

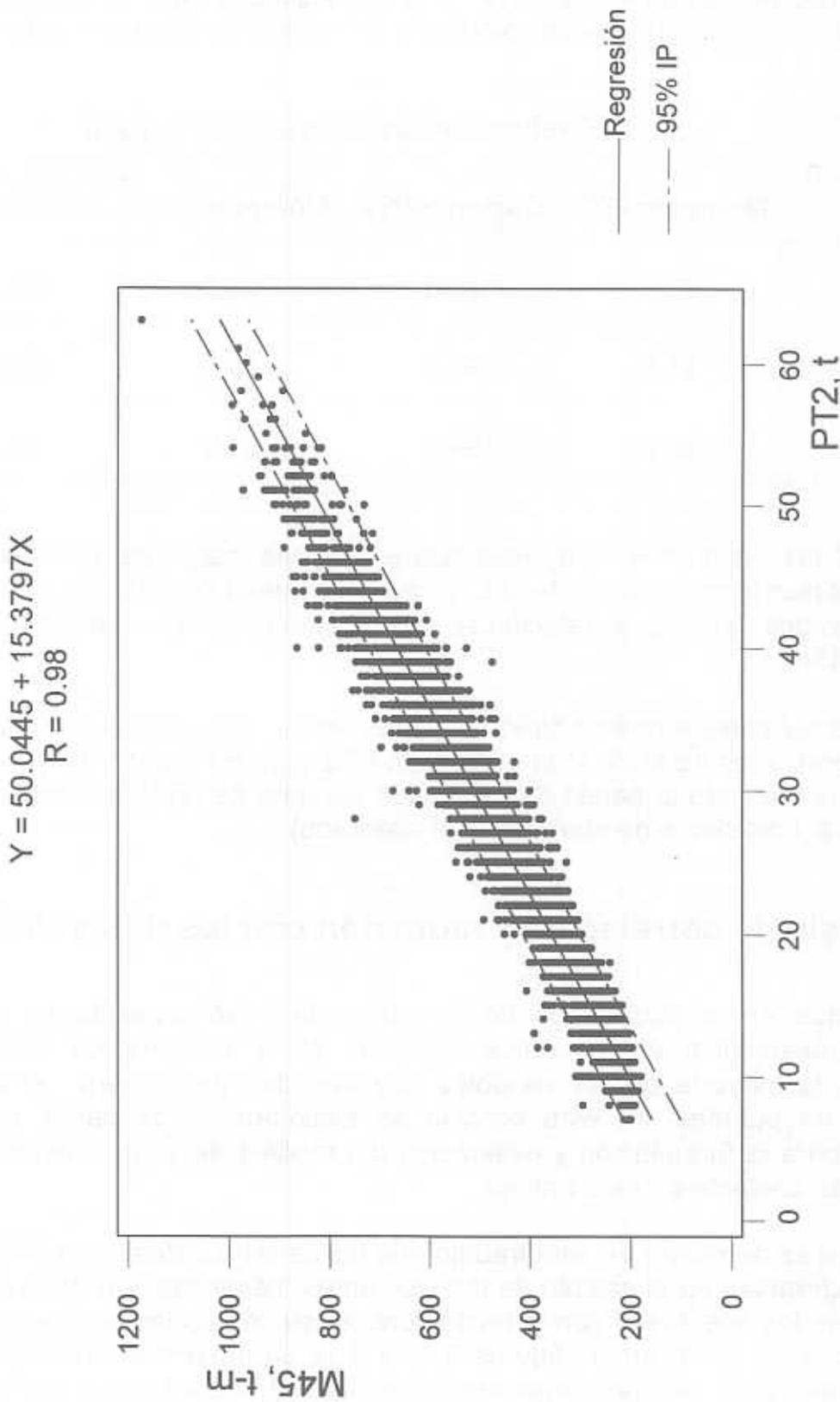


Fig. 3.8 Regresión lineal entre M45 y PT2, T3-S3 y T3-S2-R4, 1996

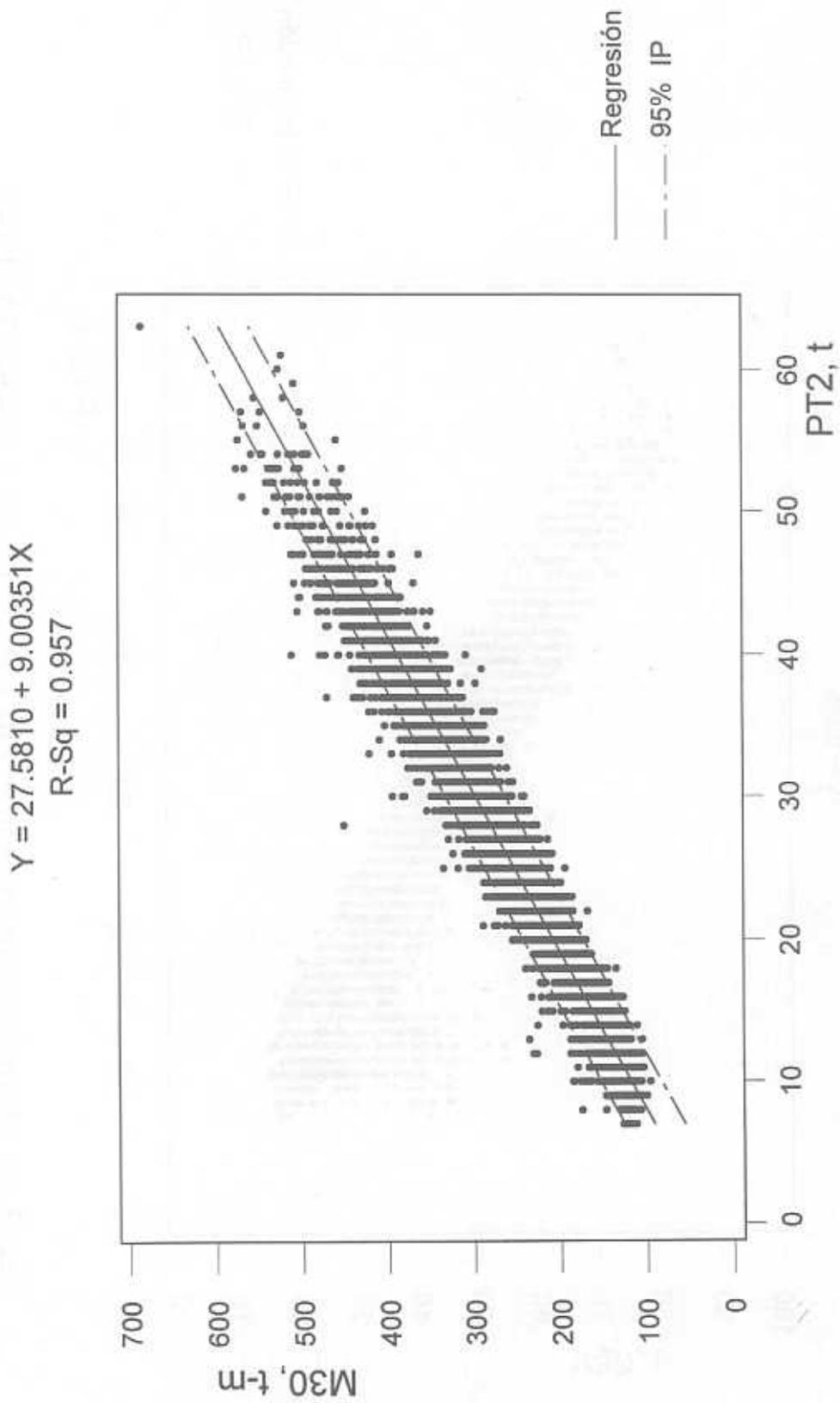


Fig. 3.9 Regresión lineal entre M30 y PT2, T3-S3 y T3-S2-R4, 1996

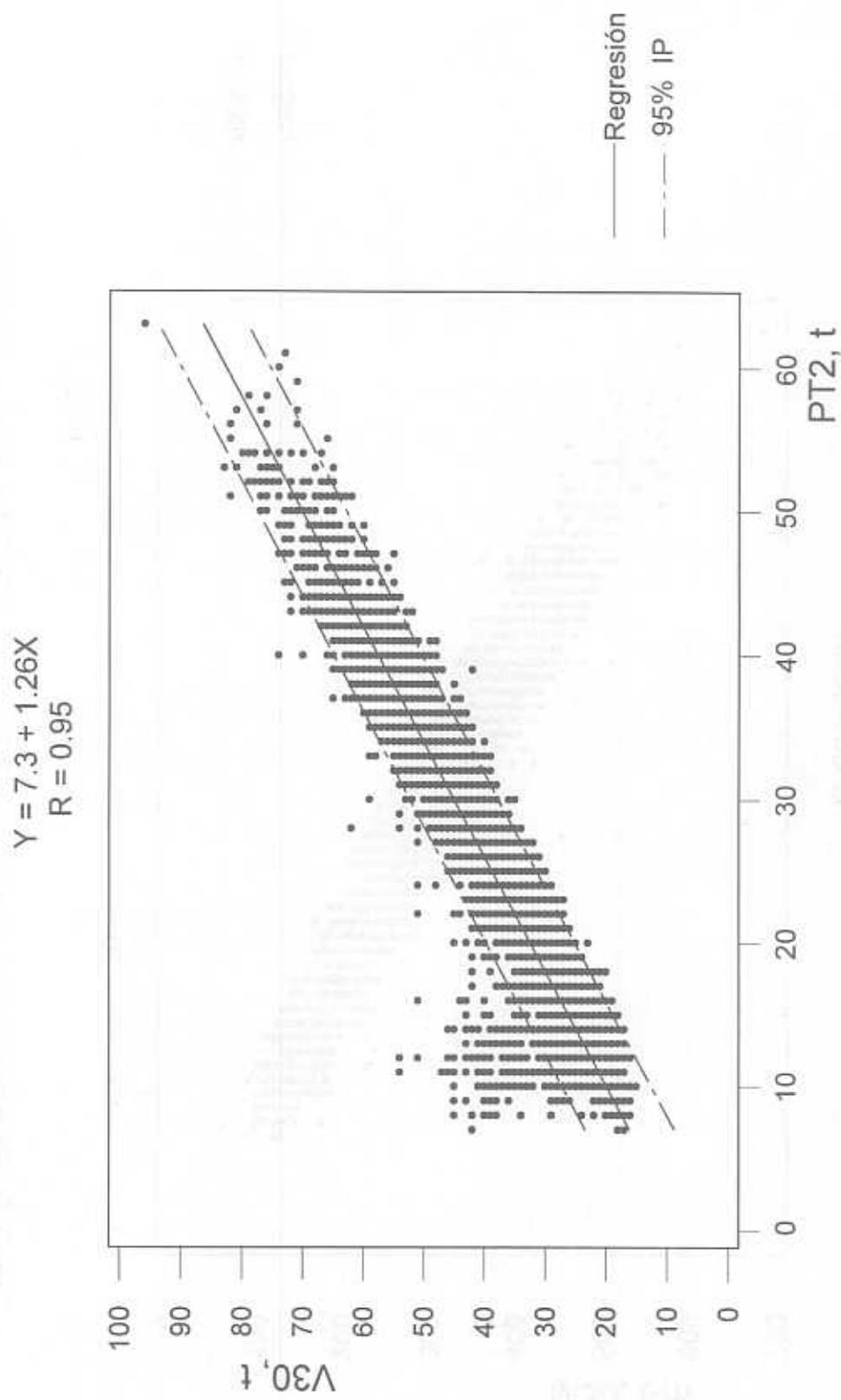


Fig. 3.10 Regresión lineal entre V30 y PT2, T3-S3 y T3-S2-R4, 1996

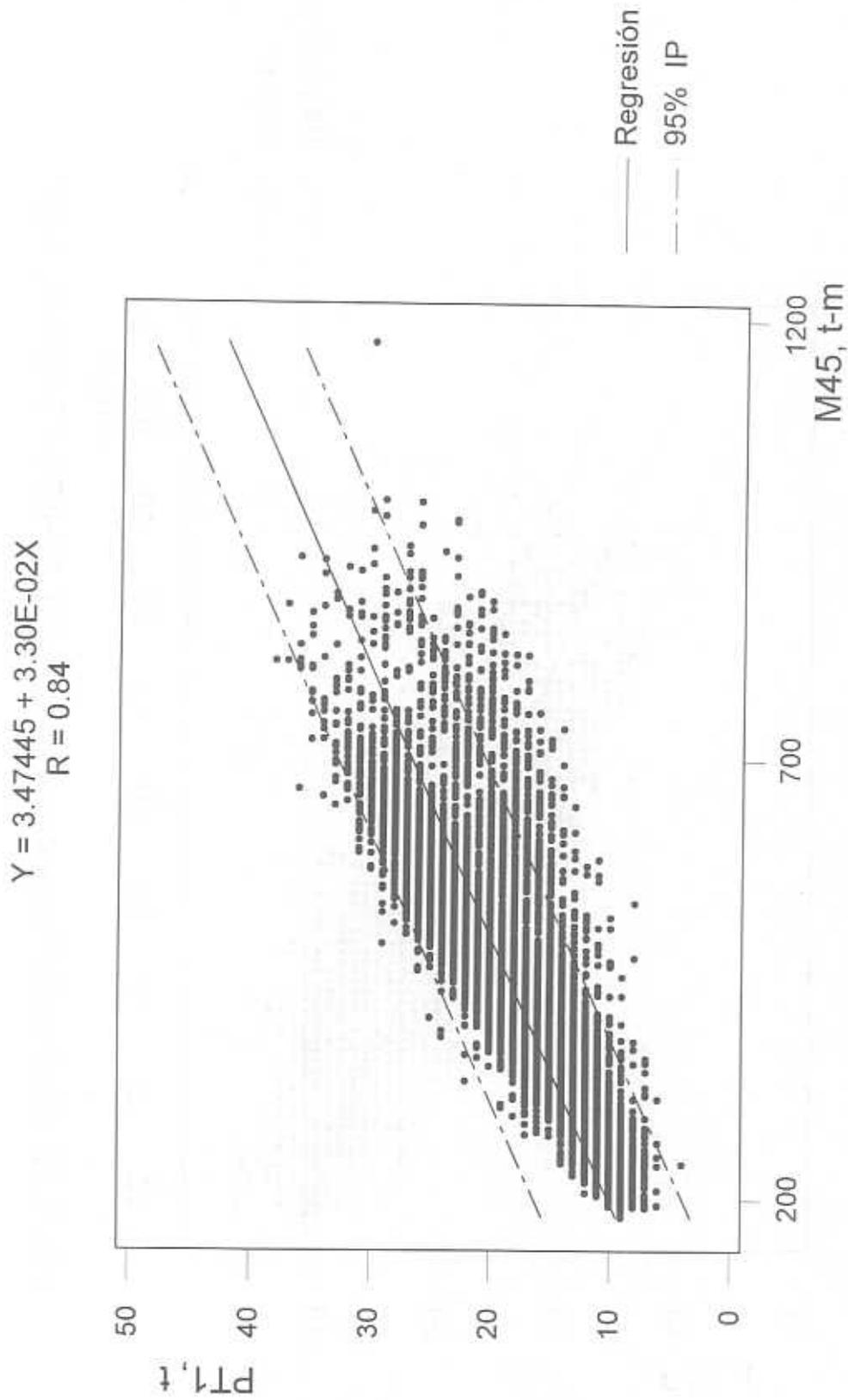


Fig. 3.11 Regresión lineal entre PT1 y M45, T3-S3 y T3-S2-R4, 1996

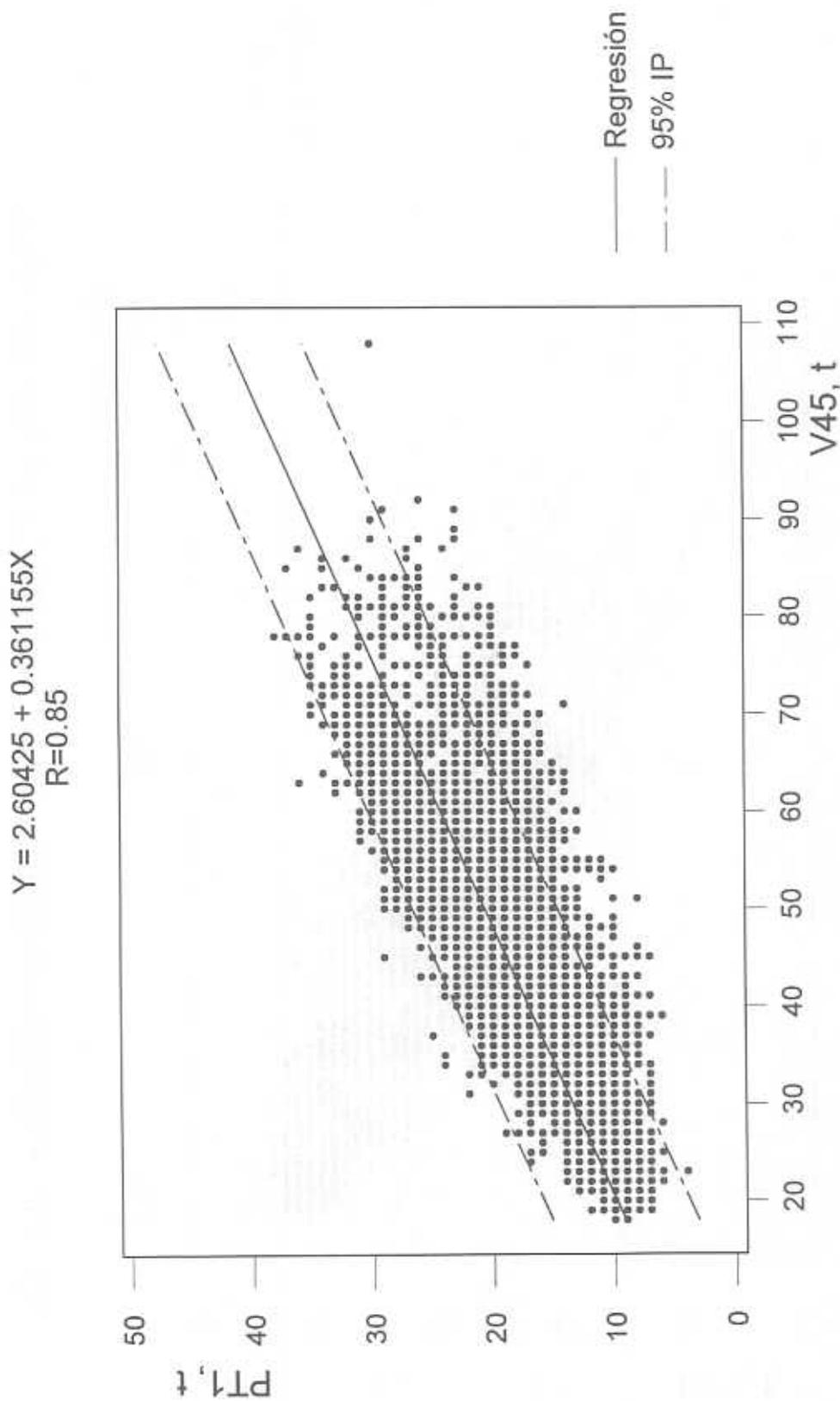


Fig. 3.12 Regresión lineal entre PT1 y V45, T3-S3 y T3-S2-R4, 1996

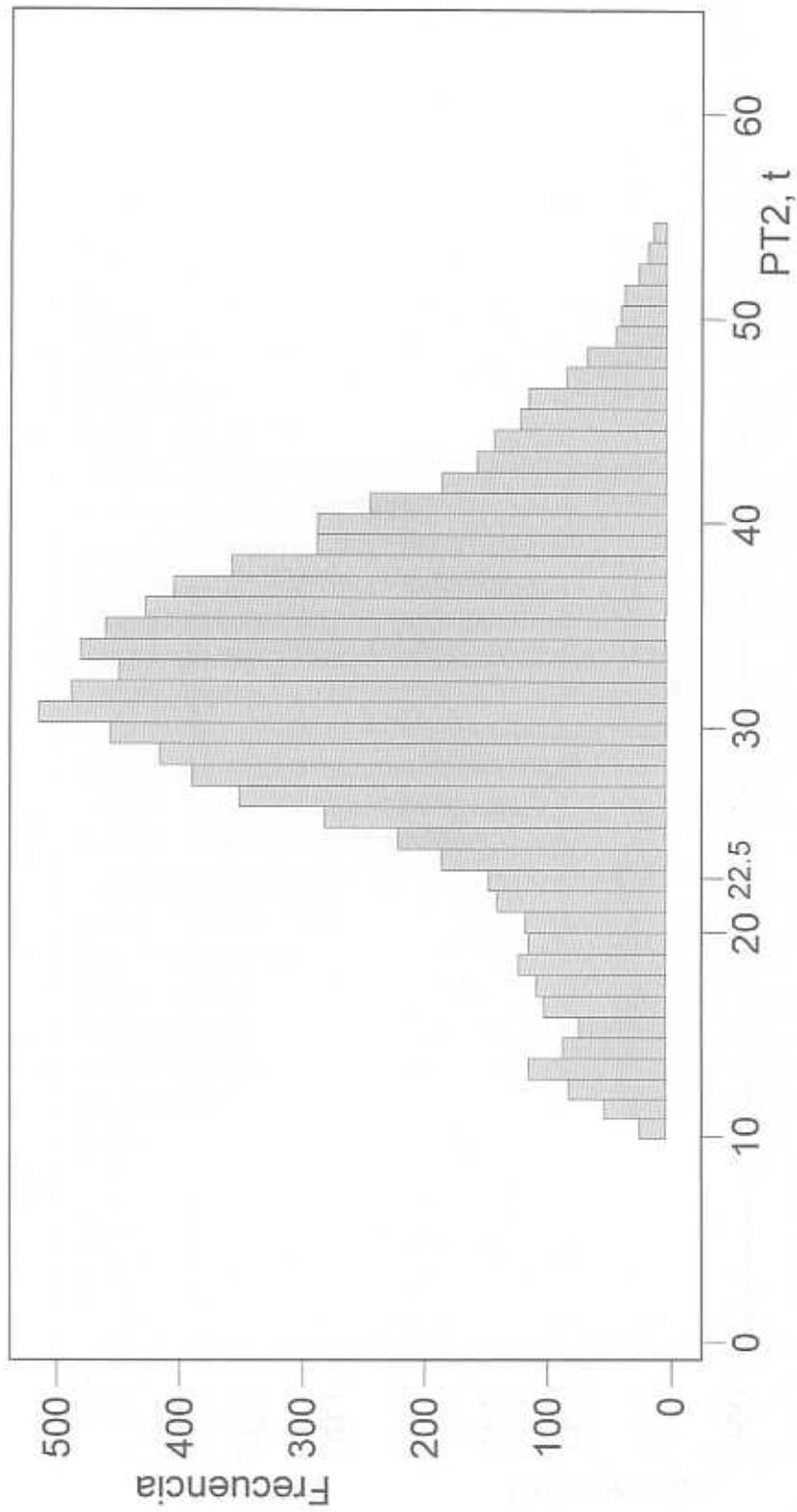


Fig. 3.13 Histograma del peso tándem 2, T3-S3, 1993

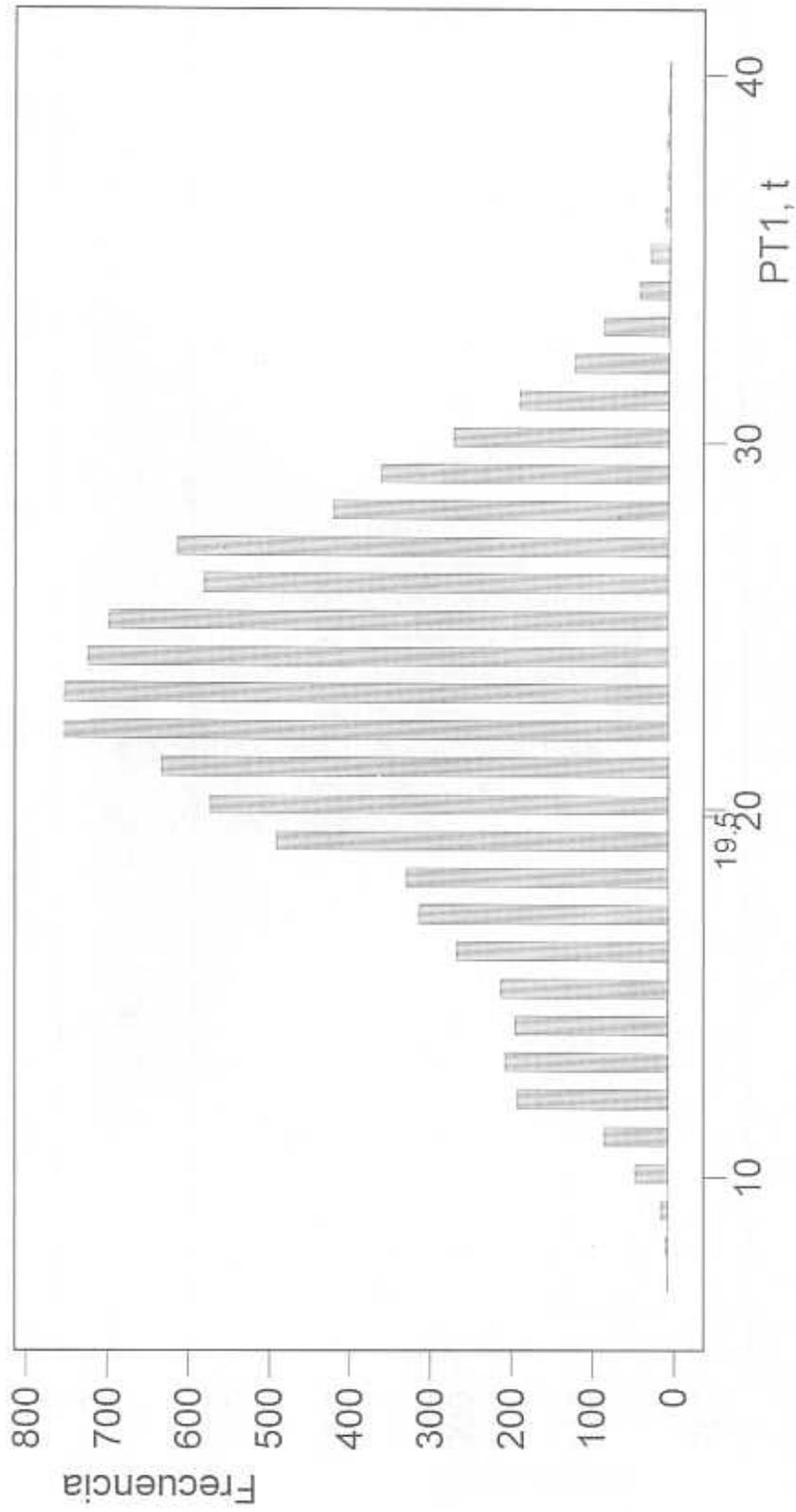


Fig. 3.14 Histograma del peso tandem 1, T3-S3, 1993

los correspondientes máximos permitidos por el RPD (22.5t y 19.5t) marcados en el eje horizontal.

Al observar las figuras se aprecia que los valores permitidos son excedidos muy frecuentemente y en muy alta proporción: para PT2 se sobrepasa en el 86% de los casos y la proporción del dato más grande (62.0t) respecto al permitido es de 2.75; para PT1 el valor permitido se rebasa en el 75% de los casos y el dato más grande (40.0t) es 2.05 veces mayor que él.

En las figuras 3.15 y 3.16 se presentan los histogramas de los valores que asumen PT2 y PT1 correspondientes a los 1,474 vehículos T3-S2-R4; en ambas se aprecia que las distribuciones son bimodales, como las de los datos de 1996. En la primera se tiene que el 43% de los casos exceden al permitido (36t) y que la proporción del mayor (61.0t) respecto a éste es de 1.69; en la segunda, se tiene que la excedencia es 67% y la proporción del mayor (33.1t) respecto al permitido (19.5t) es 1.70.

Al conjuntar los 10,179 datos de los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4, se obtienen los histogramas de PT2 y PT1 que se muestran en las figuras 3.17 y 3.18. En el primer caso, los valores de PT2 que exceden al permitido más grande de los dos (36t) acumulan 33%, y la proporción del valor mayor (62.0t) con él es 1.72. En el segundo caso, los valores de PT1 que exceden al permitido (19.5t) acumulan el 75%, y la proporción del valor mayor (40.0t) con él es 2.05.

De estos análisis estadísticos de carácter descriptivo, se concluye que las cargas que transmiten a los puentes muchos de los vehículos de la muestra de 1993, al igual que ocurrió con las de 1996, son muy superiores a las permitidas en el RPD. **Esto confirma y reafirma la necesidad de que en México se cuente con una norma de cargas vivas vehiculares para el análisis estructural de los puentes.**

Al igual que con los datos de 1996, con los de 1993 se realizaron análisis de regresión y correlación múltiple entre PT2, PT1 y DE3, como variables aleatorias independientes, y los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos como variables aleatorias dependientes. Estos se llevaron a cabo utilizando, en primer término, las muestras de los vehículos T3-S3 y de los T3-S2-R4 por separado, habiéndose obtenido magníficas correlaciones, semejantes a las logradas con los datos de 1996.

En la siguiente tabla se presentan los coeficientes de correlación múltiple que se obtuvieron al conjuntar los datos de los vehículos T3-S3 con los T3-S2-R4, los cuales resultan sumamente altos:

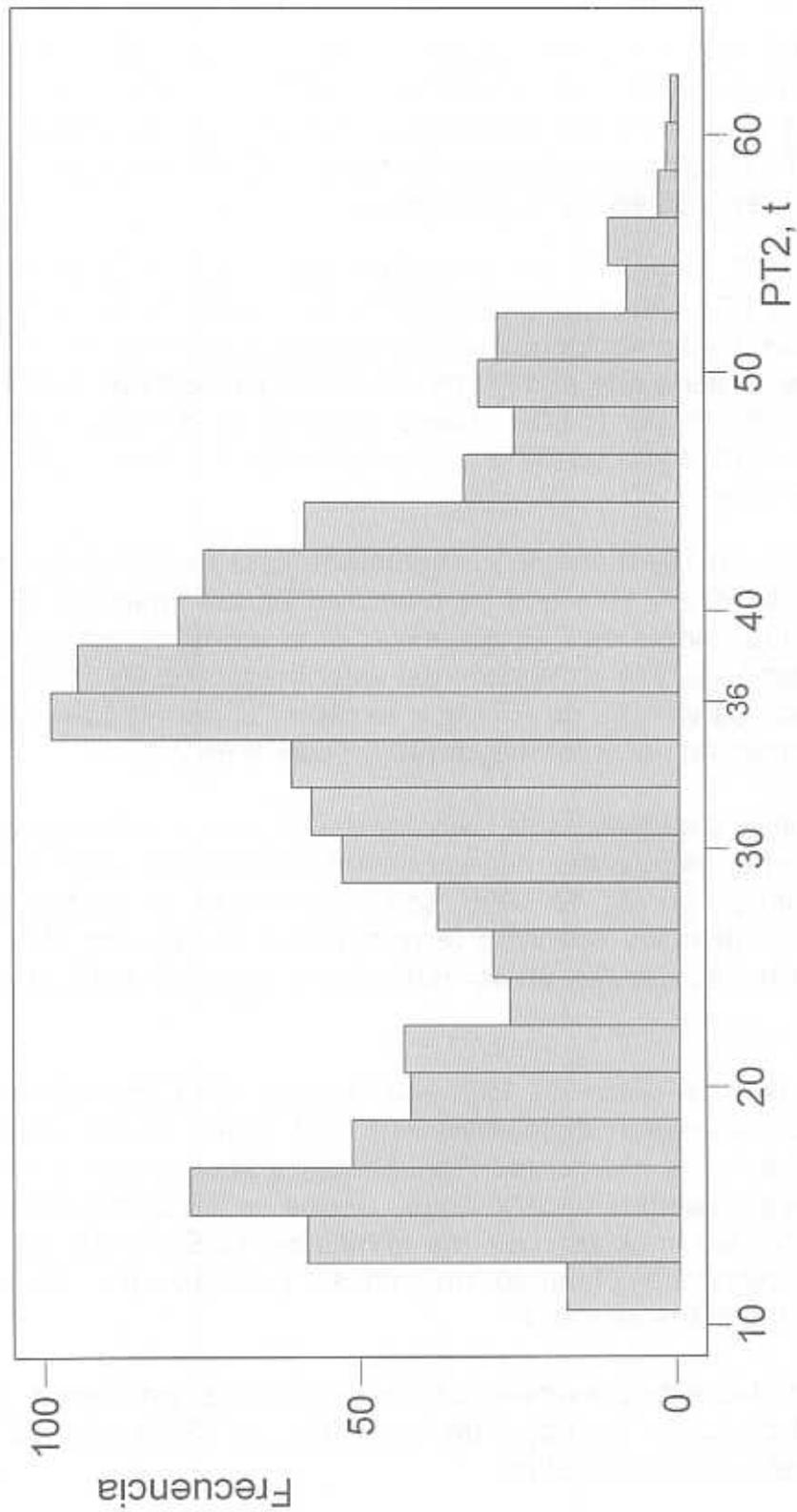


Fig. 3.15 Histograma del peso tándem 2, T3-S2-R4, 1993

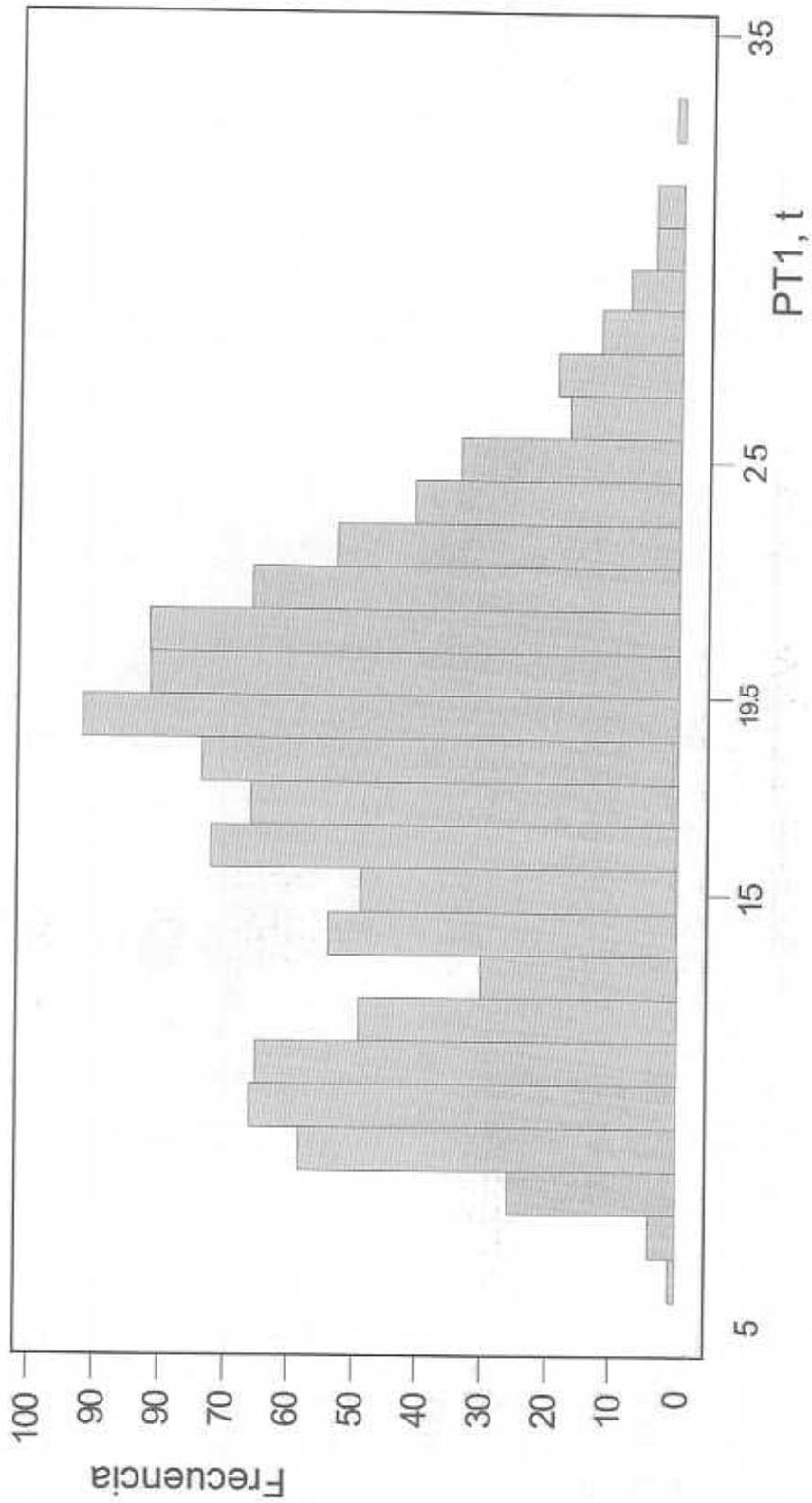


Fig. 3.16 Histograma del peso tándem 1, T3-S2-R4, 1993

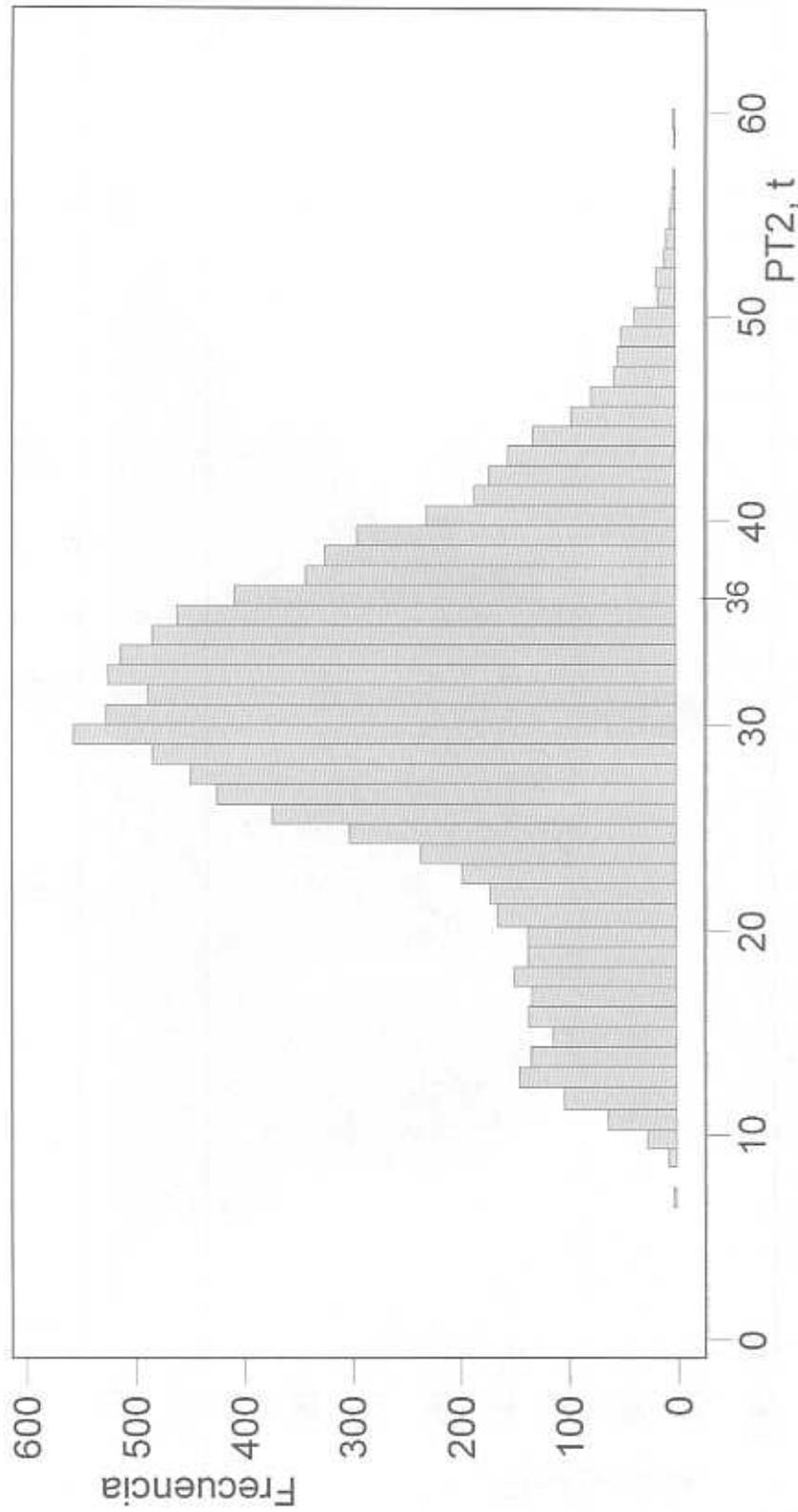


Fig. 3.17 Histograma del peso tándem 2, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993

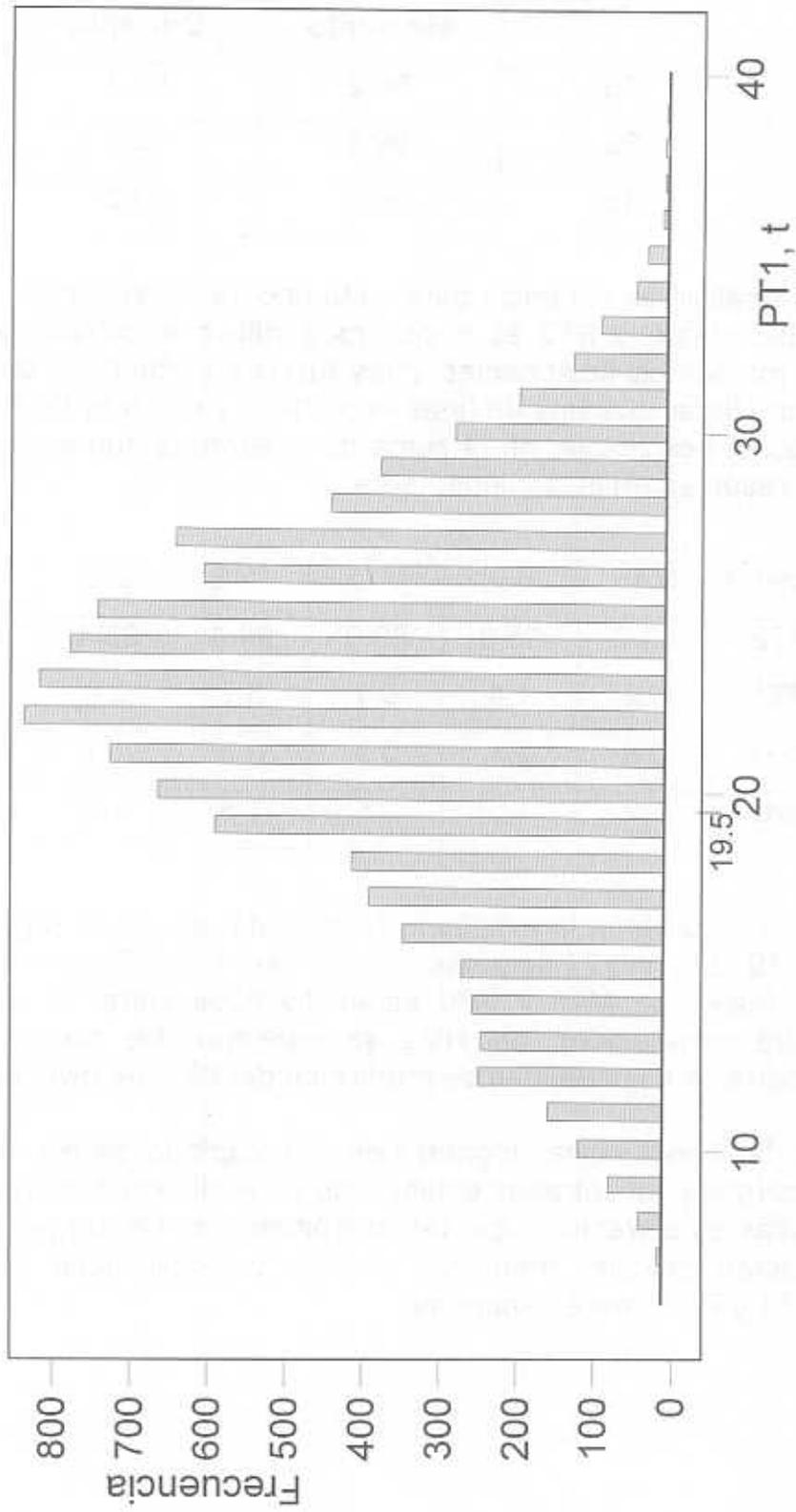


Fig. 3.18 Histograma del peso tándem 1, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993

L	Coeficientes de correlación, %, para	
	Momento	Cortante
15	98.2	98.1
30	99.3	99.3
45	99.9	99.2

Al realizar el análisis de variancia para cada uno de los seis casos, se determinó que la variable aleatoria PT2 es la que más influye al calcular los valores que asumen los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos, en tanto que el segundo lugar lo ocupa en unas veces PT1 y en otras DE3. En efecto, las proporciones, en porcentaje, de la suma de cuadrados que se explica por cada variable se presentan en la siguiente tabla:

Para →	M45	M30	M15	V45	V30	V15
PT2	95.3	95.0	88.0	94.4	93.4	88.3
PT1	1.9	1.4	0.1	3.7	3.9	2.8
DE3	0.6	2.1	8.3	0.3	1.1	5.1
Error	2.2	1.5	3.6	1.6	1.6	3.8

Para ilustrar gráficamente la excelente bondad del ajuste en regresión lineal, en las figuras 3.19, 3.20 y 3.21 se presentan los casos de PT2 con M45, V45 y M15 (los valores reales de M45 y M30 están divididos entre 10; R representa el coeficiente de correlación); en ellas se muestran las rectas ajustadas por mínimos cuadrados y las bandas de predicción del 95% de nivel de confianza.

Con base en las conclusiones logradas en este capítulo, se puede afirmar que el sistema de cargas concentradas establecido en el diseño conceptual del modelo de cargas vivas es correcto, y que las magnitudes de las cargas virtuales CV2 y CV3 se pueden calcular mediante análisis probabilísticos de las variables aleatorias PT1 y PT2, respectivamente.

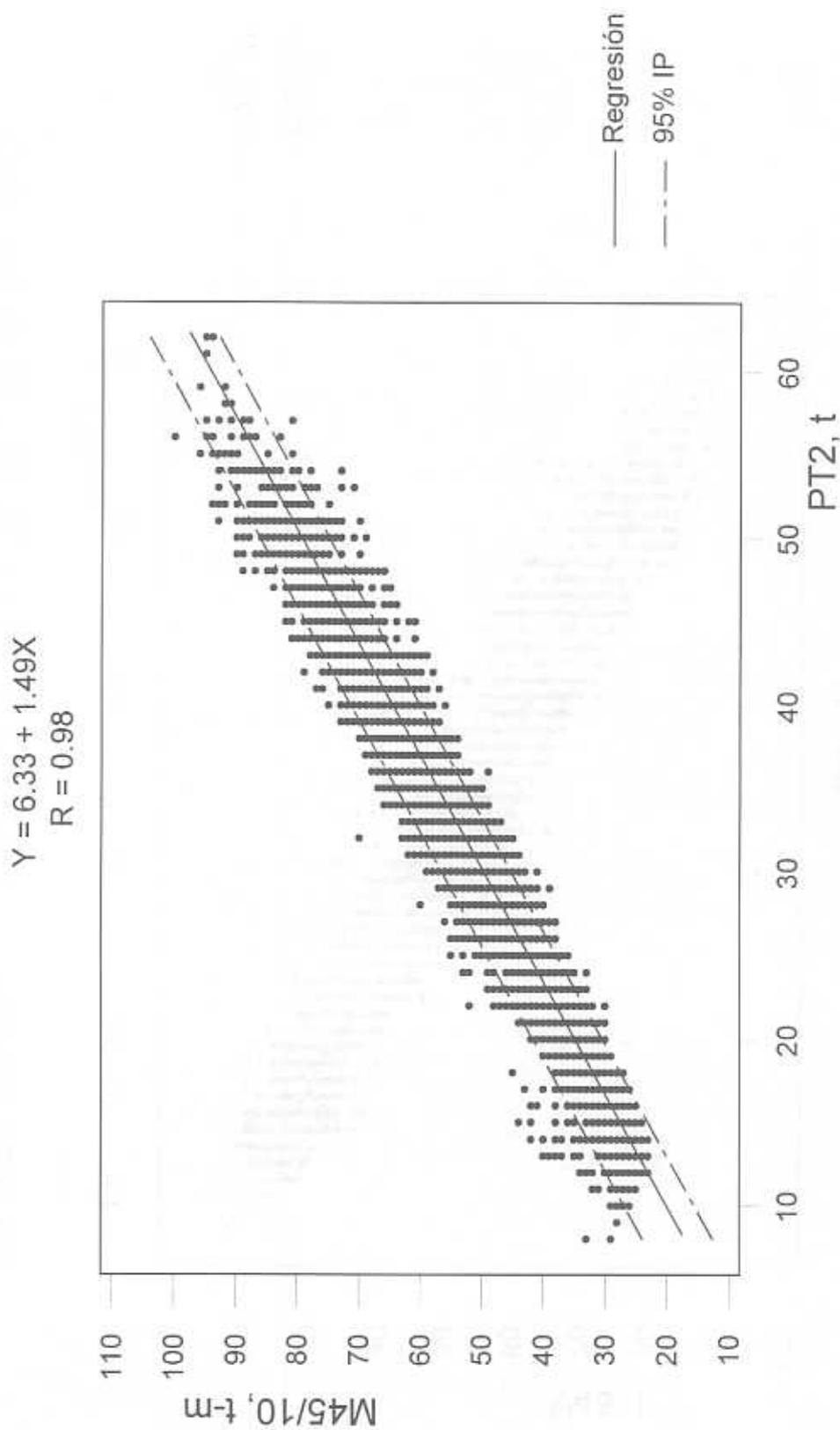


Fig. 3.19 Regresión lineal entre M45 y PT2, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993

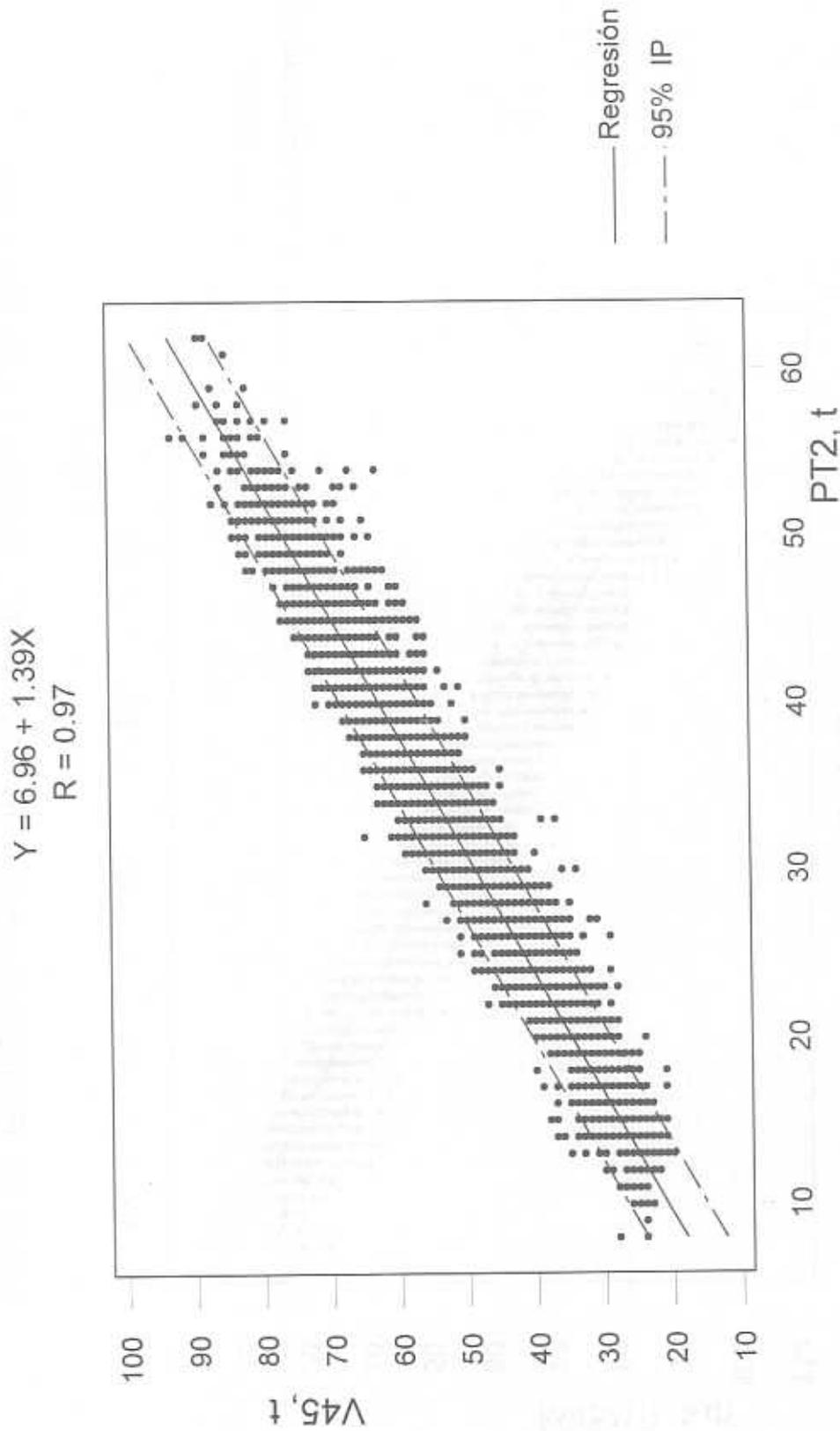


Fig. 3.20 Regresión lineal entre V45 y PT2, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993

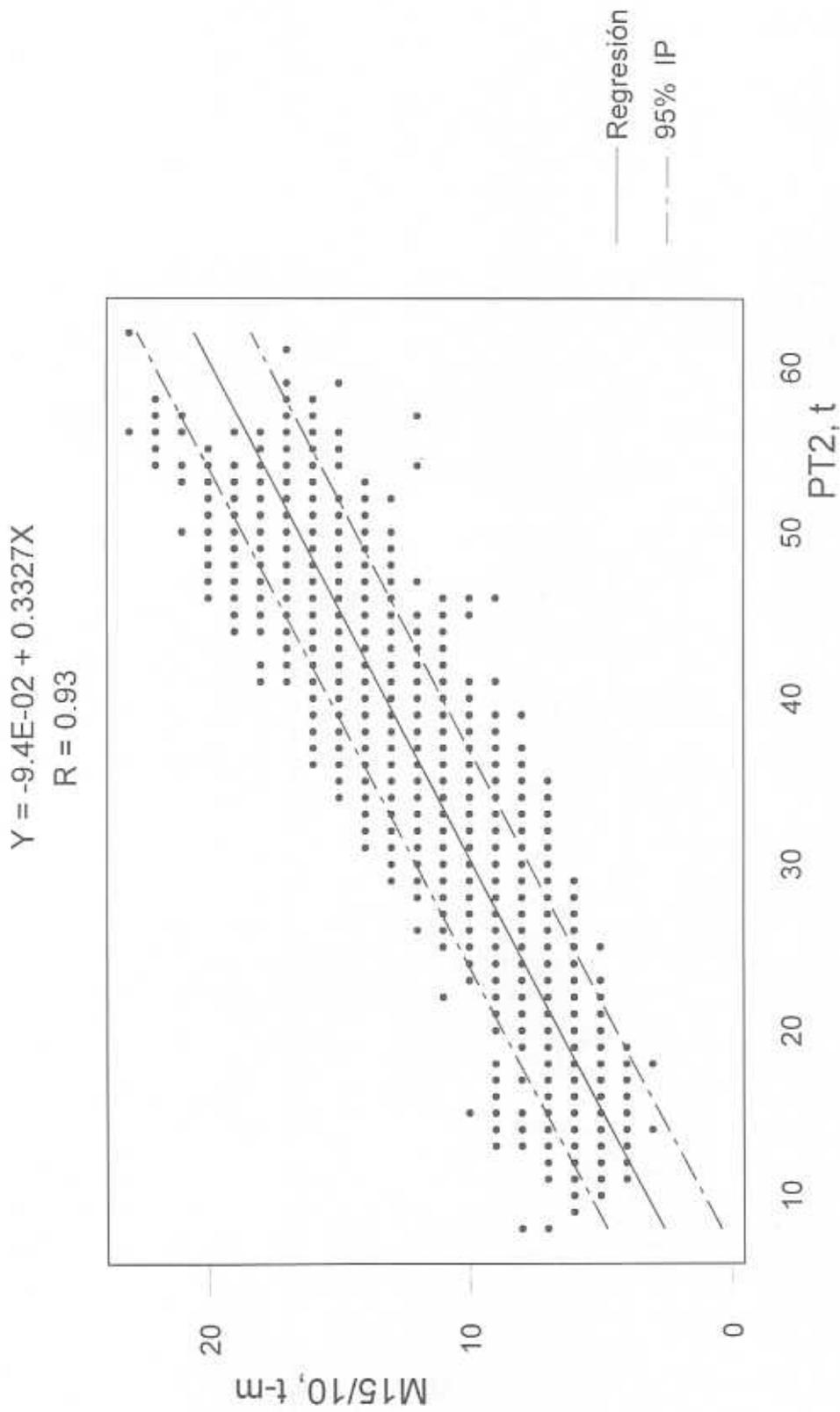


Fig. 3.21 Regresión lineal entre M15 y PT2, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993



4. Análisis estadísticos y de correlación y regresión de las muestras de 1993 y 1996 juntas

Al conjuntar los datos de las muestras de 1993 y 1996 (20,258 vehículos) se realizaron análisis detallados de las variables aleatorias más significativas para el cálculo de los momentos flexionantes y de las fuerzas cortantes, cuyos resultados concuerdan con los obtenidos con cada muestra por separado. A continuación se presentan sólo algunos casos.

En la figura 4.1 se muestra el histograma de los datos de la variable aleatoria PT2; en el eje horizontal se marcaron los máximos permitidos por el RPD para los vehículos T3-S3 (22.5t) y T3-S2-R4 (36t). Al calcular las frecuencias relativas acumuladas, se obtiene que el 25% de las cargas exceden a la mayor de las dos (36t); además, la proporción del valor más grande de los datos (63t) respecto al permitido es de 1.75.

En la figura 4.2 se presentan el histograma asociado a PT1 y el valor máximo permitido en el RPD (19.5t). En este caso la frecuencia de excedencia es 48% y la proporción del dato más grande (40t) respecto al permitido es 2.05.

Con relación a los elementos mecánicos calculados con cada uno de los vehículos de la muestra, en la figura 4.3 se presentan el histograma de M45 y el momento flexionante asociado a las especificaciones de RPD para vehículos T3-S2-R4 (por ser el más grande), que vale 642t. En este caso la frecuencia de excedencia es de 15% y la proporción del dato más grande (1174t) con respecto a él es 1.83. Por otra parte, en la figura 4.4 se presenta la distribución de frecuencias de V45 con la marca del cortante asociado a las especificaciones de RPD (60t). En este caso la frecuencia de excedencia es de 17%, y la proporción del dato más grande (108t) con respecto a él es de 1.8.

Estos resultados reafirman que las cargas especificadas en el RPD no son aptas para el análisis estructural de puentes y que es necesario que se formule una norma al respecto, lo cual, como ya se dijo, es el propósito principal de este trabajo de investigación.

Para confirmar también la magnífica correlación estadística que existe entre las variables aleatorias PT2 y PT1 con las variables aleatorias "momentos flexionantes máximos" (M45, M30 y M15) y "fuerzas cortantes máximas" (V45, V30 y V15), que ocasionan los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4 de 1993 y 1996 integrados en una sola muestra, se realizaron los análisis de regresión y correlación múltiples.

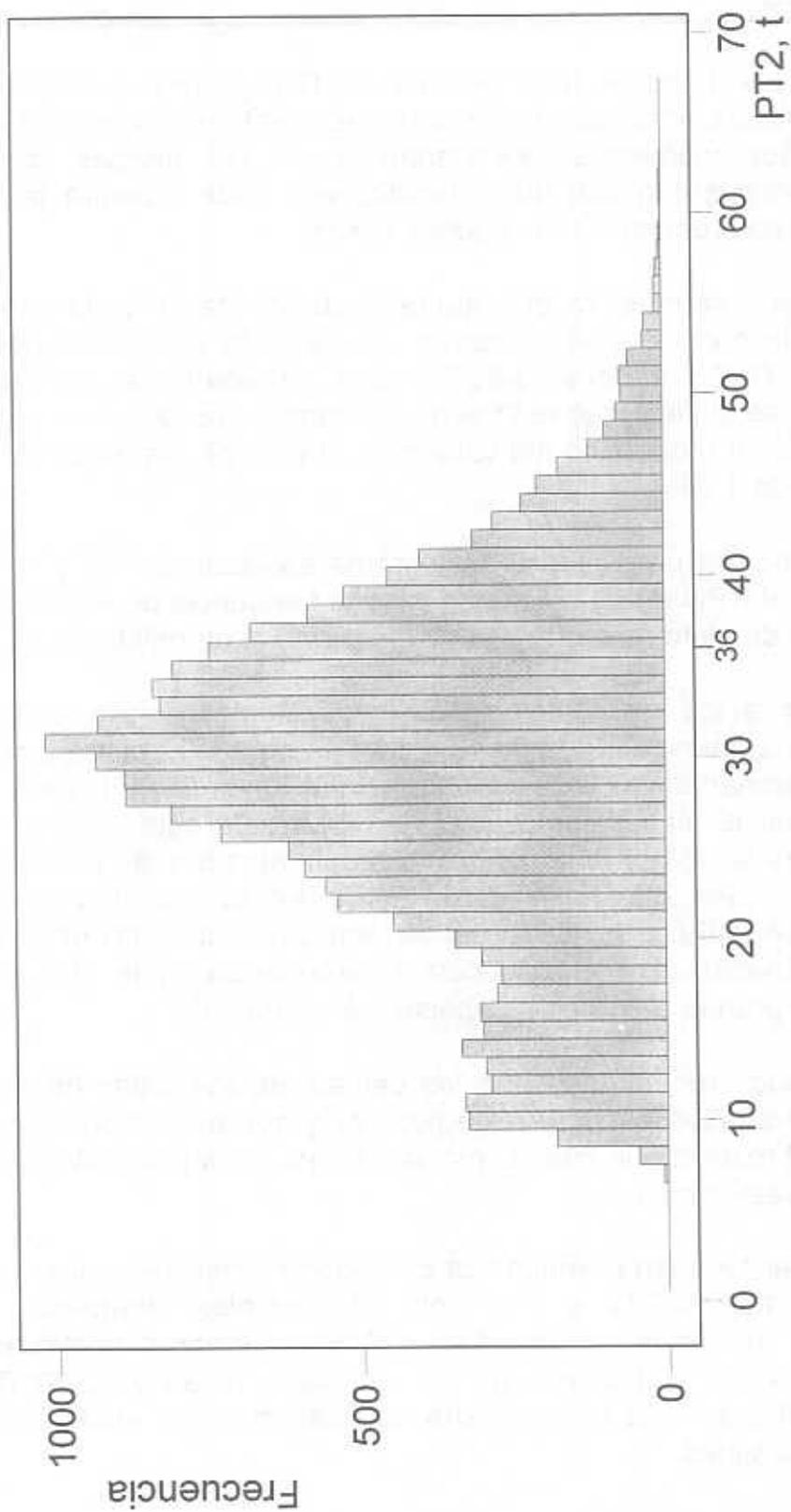


Fig. 4.1 Histograma del peso del tándem 2, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993 y 1996

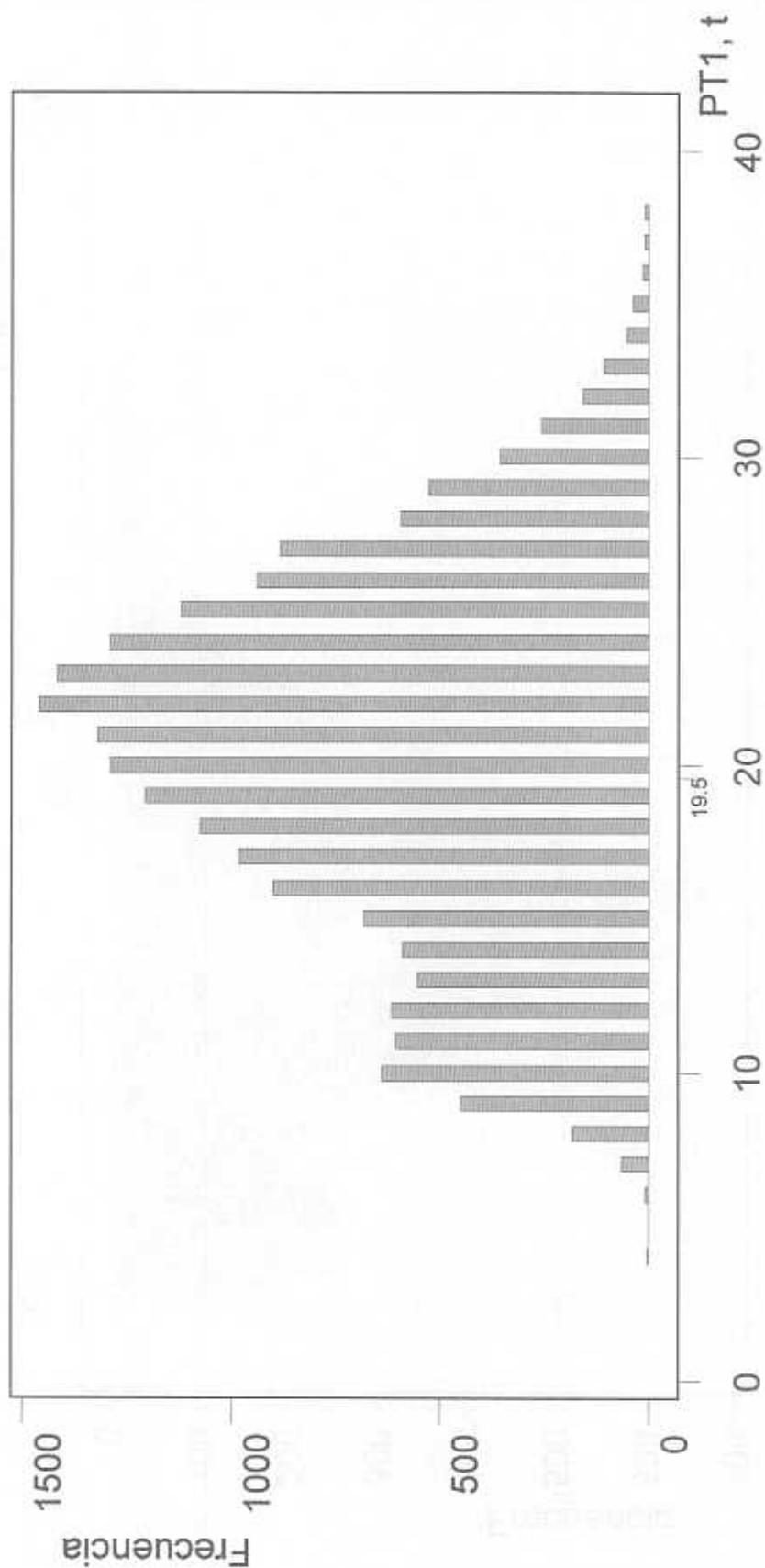


Fig. 4.2 Histograma del peso del tándem 1, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993 Y 1996

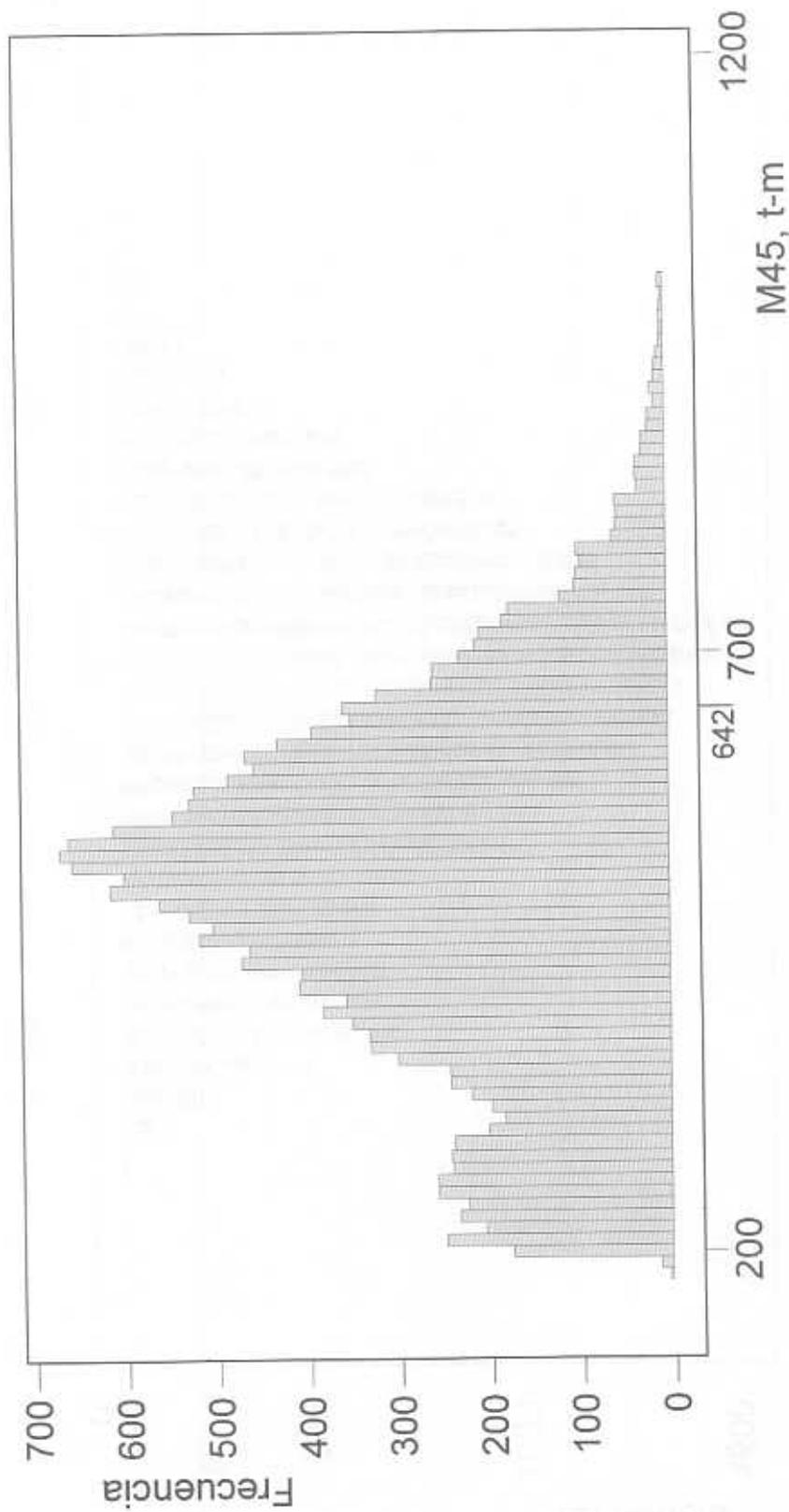


Fig. 4.3 Histograma de M45, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993 y 1996

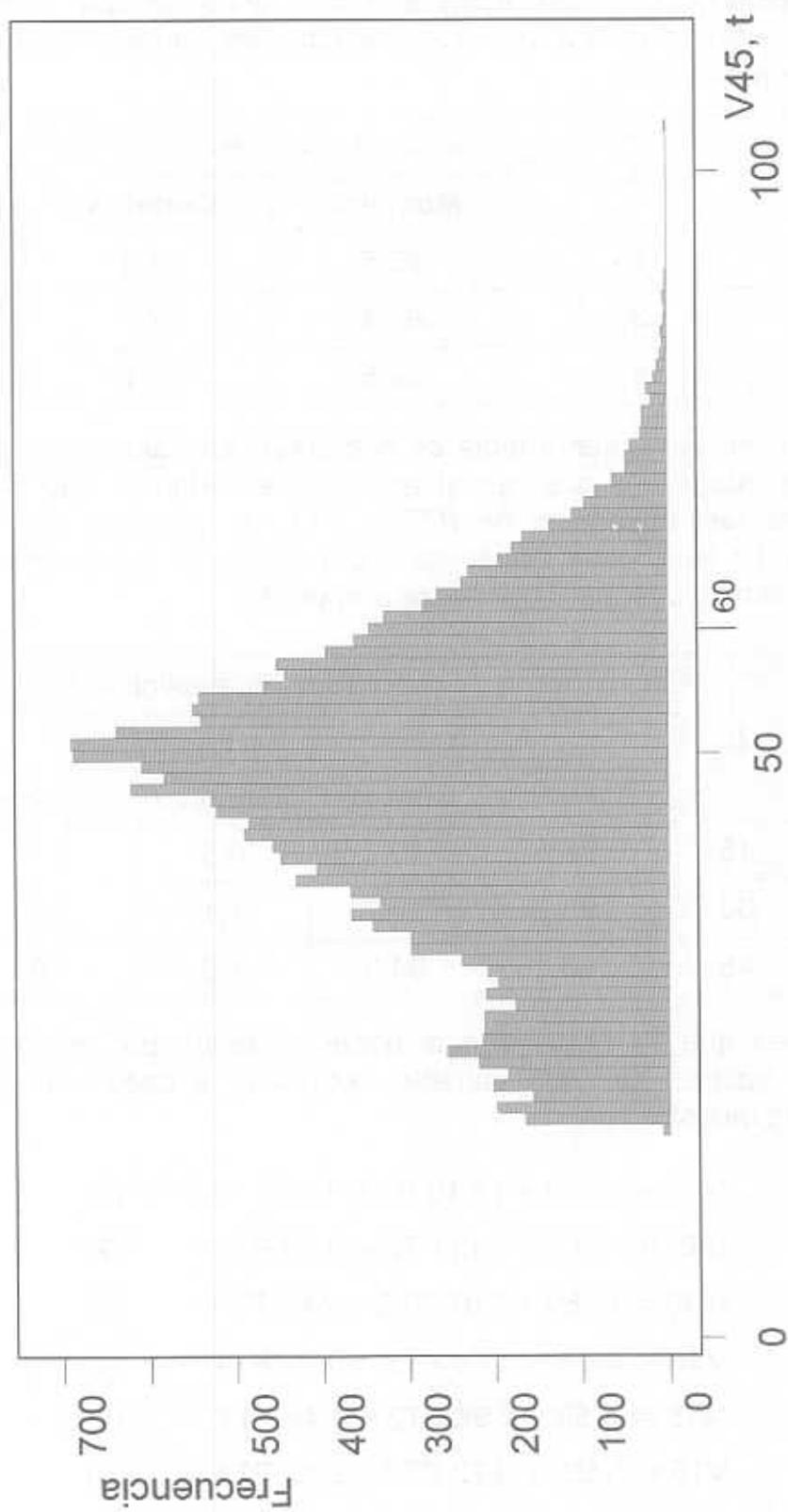


Fig. 4.4 Histograma de V45, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993 y 1996

En la siguiente tabla se presentan los coeficientes de correlación múltiple que se calcularon, observándose que éstos son muy altos, lo cual confirma que las variables PT2 y PT1 tienen gran influencia sobre las variables que representan a los elementos mecánicos:

L	Coeficientes de correlación, %, para	
	Momento	Cortante
15	95.5	88.3
30	98.4	97.7
45	98.5	98.1

Por otra parte, en la siguiente tabla se presentan los valores, en porcentaje, de las sumas de cuadrados que, en el análisis de variancia que se realizó, son explicadas por las influencias de PT2 y PT1. Al observar los resultados se aprecia que PT2 tiene gran influencia sobre todos los elementos mecánicos y que PT1 también influye, pero en menor proporción.

L	Suma de cuadrados, %, explicado por			
	PT2		PT1	
	Momento	Cortante	Momento	Cortante
15	90.9	70.7	0.3	2.1
30	95.8	92.7	1.1	2.8
45	96.1	94.3	1.0	1.9

Las ecuaciones que se obtuvieron al hacer el ajuste por mínimos cuadrados utilizando los valores de cada variable asociados a cada uno de los 20,258 vehículos de la muestra son:

$$M_{45} = 32.20 + 13.10 PT2 + 4.05 PT1 \quad (1)$$

$$V_{45} = 4.11 + 1.13 PT2 + 0.52 PT1 \quad (2)$$

$$M_{30} = 10.80 + 7.81 PT2 + 2.61 PT1 \quad (3)$$

$$V_{30} = 3.01 + 1.00 PT2 + 0.59 PT1 \quad (4)$$

$$M_{15} = 1.58 + 2.98 PT2 + 0.44 PT1 \quad (5)$$

$$V_{15} = 5.93 + 0.72 PT2 + 0.42 PT1 \quad (6)$$

Para tener una apreciación mayor del alto grado de correlación lineal que existe entre las variables aleatorias antes señaladas, en la figura 4.5 se muestran la recta de regresión que se obtuvo entre PT2 y M45, y la banda de predicción correspondiente al 95% de nivel de confianza, pudiéndose verificar en ella el magnífico ajuste que se tiene.

Todos estos resultados confirman que la topología escogida para el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas es correcta, ya que los valores de CV2 y CV3 corresponden a las variables aleatorias PT1 y PT2, respectivamente, y d_2 a la variable aleatoria DE3. En el capítulo 6 se calculan dichos valores, así como los de CV1 y d_1 , mediante diversos análisis probabilísticos de riesgos, procurando que en la toma de decisiones correspondiente puedan asegurar un alto nivel de seguridad estructural de los puentes en México.

Vale la pena señalar que el modelo que resulta en este trabajo es estrictamente aplicable a puentes que se ubiquen en carreteras tipos A, B y C, y que con él se sobrestiman los elementos mecánicos en puentes de carreteras alimentadoras (tipo D, referencia 9), ya que en ellas no se permite la circulación de vehículos articulados, como los T3-S3 y T3-S2-R4, con base en los cuales se determinan aquí las cargas virtuales y sus separaciones. El desarrollo del modelo de cargas vehiculares adecuado para ese tipo de caminos, es motivo de otro trabajo que está en proceso (referencia 10).

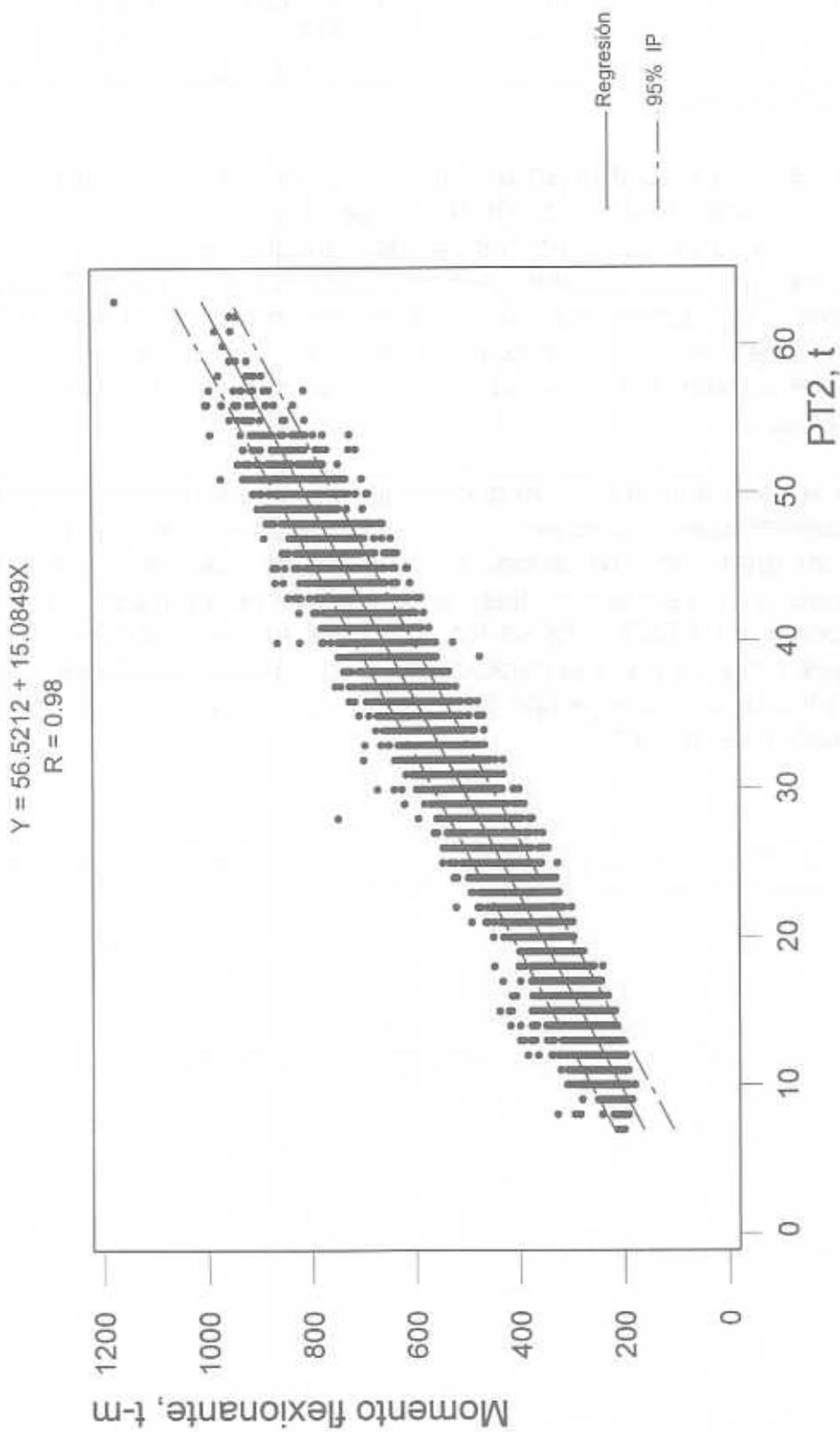


Fig. 4.5 Regresión lineal entre M45 y PT2, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993 y 1996

5. Análisis comparativo con reglamentos para diseño de puentes

Con el fin de comparar los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes más grandes obtenidos en esta investigación con base en las muestras, con los que resultan de aplicar los modelos de cargas vivas que se establecen en los reglamentos que norman las cargas vivas vehiculares de diseño de puentes en otros países, se elaboraron las figuras 5.1 y 5.2 con los resultados obtenidos. El modelo HL-94 corresponde al nuevo reglamento de la AASHTO, el OHBDC al canadiense de Ontario y el EUROCODIGO al que rige (o regirá) en la Comunidad Europea; los identificados como MUESTRA corresponden a la envolvente de los más grandes de los calculados con datos de todos los vehículos que integran las muestras de 1993 y 1996.

Todos los elementos mecánicos que se muestran en las dos figuras no incluyen factores de carga ni de impacto.

En el caso de los momentos (figura 5.1), se aprecia que los valores de la muestra son mayores que los correspondientes a los tres reglamentos: con respecto al Eurocódigo, los excedentes van de 9%, en claros de 15m, al 16% en claros de 45m; con respecto al AASHTO y al OHBDC, que son muy parecidos entre sí, las diferencias son bastante mayores y van del 17%, en claros de 15m, al 74%, en claros de 45m.

En el caso de las fuerzas cortantes (figura 5.2), los valores de la muestra son también mayores que los de los tres reglamentos analizados; con respecto al Eurocódigo los excedentes van de 20% en claros de 45m, a 42% en claros de 15m; con respecto a los otros dos, que tienen valores parecidos entre sí, las diferencias son bastante mayores y van del 75% en claros de 45m, al 107.5% en claros de 15m.

De los dos párrafos anteriores, se concluye que ninguno de los modelos de cargas vivas de los tres reglamentos analizados, cubre satisfactoriamente la realidad de las cargas que transportan los vehículos pesados que circulan por la red nacional de carreteras, por lo cual no es aconsejable su aplicación y es muy importante que se genere un modelo de cargas vivas vehiculares que sí lo haga. La formulación del mismo es el objetivo principal de este trabajo de investigación, y constituye una propuesta para que se considere como norma o, al menos, como recomendación para que se utilice en México.

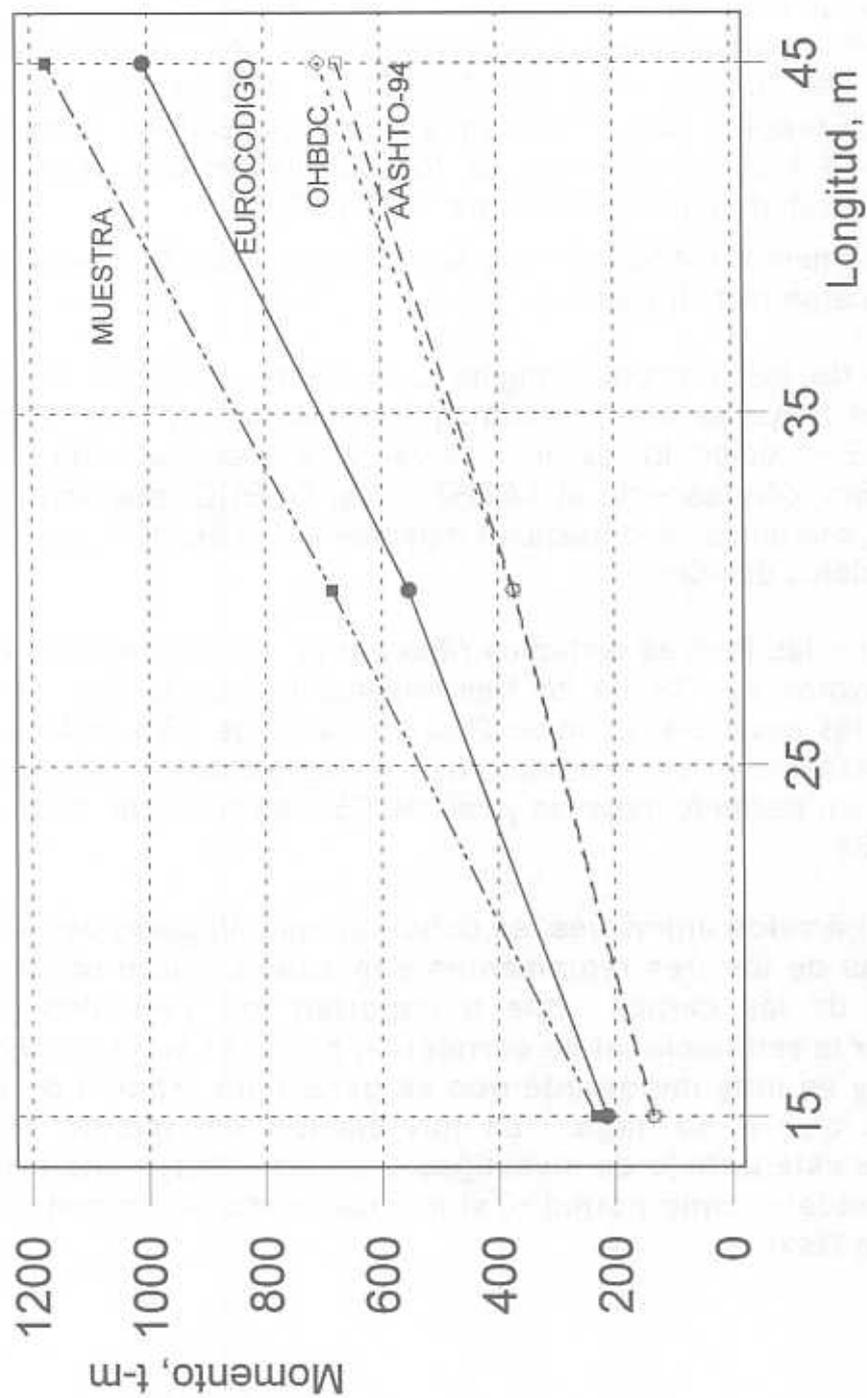


Fig. 5.1 Momentos más grandes. Comparación con reglamentos

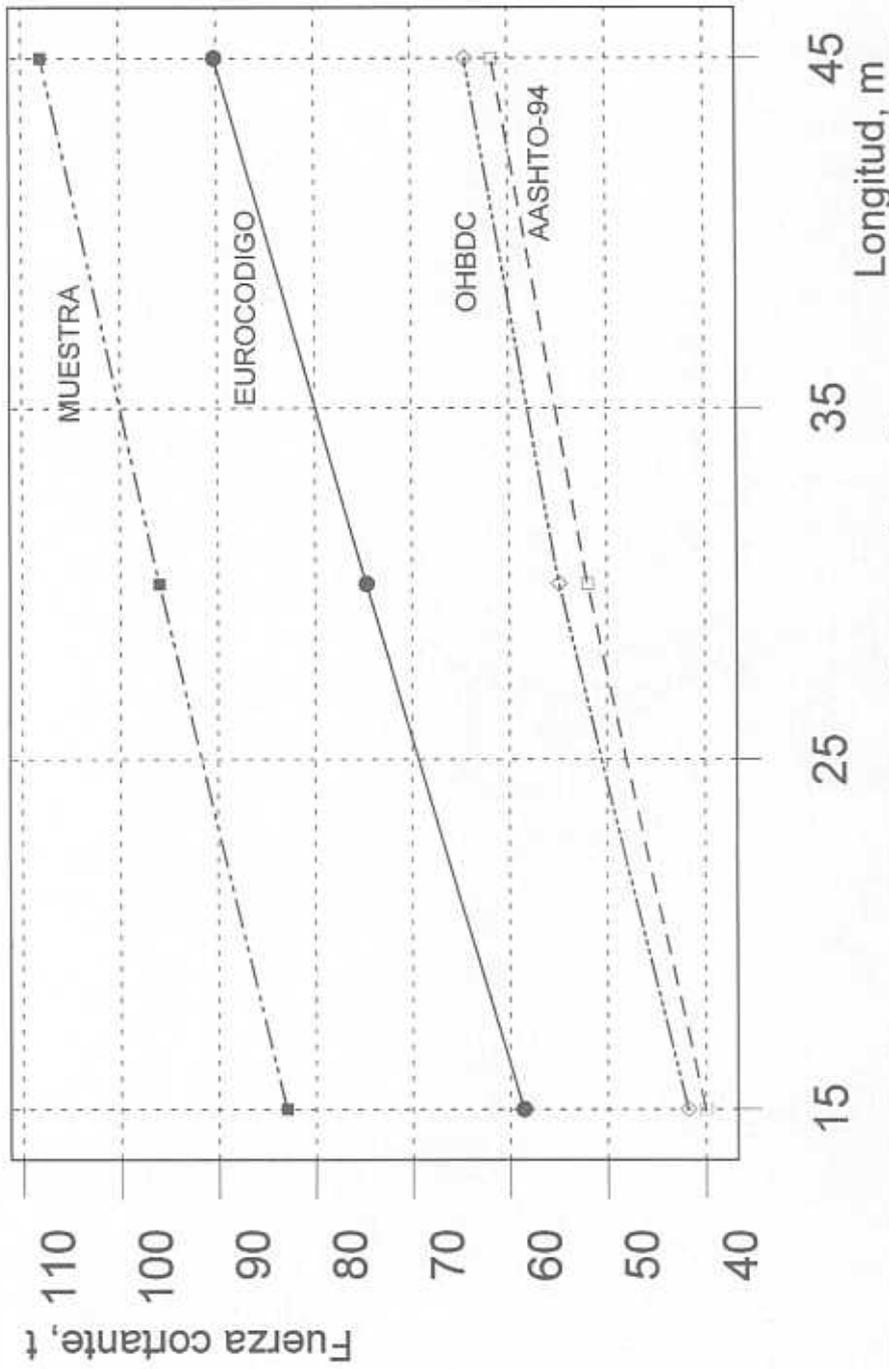


Fig. 5.2 Fuerzas cortantes más grandes. Comparación con reglamentos

6. Desarrollo cuantitativo del modelo de cargas vivas vehiculares

Tomando en cuenta los resultados y conclusiones de los análisis estadísticos realizados en los capítulos anteriores, se establece que el diseño conceptual del modelo de cargas vivas vehiculares que se realizó en el capítulo 1 es adecuado, el cual tiene dos sistemas de cargas:

El primero se conforma con tres cargas concentradas con diferentes magnitudes y separaciones entre sí; el segundo tiene una carga uniformemente distribuida que se aplica a lo largo del carril de circulación, el cual se asume de 3.0m de ancho.

El sistema de tres cargas concentradas representa a un “vehículo virtual” (no existe), que ocasiona elementos mecánicos máximos equivalentes a los que producirían los vehículos reales, con una **pequeñísima probabilidad** de ser excedidos en el lapso de vida útil de un puente, el cual se toma aquí de **50 años**. Por su parte, el sistema de carga uniformemente distribuida ocasiona elementos mecánicos que, **sumados** a los del vehículo virtual, corresponden a una secuencia de vehículos pesados que puede circular, con baja probabilidad, a lo largo de un puente.

Las magnitudes de todas las cargas virtuales se determinan realizando diversos **análisis probabilísticos de riesgos de excedencia**, que se presentan en este capítulo, de manera que al aplicarse para diseñar o revisar un puente, se logre un **alto nivel de seguridad estructural**. Las separaciones entre ellas se proponen mediante ajustes estadísticos.

El primer sistema se formula con sólo tres cargas, no únicamente por razones de simplicidad sino, primordialmente, porque se **demostró** en los capítulos anteriores que las cargas de los dos grupos de ejes que transfieren las cargas más altas a los puentes se pueden representar por sus resultantes, que se denominaron PT1 y PT2, toda vez que los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos que producen los vehículos reales T3-S3 y T3-S2-R4 están fuertemente correlacionados con las magnitudes de PT1 y PT2. La tercer carga representa al peso del eje delantero del vehículo virtual, PED.

6.1 Metodología para integrar cuantitativamente el modelo de cargas vivas

Con el fin de determinar qué valores asignarles a cada una de las variables aleatorias que participan en el modelo de cargas vivas y quede definido éste en términos cuantitativos, como parte de esta investigación se ideó la siguiente metodología:

1. Determinar las leyes de probabilidades que pueden representar adecuadamente el carácter aleatorio de las variables PT1, PT2 y PED que intervienen en el modelo, con el fin de poder realizar los análisis probabilísticos de riesgos.
2. Con base en las leyes de probabilidades que se asignen, determinar los valores que corresponden a PED, PT1 y PT2, de manera que éstos sólo sean rebasados en un periodo de 50 años con una probabilidad muy baja, es decir, que el riesgo sea muy pequeño. Los resultados que así se obtengan serán los valores de las **cargas virtuales** que integren el modelo de cargas vivas, las cuales se denotan como CV1, CV2 y CV3, respectivamente.
3. Asignar, con base en los resultados estadísticos, los dos valores de las separaciones que se propongan entre las cargas.
4. Con el fin de valorar el modelo, 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).
5. Determinar los valores de dichas variables que corresponden a una probabilidad pequeña de que **sean excedidos en un periodo de 50 años**. Esta probabilidad es igual a la que se utilice para calcular a CV2 y CV3.
6. Comparar estos valores con los que resultan de calcularlos usando las ecuaciones de las respectivas regresiones múltiples.
7. Aplicar el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas y validar los resultados, comparándolos con los determinados en los puntos 5 y 6. En caso necesario, hacer ajustes al modelo.
8. Calcular el **factor de carga viva vehicular básico** y generar el **sistema de cargas concentradas nominales** del modelo, en congruencia con el peso bruto máximo establecido en el RPD.
9. Calcular la magnitud de la **carga virtual uniformemente repartida**, que constituye el segundo sistema de cargas del modelo.
10. Validar exhaustivamente el modelo completo de cargas vivas vehiculares.

6.2 Determinación de la ley de probabilidades de PT1

Con el propósito de encontrar una distribución de probabilidades que modele razonablemente el comportamiento aleatorio de la variable PT1, se hicieron intentos de ajuste de varias leyes de probabilidades a las frecuencias relativas acumuladas de los datos de PT1; se intentaron la normal, la log-normal y la de Weibull, habiendo resultado esta última como la mejor.

La ecuación de la distribución de Weibull asociada a la variable aleatoria x es:

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

donde α y β son parámetros. Se puede demostrar (referencia 8), 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 $\ln(1/(1-F(x)))$.

Por tanto, si la secuencia de puntos que define a una distribución de frecuencias relativas acumuladas 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 α y β . 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 conocen dichas probabilidades, con $F(x)$ o $G(x)$ se puede calcular el valor de x (percentil) que les corresponde.

En las figuras 6.1 a 6.3 se muestran, en el sistema de ejes mencionado, los ajustes de la distribución de probabilidades acumuladas de Weibull (líneas rectas), a la distribución de frecuencias relativas acumuladas (secuencias de puntos), de los datos de PT1, correspondientes a los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4 por separado y a ambos tipos juntos, de la muestra de 1996. Al comparar la cercanía de cada recta que resultó del ajuste por mínimos cuadrados, con la secuencia de puntos de cada muestra, se nota que en valores pequeños de PT1 el ajuste es malo, pero se va mejorando sustancialmente conforme éstos crecen, llegando a ser muy bueno en los valores medianos a grandes, que son los de interés para los fines del diseño estructural de los puentes.

Por tanto, la distribución de probabilidades de Weibull se considera adecuada **para realizar el análisis probabilístico de los riesgos de excedencia** y seleccionar, en consecuencia, el valor adecuado de PT1 que se utilice en el modelo de cargas vivas que se está desarrollando; es decir, para calcular a CV2.

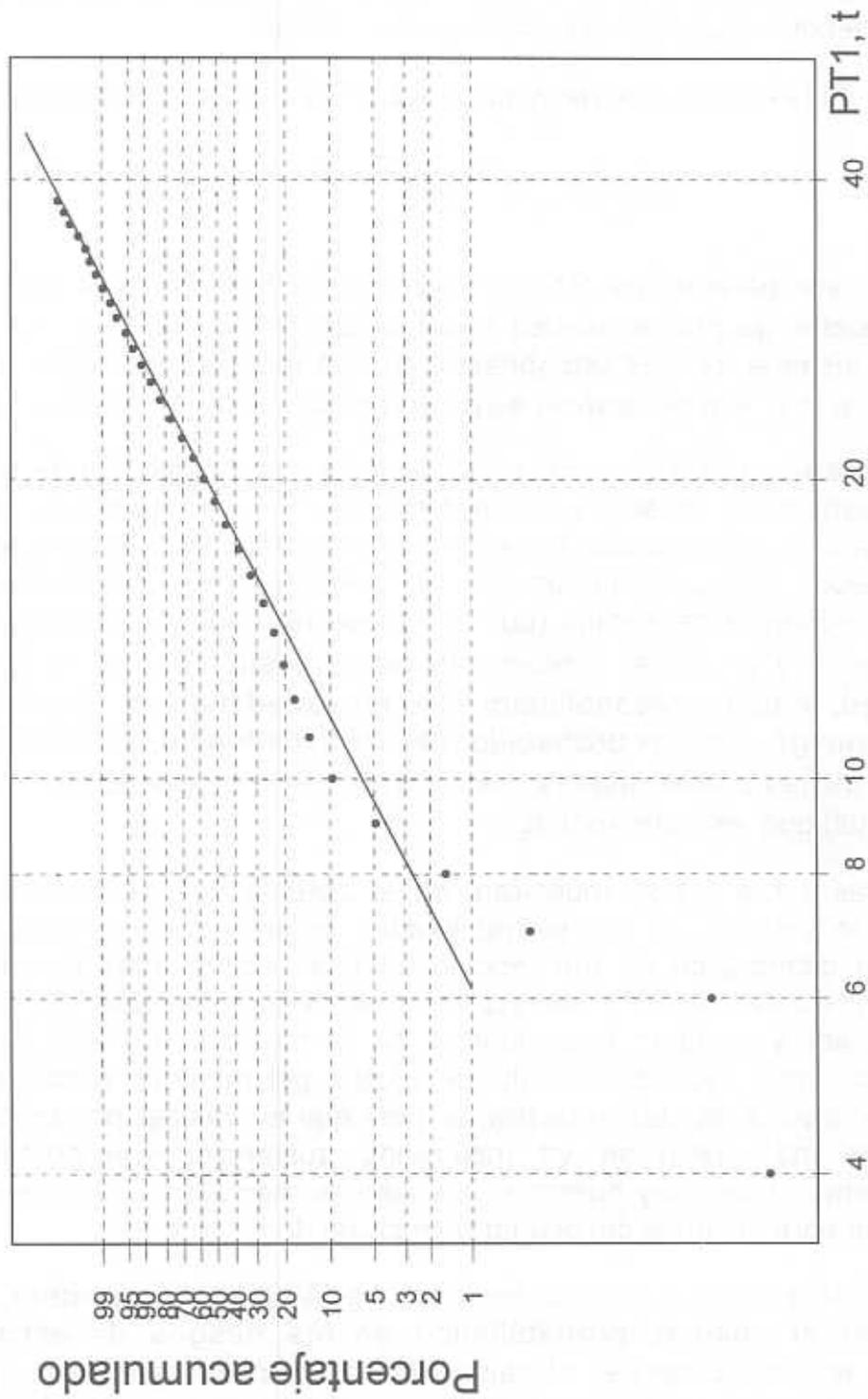


Fig. 6.1 Distribución de Weibull para PT1, T3-S3, 1996

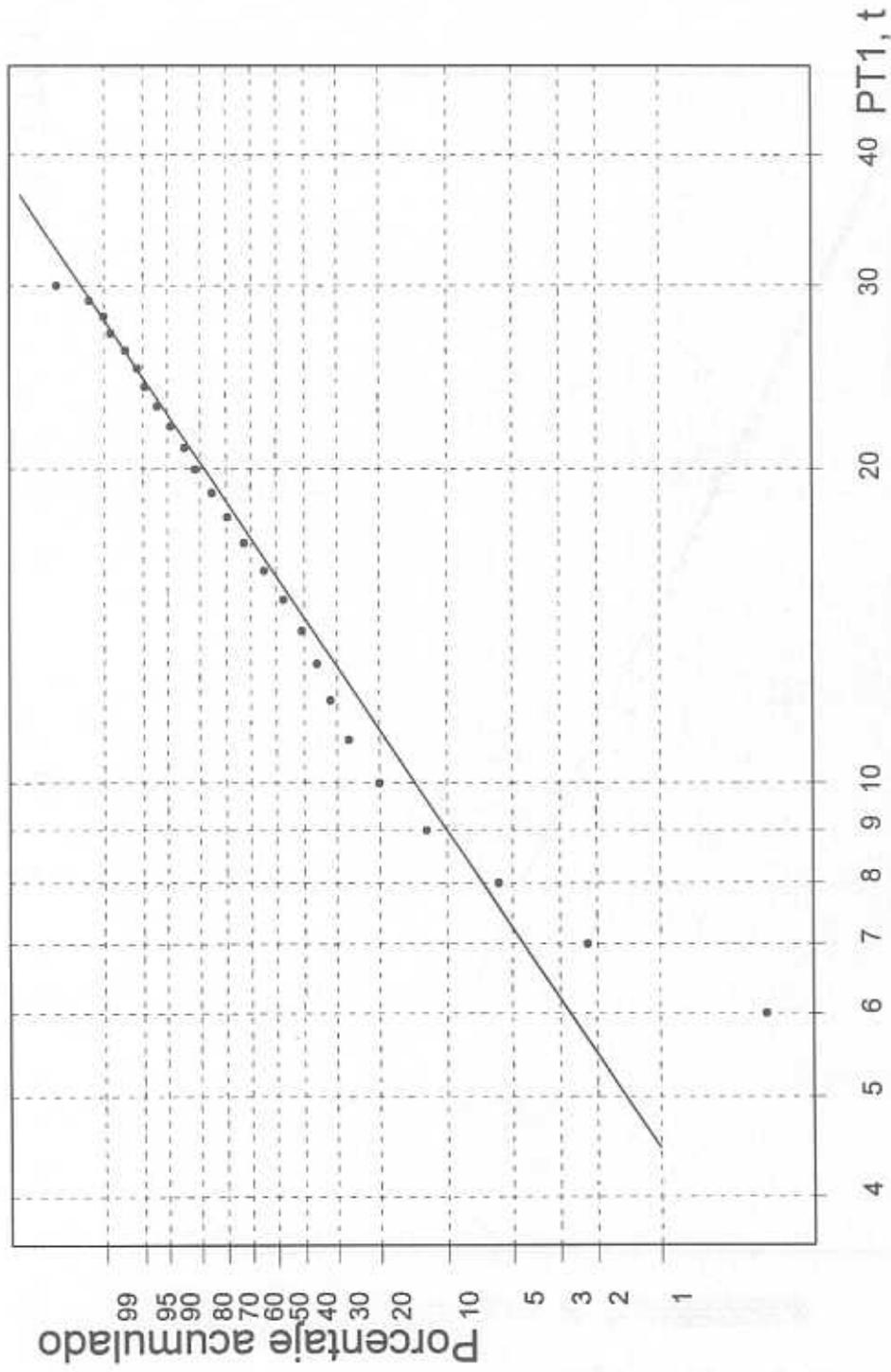


Fig. 6.2 Distribución de Weibull para PT1, T3-S2-R4, 1996

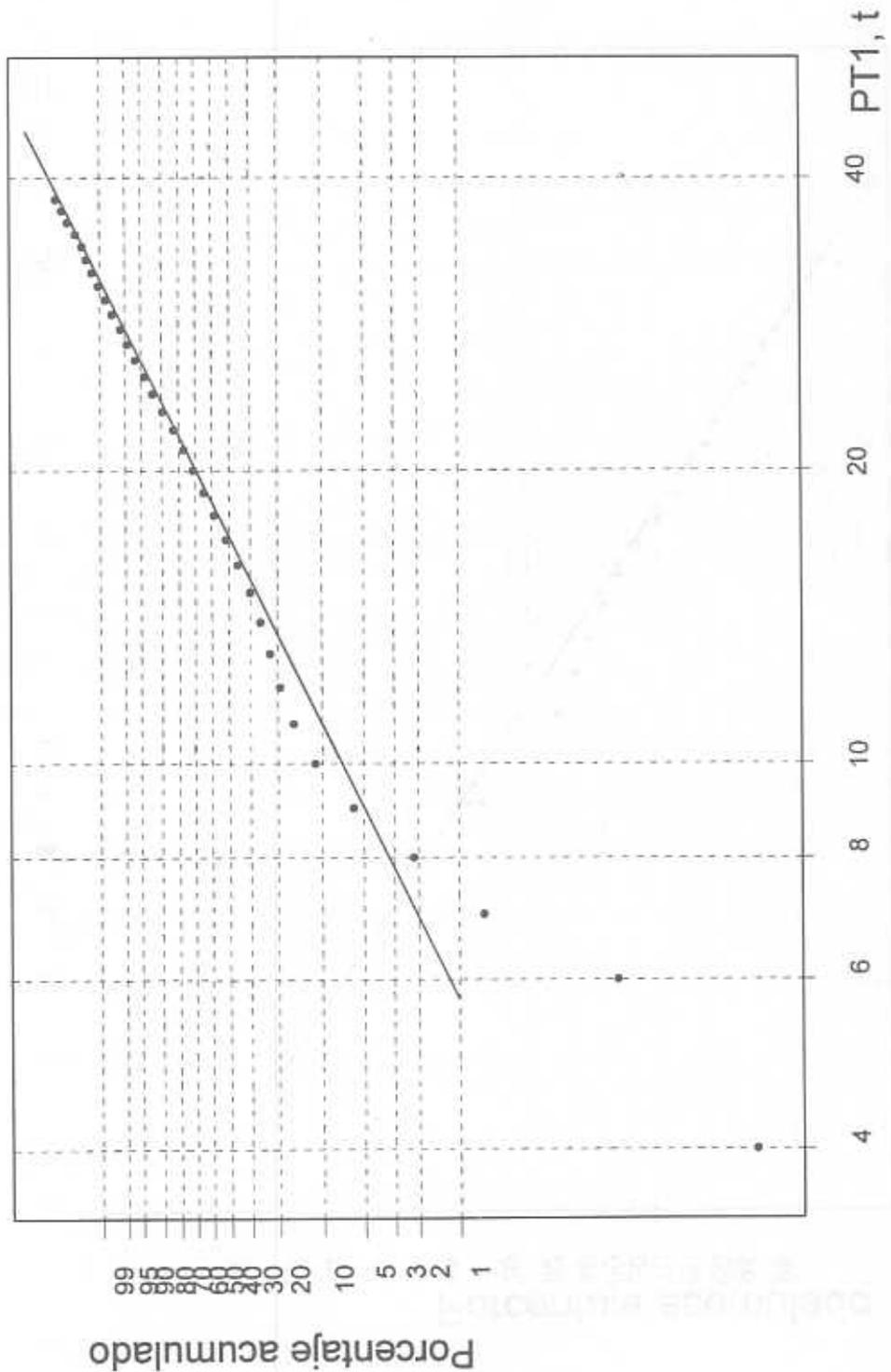


Fig. 6.3 Distribución de Weibull para PT1, T3-S3 y T3-S2-R4, 1996

6.3 Cálculo del valor de la carga virtual CV2

Para calcular el valor de CV2 que se proponga para el modelo de cargas vivas, se hicieron análisis con las distintas muestras para evaluar el grado de congruencia de los resultados de cada una.

En primer lugar, al utilizar la muestra de 1996, se parte del hecho de que la duración del proceso de medición y pesaje fue de 45 días, y que en ese lapso se observaron 8,605 vehículos T3-S3 y 1,474 vehículos T3-S2-R4 con algún nivel de carga (no vacíos); el total fue 10,079. Suponiendo que se mantiene a lo largo del tiempo el mismo número promedio de vehículos por día, en un lapso de 50 años pasarían 3,489,805 vehículos T3-S3, 597,789 T3-S2-R4 y 4,087,594 de ambos.

Las probabilidades estimadas, p , de que en 50 años se exceda el valor más grande CV2, que resultaría en cada muestra en un tiempo T de 50 años, son los recíprocos de esas cantidades, los cuales se presentan en la siguiente tabla, junto con sus probabilidades complementarias o de no excedencia, q , es decir,

$$p = \text{Prob}(PT1 > CV2 \mid T = 50 \text{ años}) = 1/n$$

Tipo	p	$q = 1-p$	CV2,t
T3-S3	2.86×10^{-7}	0.999999714	43.7
T3-S2-R4	1.672×10^{-6}	0.999998328	38.5
Ambos tipos	2.44×10^{-7}	0.999999756	43.9

Para conocer los valores de $PT1$ que corresponden a las probabilidades antes determinadas, se calculan los percentiles (las cargas) correspondientes, CV2, con las funciones de confiabilidad de Weibull de cada caso. Los resultados se muestran en la tabla anterior, notándose que el primero y el tercero se parecen mucho y que el segundo es un poco menor.

Por otra parte, al hacer un análisis semejante utilizando las muestras de 1993 de los vehículos T3-S3 y T3-S2-R4 integradas en una sola, se obtuvo la distribución de probabilidades de Weibull representada por la recta que se ajusta a los datos en la figura 6.4, notándose también que el ajuste logrado es bastante bueno en el segmento de valores medianos a grandes (del percentil 20 en adelante).

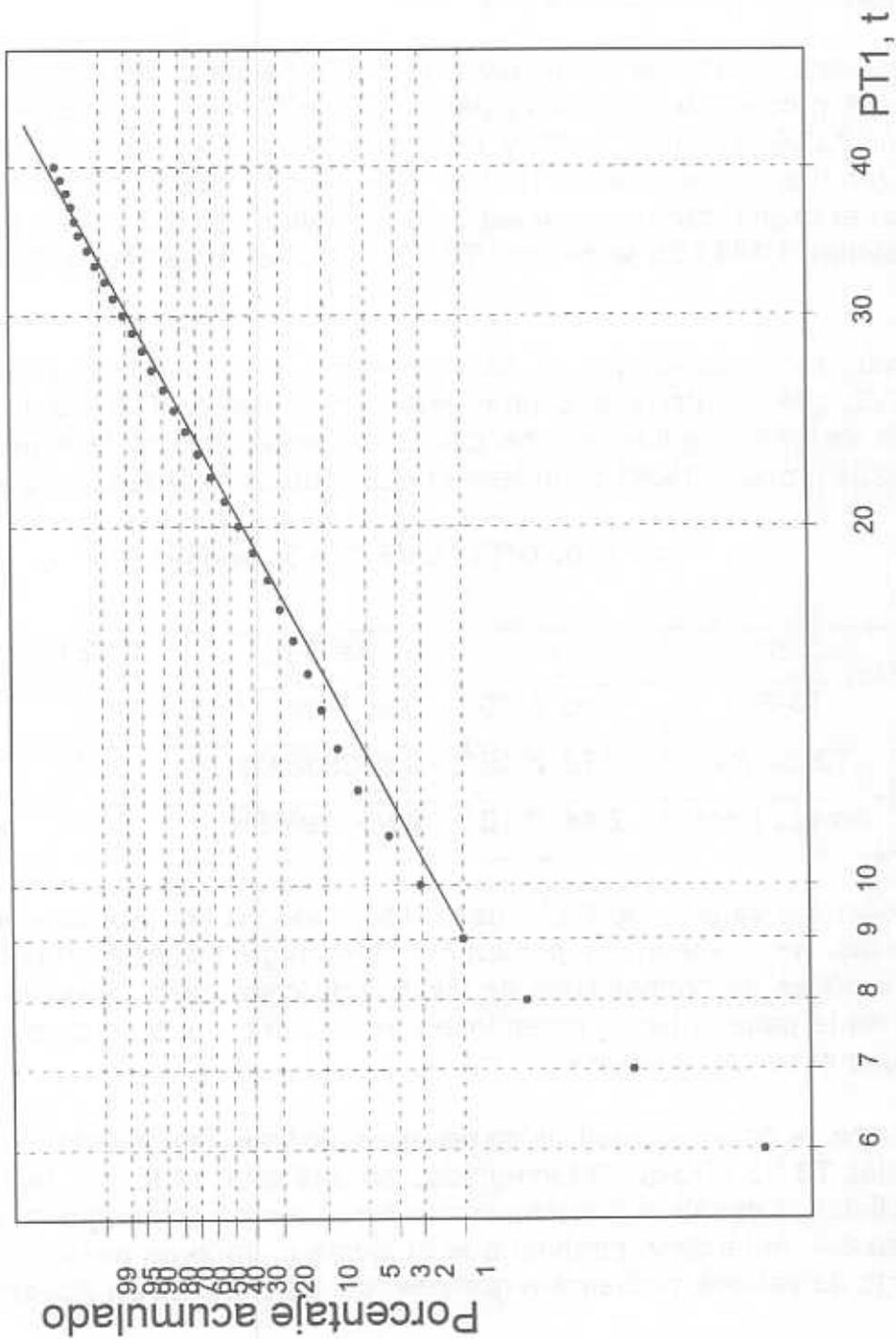


Fig. 6.4 Distribución de Weibull para PT1, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993

Tomando en cuenta que en 1993 se obtuvieron datos de 9,050 vehículos T3-S3 y de 1,129 T3-S2-R4, con algún nivel de carga, es decir, 10,179 en total, durante un lapso de muestreo de 58 días, en un periodo de 50 años se tendrían 3,202,875 vehículos, por lo que se obtiene que:

$$p = 3.12 \times 10^{-7} \quad \text{y} \quad q = 0.999999688$$

Utilizando la función de confiabilidad de Weibull que se obtuvo para este caso, se encuentra que $CV2 = 42.7t$, que es bastante parecido al $43.9t$ que se calculó para 1996, por lo que los resultados de los dos años son muy congruentes entre sí.

En la figura 6.5 se presenta la distribución de probabilidades de Weibull que se ajusta a cada una de las muestras completas de 1993 y 1996, así como la que se obtiene al conjuntar las muestras de los dos años, observándose que las tres tienden a valores grandes muy parecidos.

En la figura 6.6 se presenta el ajuste logrado para la muestra globalizada de los dos años, y se observa que del percentil 20 en adelante ésta también tiene un magnífico ajuste. Puesto que en este último caso la muestra total tiene datos de 20,258 vehículos, observados en un lapso acumulado de 103 días, en un periodo de 50 años se observarían 3,589,403 vehículos, a los cuales corresponden:

$$p = 2.78 \times 10^{-7} \quad \text{y} \quad q = 0.999999722$$

Al calcular el percentil asociado a estas probabilidades, se obtiene que $CV2 = 44.4t$, que también es muy congruente con los otros valores obtenidos para $CV2$.

Para fines del modelo se usará, como primer intento, $CV2 = 44.4t$, por ser el valor más grande y el que se obtuvo con la totalidad de datos.

6.4 Determinación de la ley de probabilidades de PT2 y cálculo de la carga virtual CV3

Al igual que en el caso de PT1, para la variable aleatoria PT2 se probaron ajustes de diversas distribuciones de probabilidades, habiendo resultado que la de Weibull fue la mejor.

En la figura 6.7 se presentan los casos de los ajustes logrados con cada una de las muestras de 1993 y 1996 con todos los vehículos tipo T3-S3 y T3-S2-R4 integrados en muestras únicas. En ella se observa que se tiene muy buena concordancia entre cada recta con los puntos correspondientes, en el rango de

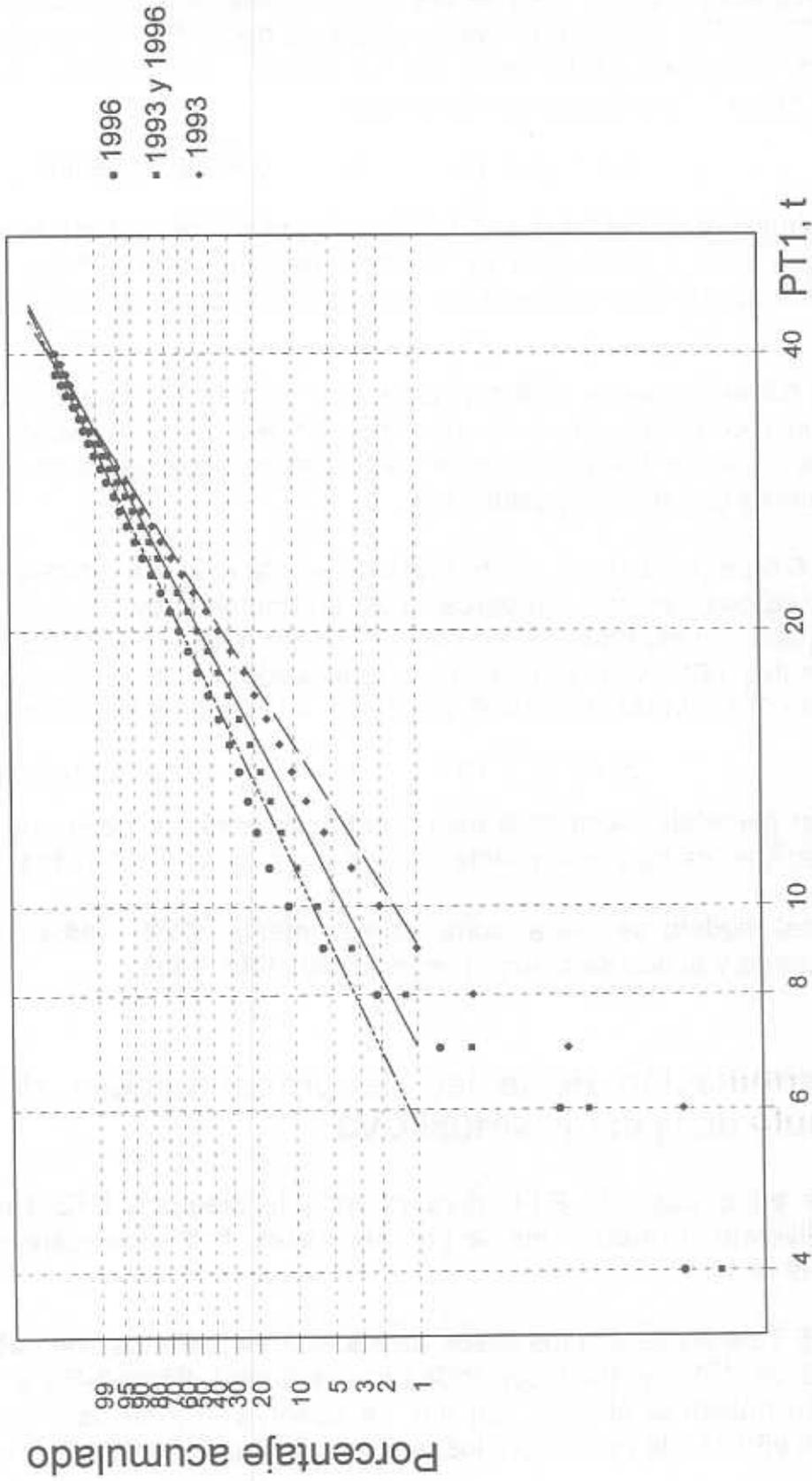


Fig. 6.5 Distribución de Weibull para PT1, T3-S3 y T3-S2-R4

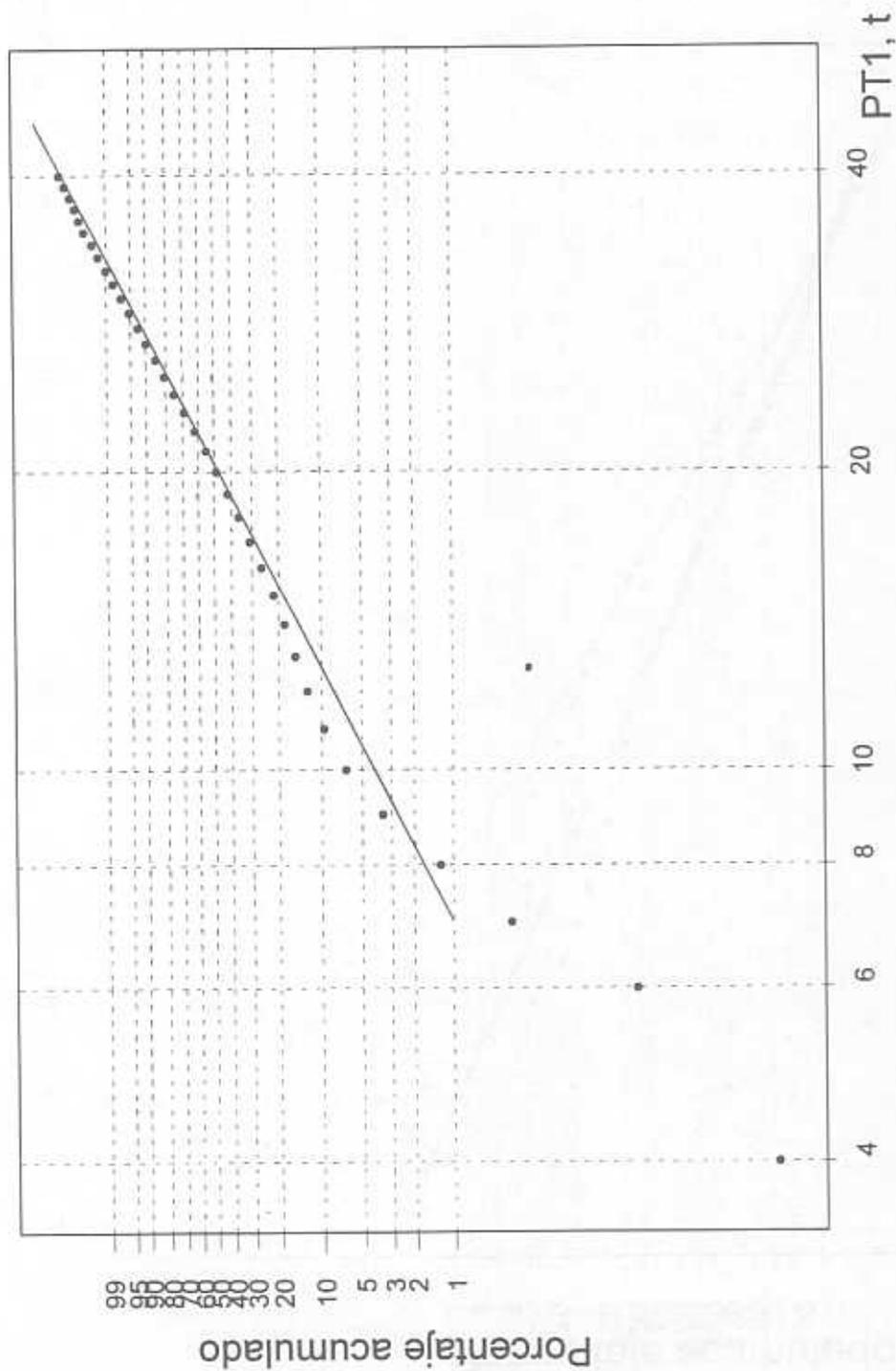


Fig. 6.6 Distribución de Weibull para PT1, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993 y 1996

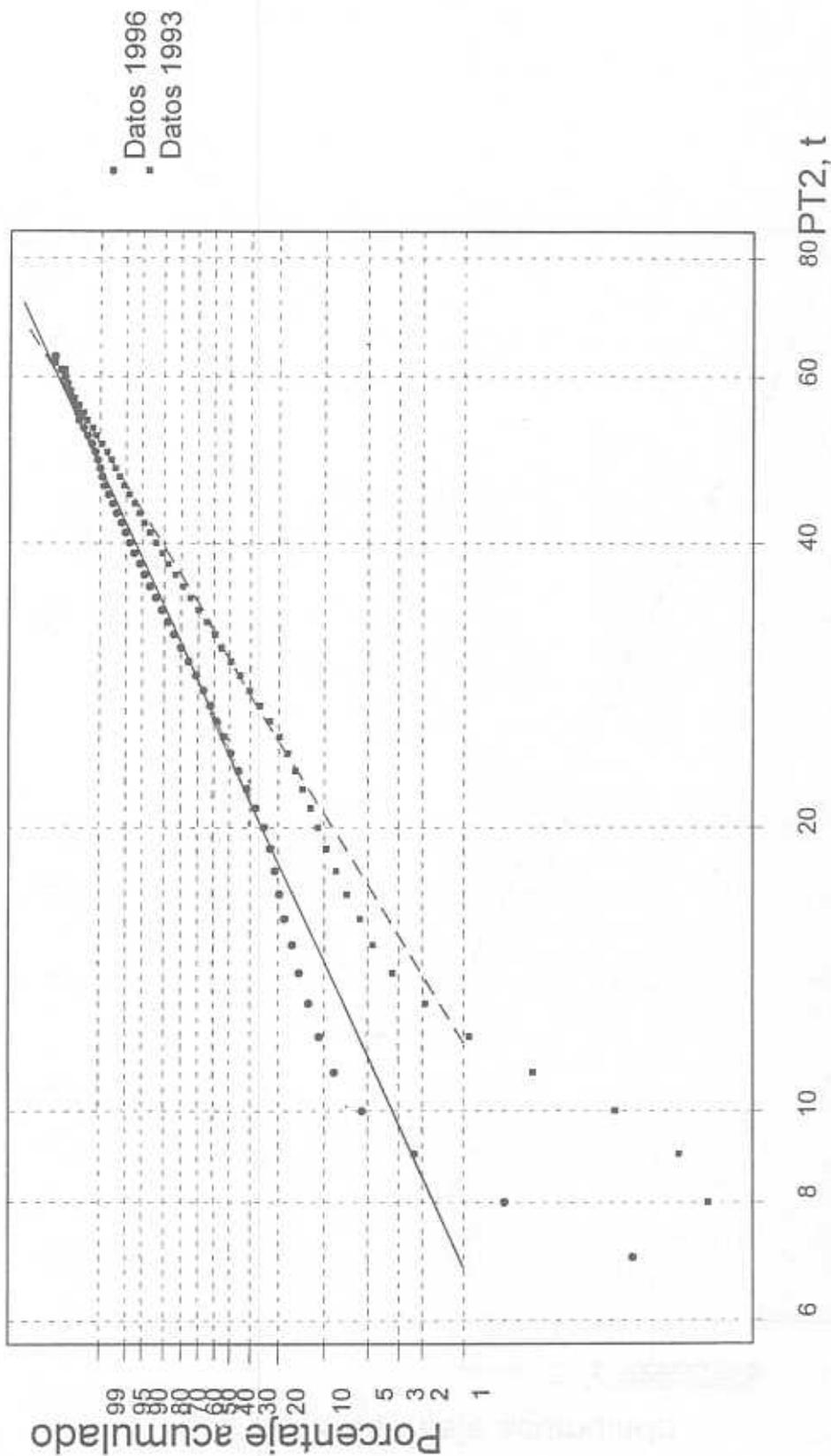


Fig. 6.7 Distribución de Weibull para PT2, T3-S3 y T3-S2-R4

valores de PT2 superiores a 20t, y que las distribuciones de probabilidades confluyen a valores grandes muy parecidos entre sí.

En estos casos, los valores de la carga virtual CV3 que corresponden a las respectivas probabilidades de no excedencia, en un periodo de 50 años, son 67.5 y 70.4 toneladas.

Al conjuntar las muestras de los dos años en una sola, se obtiene el magnífico ajuste de la distribución de probabilidad de Weibull que se muestra en la figura 6.8. El valor CV3, correspondiente a la probabilidad $p = 2.78 \times 10^{-7}$ de excedencia en 50 años, es 71.2t, que es muy congruente con los otros dos valores obtenidos.

Para fines del modelo se tomará, como primer intento, $CV3 = 71.2t$, por ser el valor más grande y el que se obtuvo con la totalidad de los datos.

6.5 Determinación de la carga virtual CV1

Para calcular el valor del peso del eje delantero del vehículo virtual, que representa el modelo de carga viva que se está proponiendo en este trabajo, se verificó que ninguna ley de probabilidades convencional se ajusta muy bien a los datos de la variable aleatoria PED, de todos los vehículos de las muestras de 1993 y 1996 juntas, en virtud de que hubo cinco valores grandes que se salieron ostensiblemente de la secuencia, cuatro de ellos entre 8 y 9.2t, y uno de 14.2t.

En las figuras 6.9 y 6.10 se presentan los ajustes realizados con las distribuciones de probabilidades normal y log-normal, respectivamente. En el primer caso el valor de CV1 que corresponde a la probabilidad de excedencia para un periodo de 50 años es 8.1t y, en el segundo, es de 10.9t.

Debido a que la influencia de esta carga virtual en el cálculo de los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes es pequeña, el valor que se le asigne a CV1 se tomará entre 8 y 11 toneladas, de tal manera que al actuar con CV2 y CV3 se produzcan los elementos mecánicos correctos. Como primer intento se usará $CV1 = 9t$.

6.6 Cálculo de las separaciones entre las cargas virtuales

Para definir la separación entre las cargas CV1 y CV2, se calcularon los promedios de las separaciones en la muestra completa de los años 1993 y 1996, de las distancias del primero y del segundo entre-ejes; éstos resultaron ser 4.60m

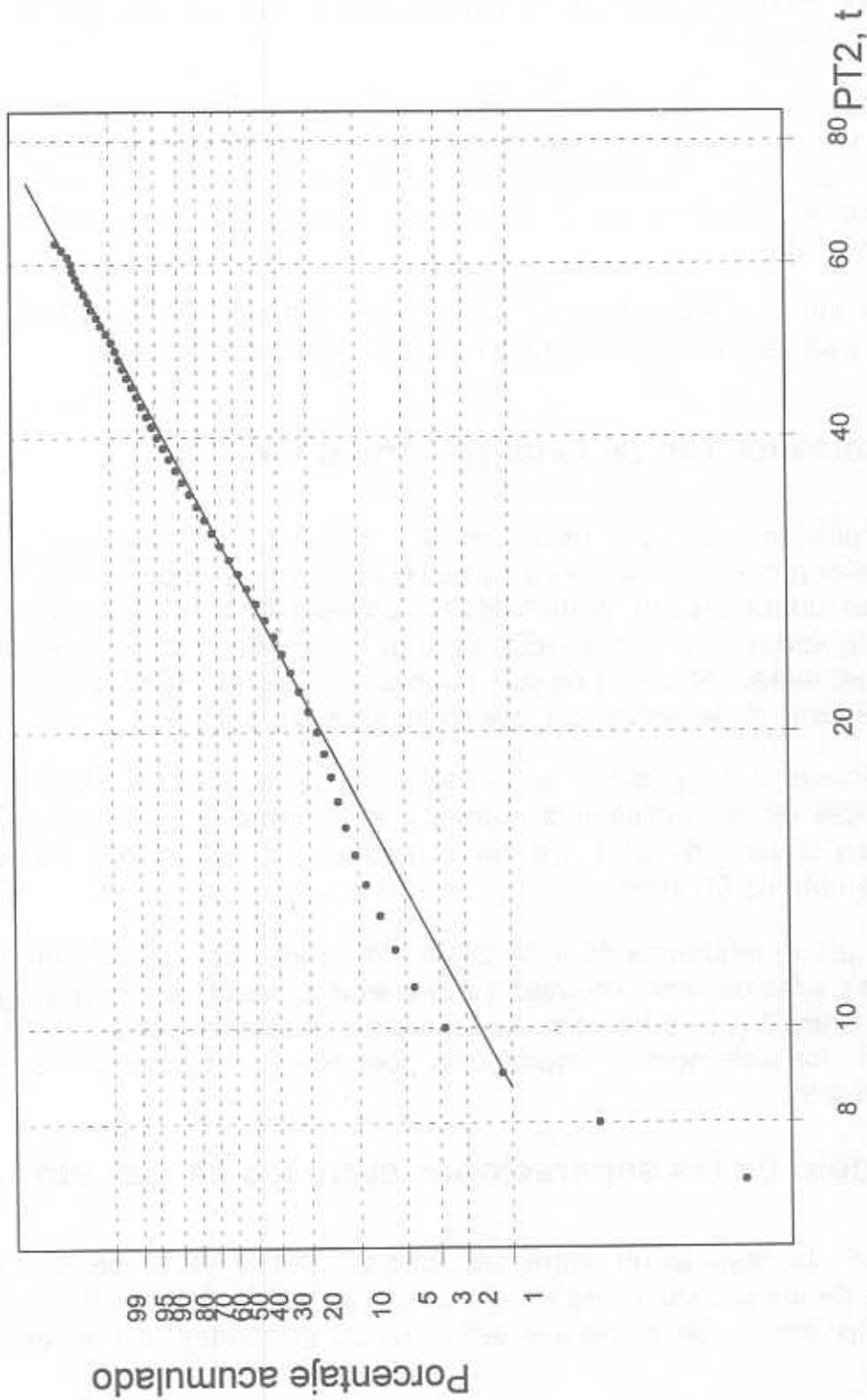


Fig. 6.8 Distribución de Weibull para PT2, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993 y 1996

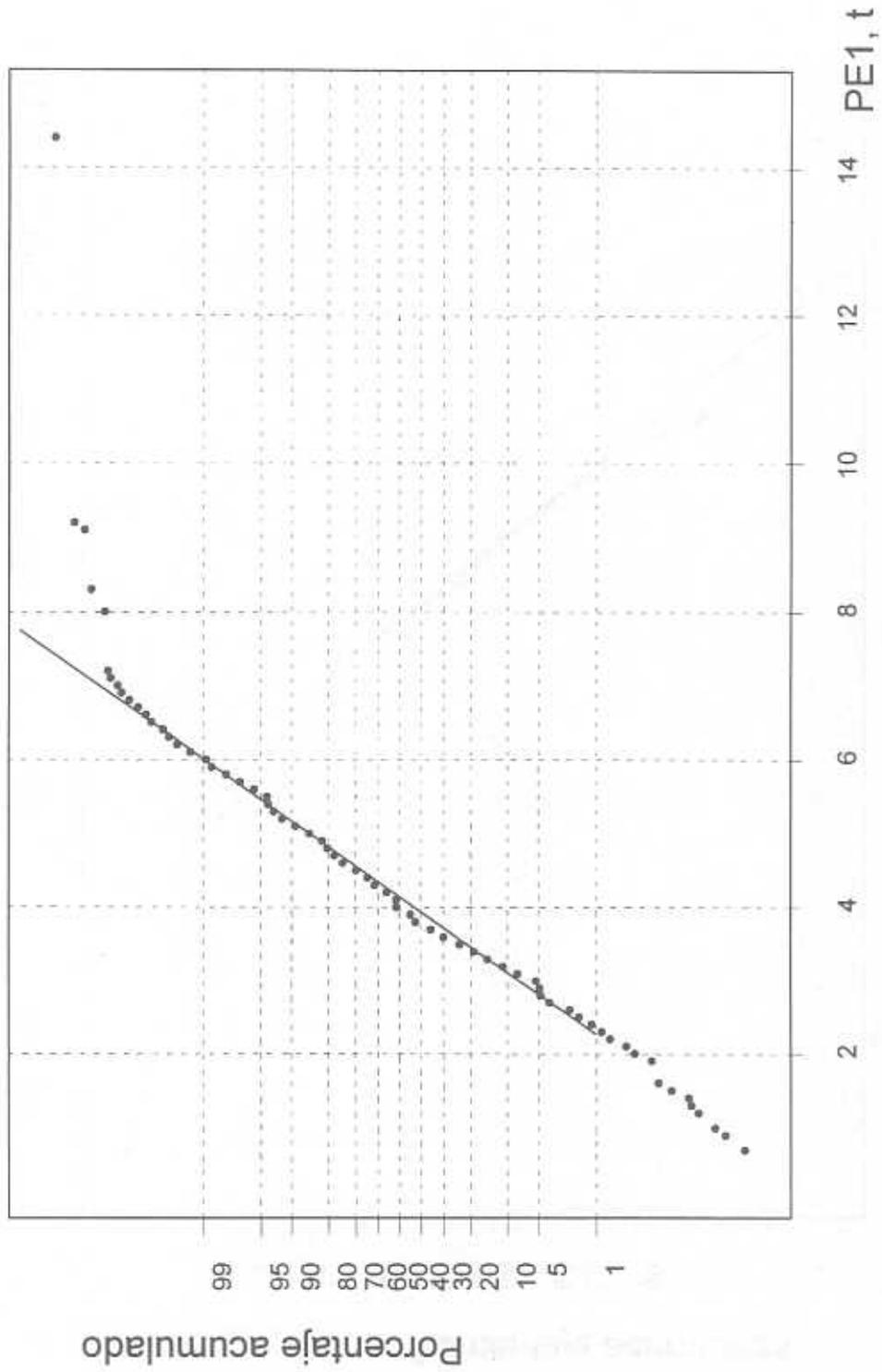


Fig. 6.9 Distribución normal para PE1, 1993 y 1996

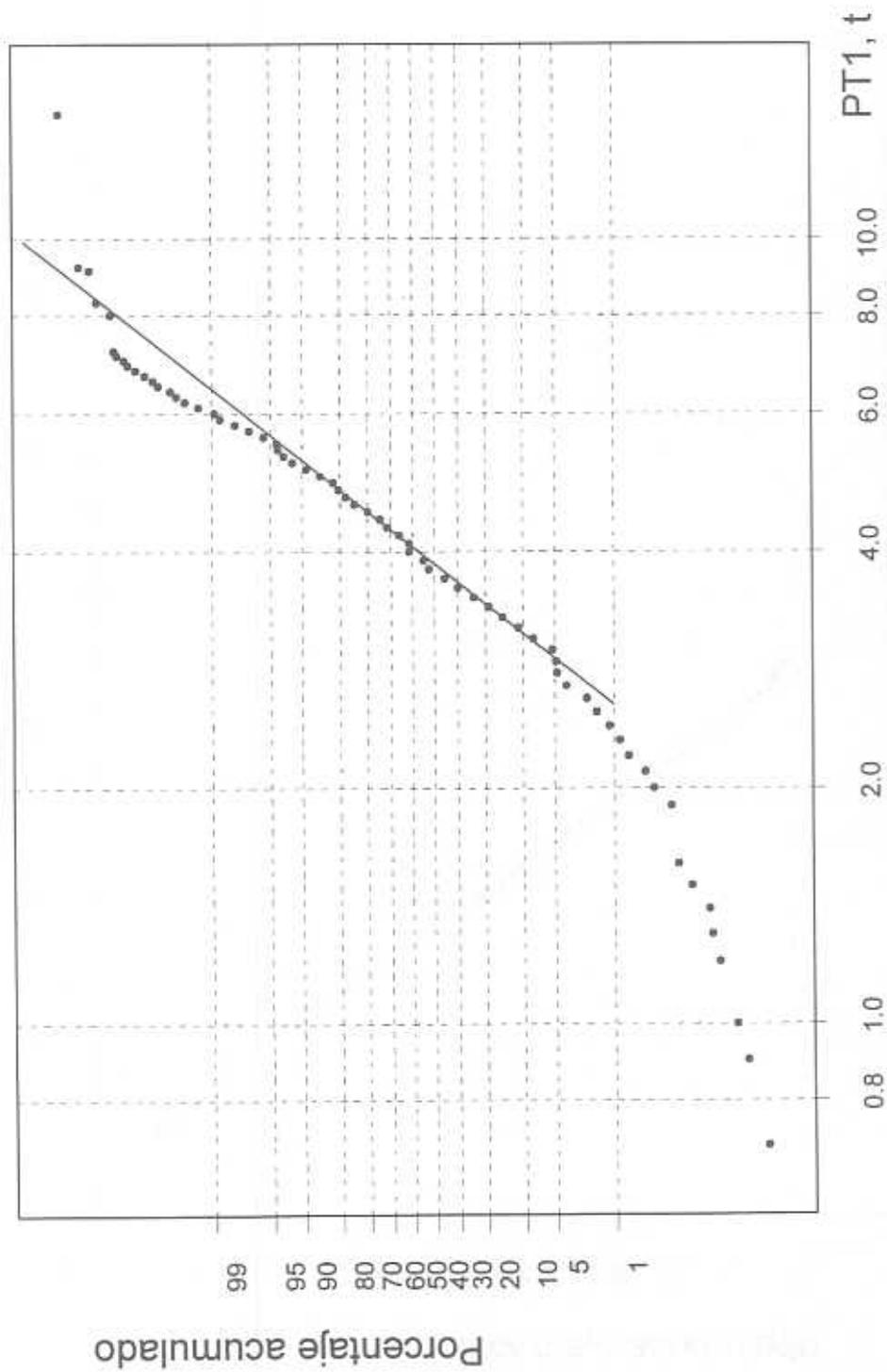


Fig. 6.10 Distribución log-normal para el peso del eje 1, 1993 y 1996

y 1.38m, respectivamente. Considerando que la ubicación de la resultante de las cargas que transmiten los ejes 2 y 3 pasa por el medio de éstos, la ubicación de CV2 estará a 5.29m del eje1. Para redondear, se tomará $d_1 = 5m$.

Por otra parte, los promedios calculados para las separaciones que hay entre las líneas de acción de CV2 y CV3 fueron 8.85m para los vehículos T3-S3, y 10.0m para los T3-S2-R4. Para fines del modelo que aquí se propone, se tomará $d_2 = 9.0m$.

Vale la pena destacar que si se duplicara el número de vehículos n , utilizado para estimar a la probabilidad de no excedencia, q , los valores de CV2 y CV3 crecerían en 1 o 2t solamente, ya que con ello el valor de q cambiaría muy poco, de lo cual se concluye que el número utilizado es razonable.

6.7 Determinación del factor de carga viva

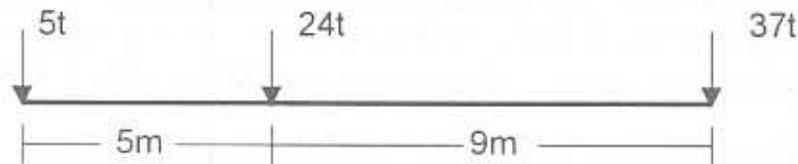
Dado que los factores de carga se aplican multiplicándolos por las **cargas nominales**, para tomar en cuenta su variabilidad e incertidumbre sobre los valores máximos que eventualmente asumirán, es necesario calcular el valor que le corresponde al **factor de carga viva básico** que se utilizará en el modelo aquí propuesto, para el diseño de puentes con 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 una probabilidad de excedencia que se consideró razonablemente pequeña. Por otra parte, los valores nominales de los pesos brutos vehiculares están establecidos en el RPD.

Por lo tanto, y tomando en cuenta que los valores de las cargas virtuales suman 124.6t y que el valor máximo del peso bruto permitido en el RPD es de 66t, el cociente del primero entre el segundo es el **factor de carga viva básico**, y su valor es 1.88, que redondeado a una decimal es 1.9; de este valor se derivarán otros en este trabajo, para considerar diferentes combinaciones de la carga viva vehicular con los demás tipos de carga que afectan a los puentes.

Dividiendo las cargas virtuales entre 1.88 y ajustando la suma, se obtienen las siguientes **cargas nominales**, P_i , redondeadas a las unidades:

$$P_1 = 5t \quad P_2 = 24t \quad P_3 = 37t$$

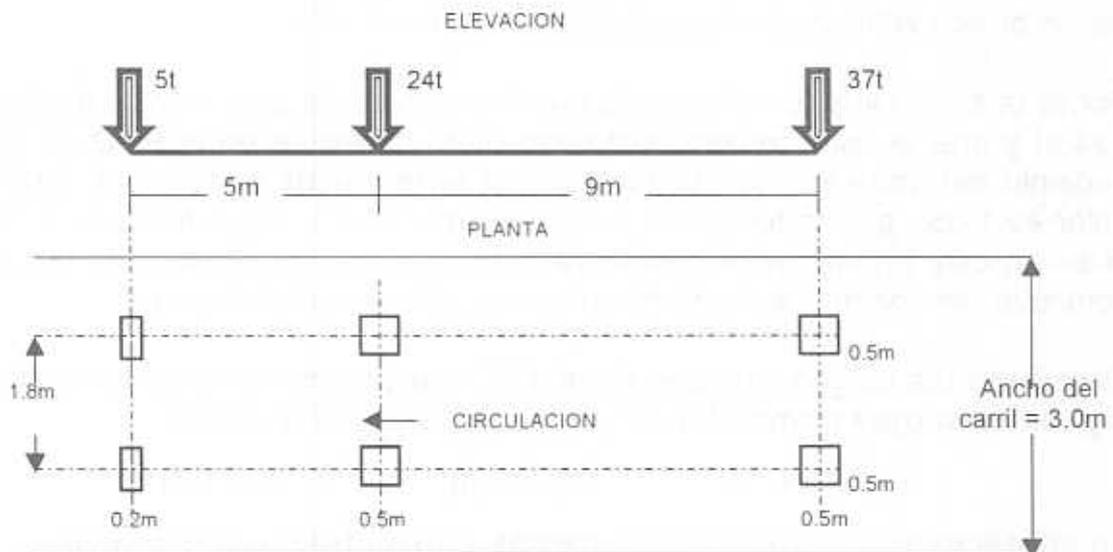
En consecuencia, el **sistema de cargas concentradas nominales** del modelo de carga viva queda de acuerdo con la siguiente figura, con un **factor de carga viva de 1.9 o de otros valores**, según sea el estado límite al que se aplique, como se indicará en un capítulo subsecuente de este trabajo.



Cada una de las cargas concentradas representa el peso nominal que el vehículo virtual transmite al puente a través de juegos de llantas que se ubican en el "eje virtual" correspondiente, las cuales, de acuerdo con los reglamentos AASHTO y OHBDC se proponen separadas entre sí 1.8m. Al aplicar la fórmula que se propone en el reglamento estadounidense, para calcular la longitud del rectángulo que define el área de contacto de cada llanta del eje más pesado, se obtiene que ésta vale 52 cm; el ancho de la misma se establece de 51cm. Por simplicidad, se propone utilizar un cuadrado de 0.5 x 0.5m para cada lado de los ejes virtuales 2 y 3, y un rectángulo de 0.5 x 0.2m para cada lado del eje virtual delantero. El ancho del carril de circulación se toma de 3.0m.

Como referencia a lo anterior, cabe señalar que el reglamento OHBDC señala áreas de contacto de 0.6 x 0.25m para todos los ejes, excepto para el delantero que lo indica de 0.25 x 0.25m. El reglamento europeo especifica áreas de contacto cuadradas de 0.40 x 0.40m.

En resumen, el sistema de cargas concentradas nominales del modelo de carga viva quedaría según se muestra en la siguiente figura:



6.8 Validación parcial del modelo de carga viva

Con el fin de validar el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas vehiculares aquí propuesto, se realizaron las tres comparaciones siguientes de los elementos mecánicos que éste proporciona:

1. Con los valores reales más grandes.
2. Con los valores máximos esperados en 50 años, según los análisis probabilísticos.
3. Con los valores máximos que se predicen a partir de los análisis de regresión múltiple ya realizados.

6.8.1 Validación utilizando los elementos mecánicos reales más grandes

Con el fin de validar el sistema de cargas concentradas del modelo de carga viva aquí propuesto, se calcularon los elementos mecánicos que éste produce al aplicarse a puentes de 5 a 90 metros; los resultados se comparan con los valores máximos de momento flexionante y de fuerza cortante que se obtuvieron con la muestra total de los dos años aquí involucrados; para obtener éstos en toda la gama de longitudes, se realizaron los cálculos necesarios utilizando las cargas de varios de los vehículos más pesados.

En las figuras 6.11 y 6.12 se muestran las comparaciones antes referidas, y en ambas se aprecia que los resultados del modelo superan ligeramente a los máximos reales, salvo en los momentos de 40m en adelante, que queda ligeramente por abajo con déficit máximo de 3% en $L = 90\text{m}$. En conclusión, lo desarrollado hasta ahora del modelo de cargas vivas vehiculares es satisfactorio.

6.8.2 Validación utilizando los elementos mecánicos máximos esperados según los análisis probabilísticos

Con el fin de validar en segunda instancia al modelo de cargas vivas propuesto hasta ahora, se hace necesario estimar los valores que asumirían los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos, para las mismas probabilidades de excedencia que se utilizaron para calcular las cargas virtuales.

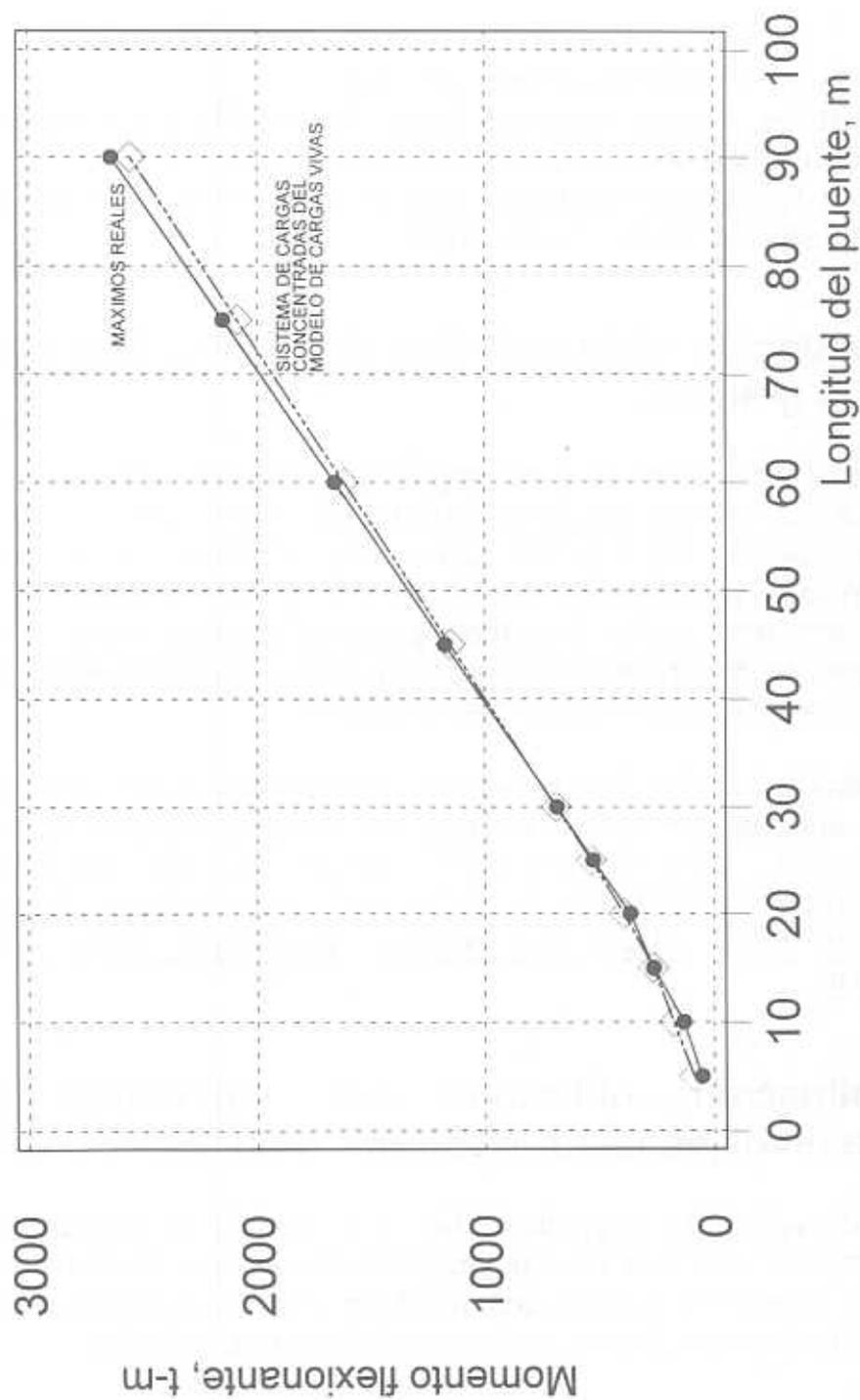


Fig. 6.11 Comparación de momentos flexionantes

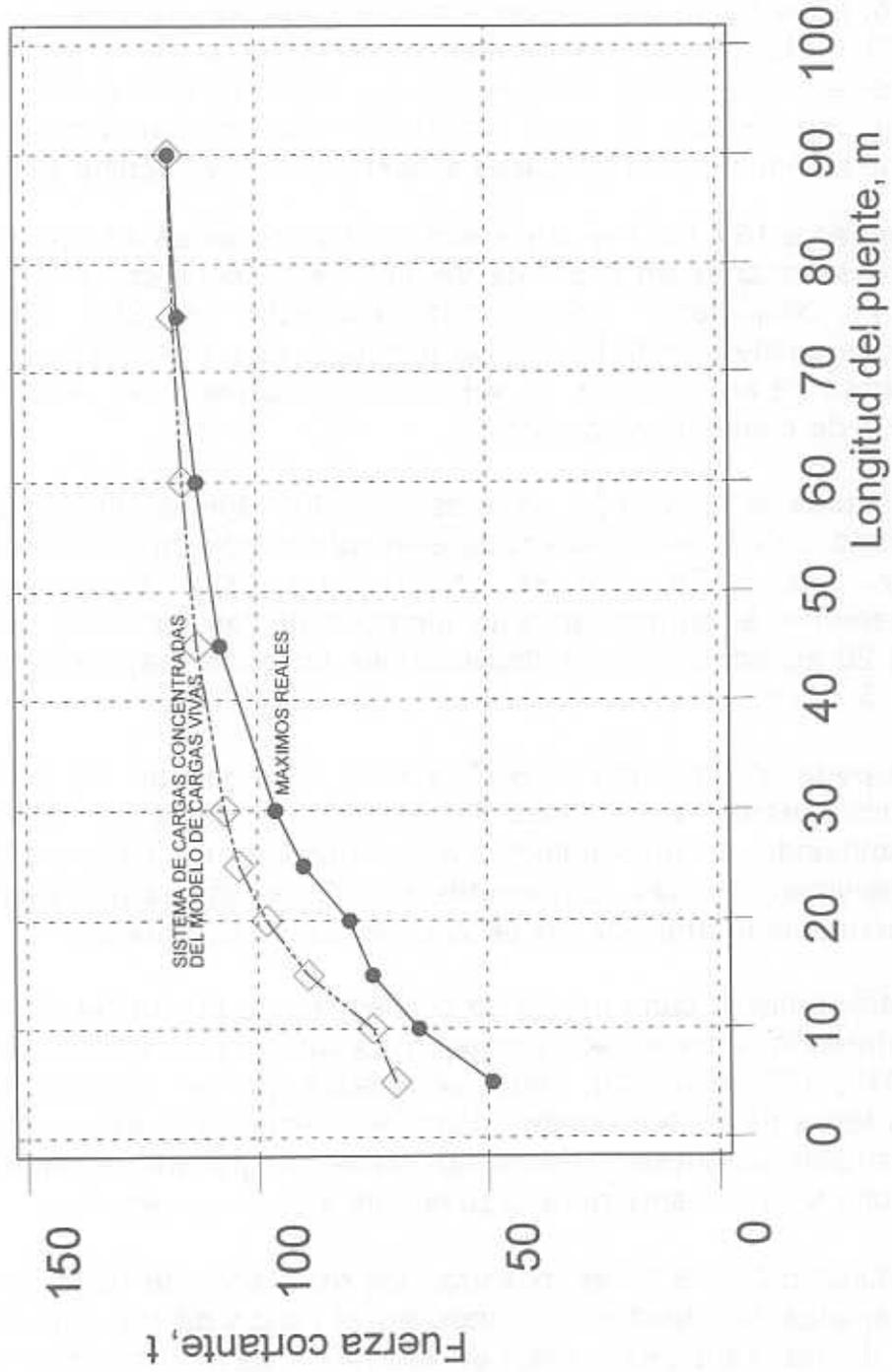


Fig. 6.12 Comparación de fuerzas cortantes

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 calculados con los datos de las muestras, habiéndose concluido que la distribución de Weibull se ajustó razonablemente, excepto en los valores pequeños para los que no tiene importancia.

En efecto, en la figura 6.13 se presentan los ajustes realizados a los momentos M15, M30 y M45, y en la 6.14, los correspondientes a V15, V30 y V45, asociados a la muestra T3-S2-R4 de 1996, en las que se aprecia un ajuste adecuado en la mitad del lado derecho de cada distribución, excepto en el caso de V15. Algo semejante se obtuvo para los casos asociados a los vehículos T3-S3.

En las figuras 6.15 a 6.20 se presentan las distribuciones de frecuencias relativas acumuladas trazadas en papel de Weibull, correspondientes a los tipos T3-S3, T3-S2-R4 y conjuntando ambos, para la muestra de 1996. En cada una se aprecia que existe similitud entre las distribuciones, por lo que se concluye que las muestras de ambos tipos de vehículos se pueden integrar en una sola para cada clase de elemento mecánico.

En las figuras 6.21 y 6.22 se presentan los ajustes de la distribución de probabilidades de Weibull para cada elemento mecánico, correspondientes a los datos de 1993. En ellos se observa que estas distribuciones modelan adecuadamente el comportamiento aleatorio de las variables en cuestión, del percentil 20 en adelante, con desviaciones un poco mayores en los casos de M15 y V15.

Por otra parte, en las figuras 6.23 a 6.26 se muestran las distribuciones de frecuencias relativas acumuladas de los distintos elementos mecánicos que se están estudiando, correspondientes a las muestras de 1993 y 1996, para cada tipo de vehículo, con las correspondientes líneas rectas que representan a las distribuciones de probabilidades de Weibull que se les ajustaron.

Al comparar entre sí cada pareja de secuencias de puntos, la de 1993 con la de 1996, correspondiente a cada elemento mecánico y a cada longitud del puente (p. Ej. M45, 1996 con M45, 1993) se aprecia que, en general, existe similitud entre las leyes de probabilidades correspondientes; por esto y por lo concluido en los párrafos anteriores, resulta razonable integrar los resultados de los dos años en una sola muestra, para cada tipo de elemento mecánico.

En las figuras 6.27 y 6.28 se muestran los resultados de hacer esto, notándose que los ajustes son bastante buenos en el rango de los valores medianos a grandes de las variables aleatorias (del 20% de probabilidad acumulada en adelante), con excepción de los extremos derechos de M15 y V15, en que la

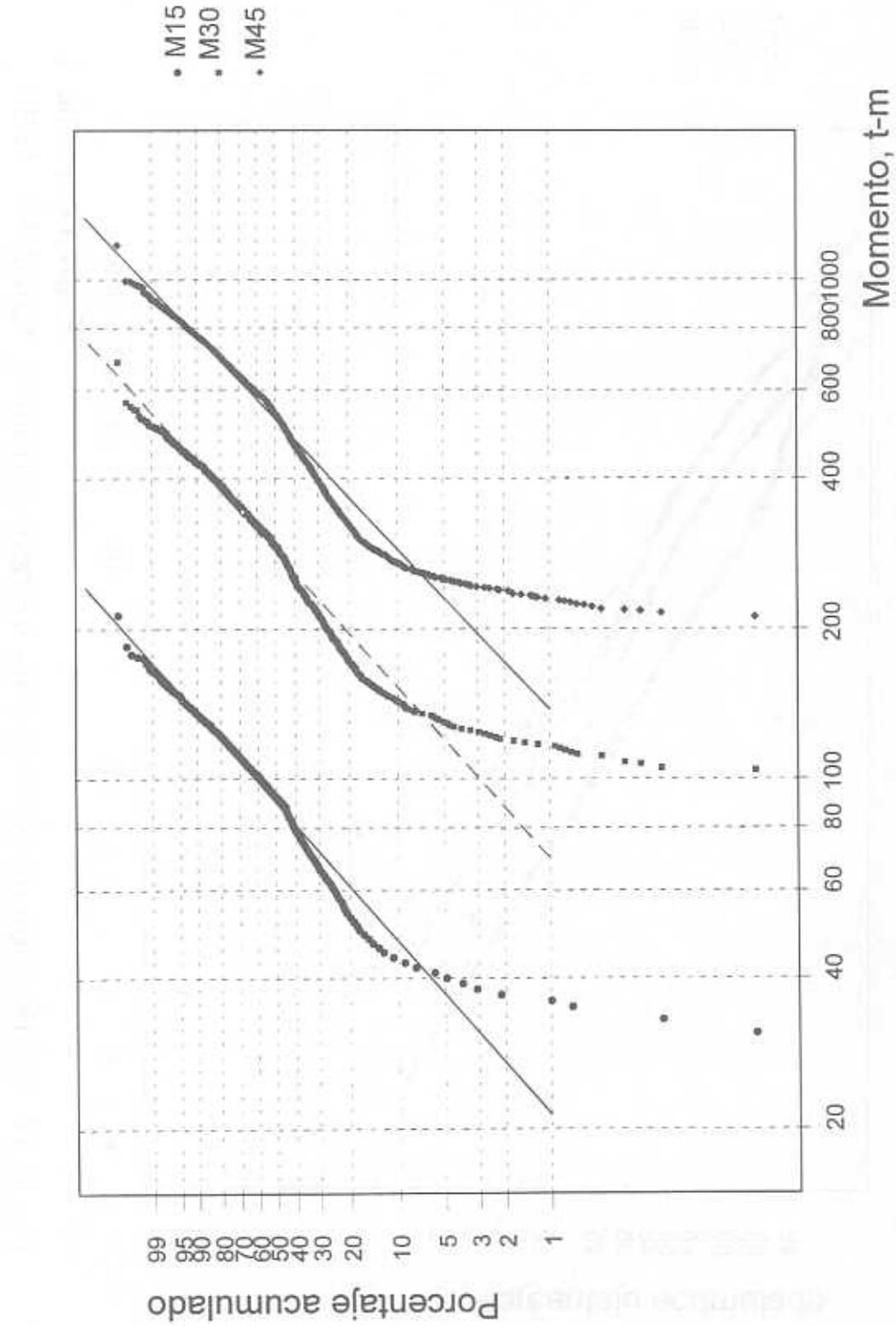


Fig. 6.13 Distribución de Weibull para momentos, T3-S2-R4, 1996

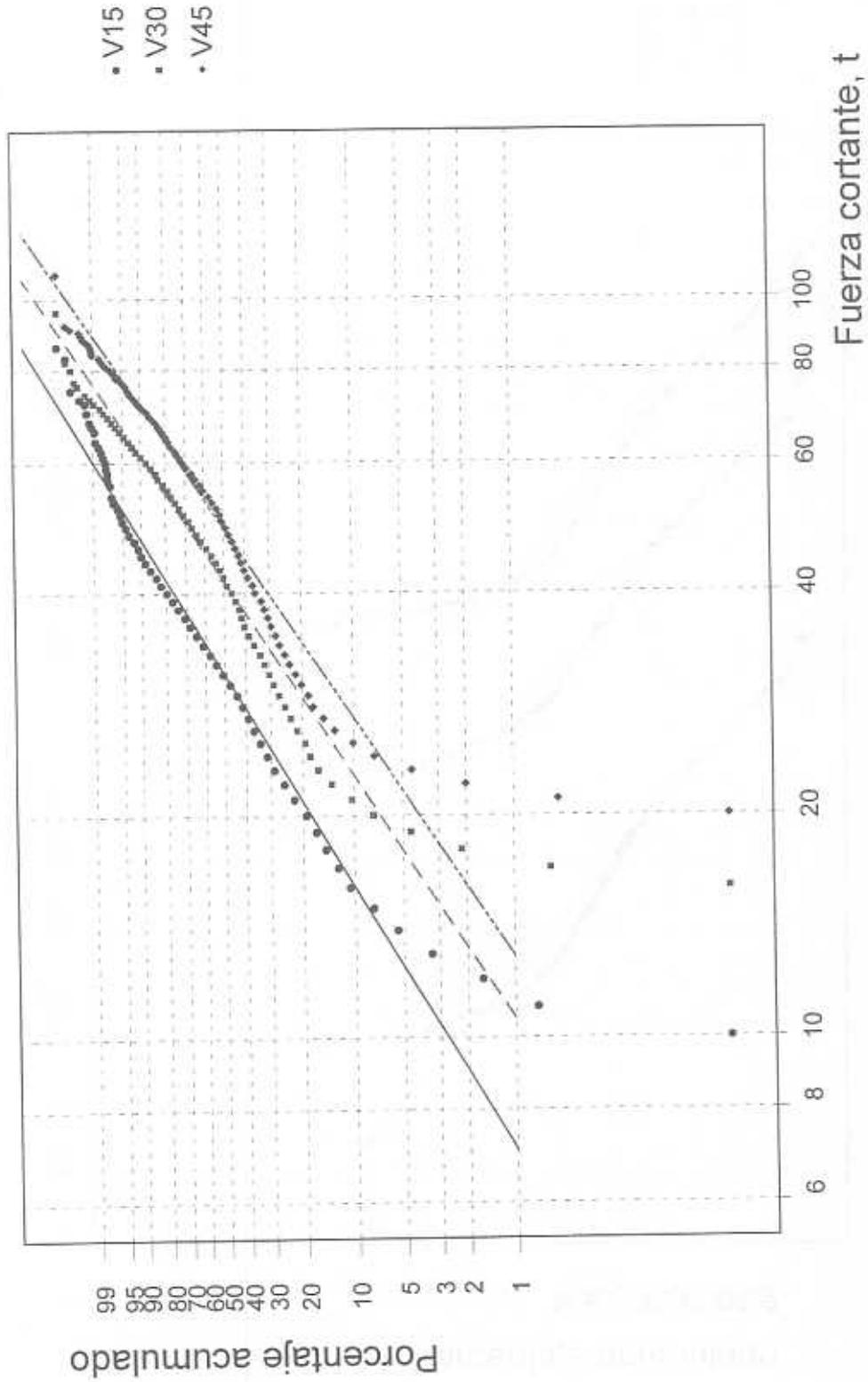


Fig. 6.14 Distribución de Weibull para fuerzas cortantes, T3-S2-R4, 1996

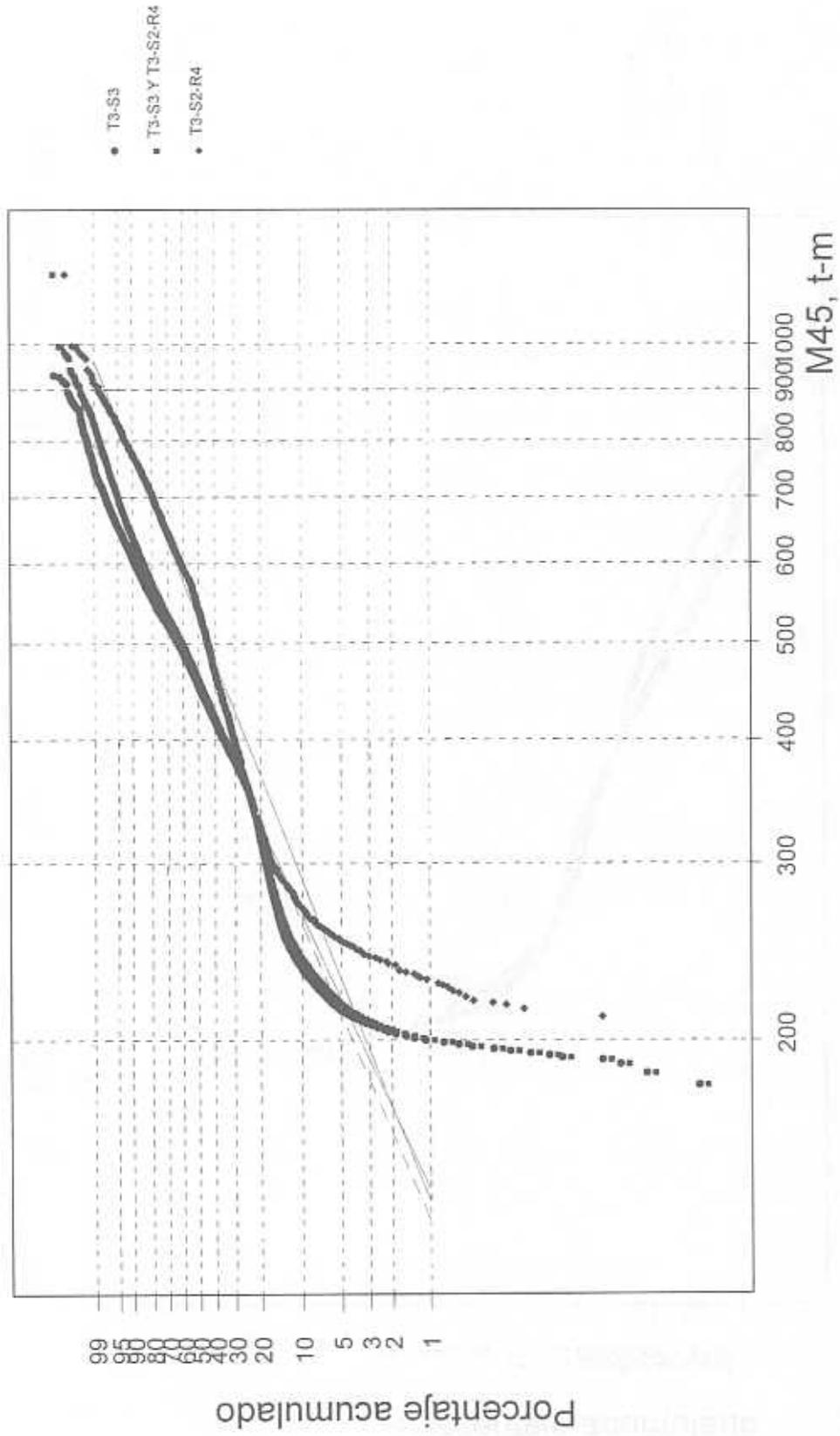


Fig. 6.15 Distribuciones de probabilidades para M45, 1996

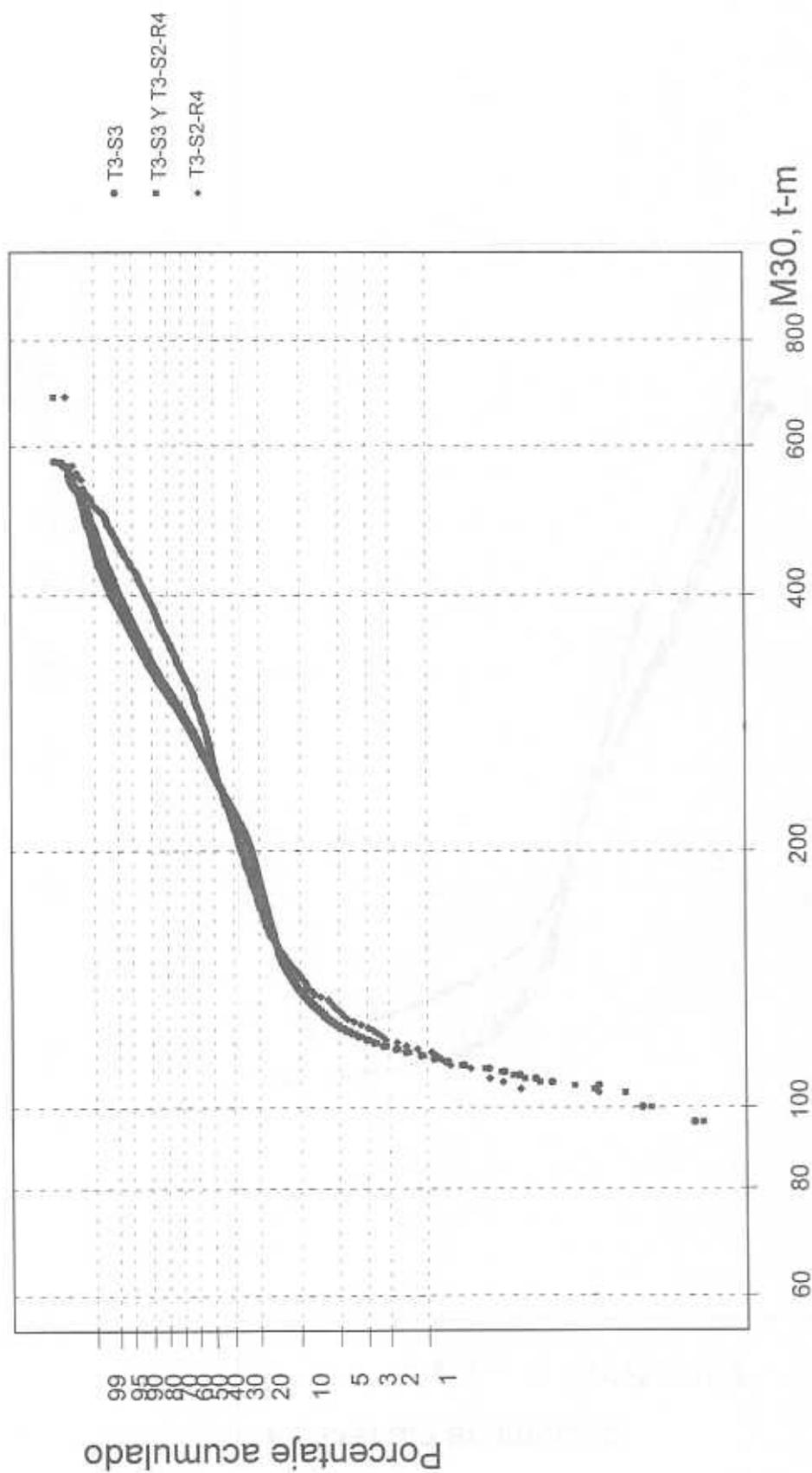


Fig. 6.16 Distribución de probabilidades de Weibull para M30, 1996

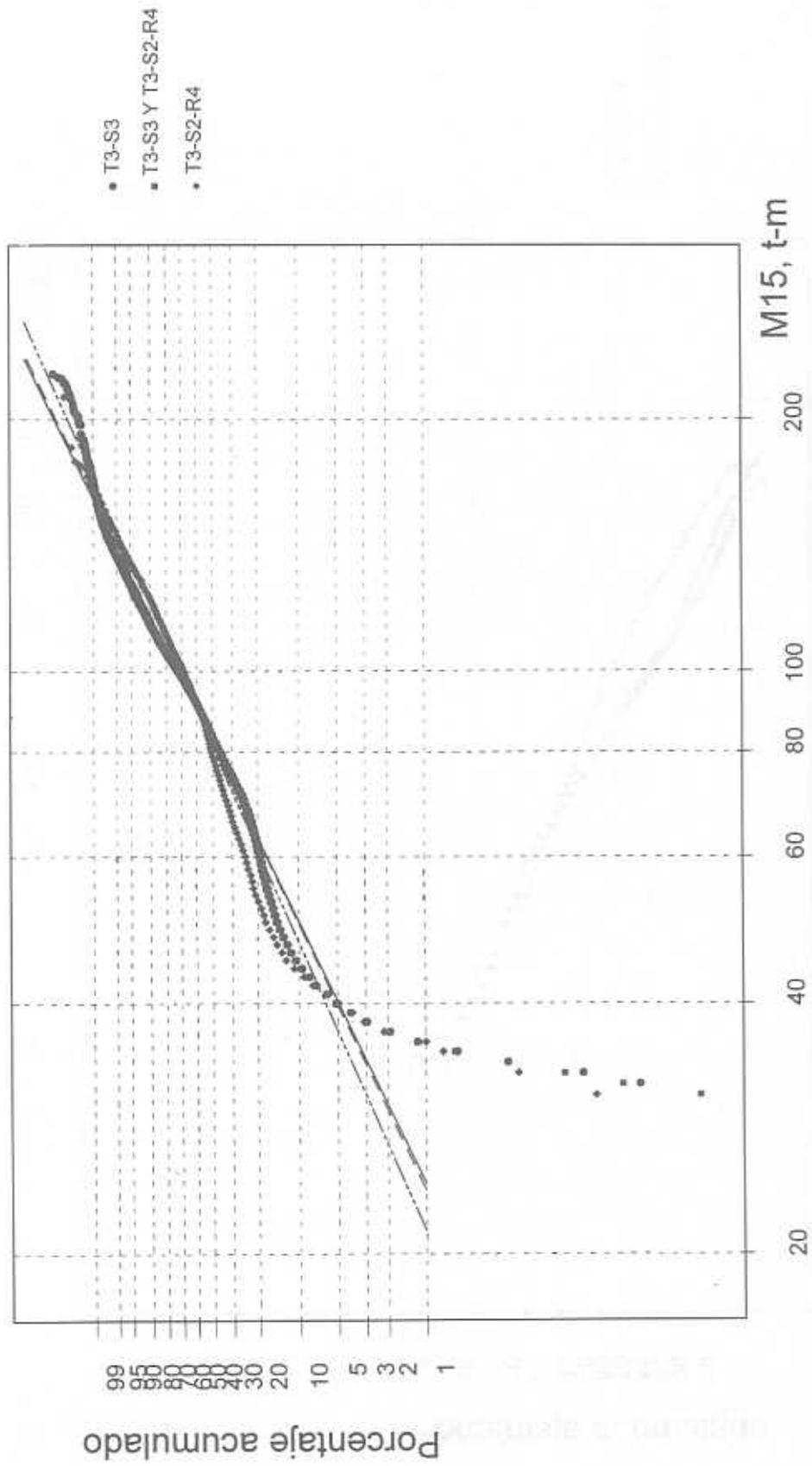


Fig. 6.17 Distribución de probabilidades de Weibull para M15, 1996

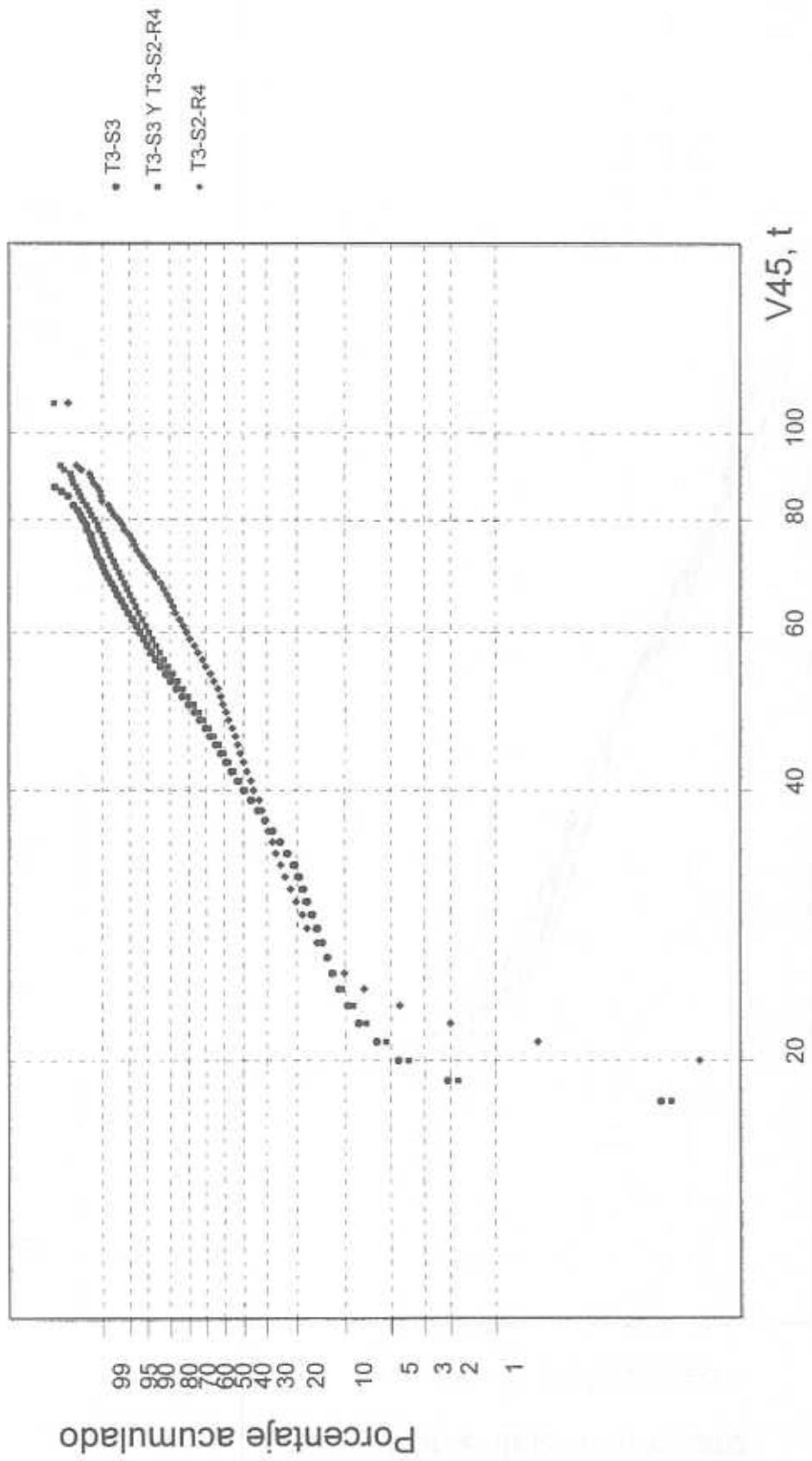


Fig. 6.18 Distribución de probabilidades de Weibull para V45, 1996

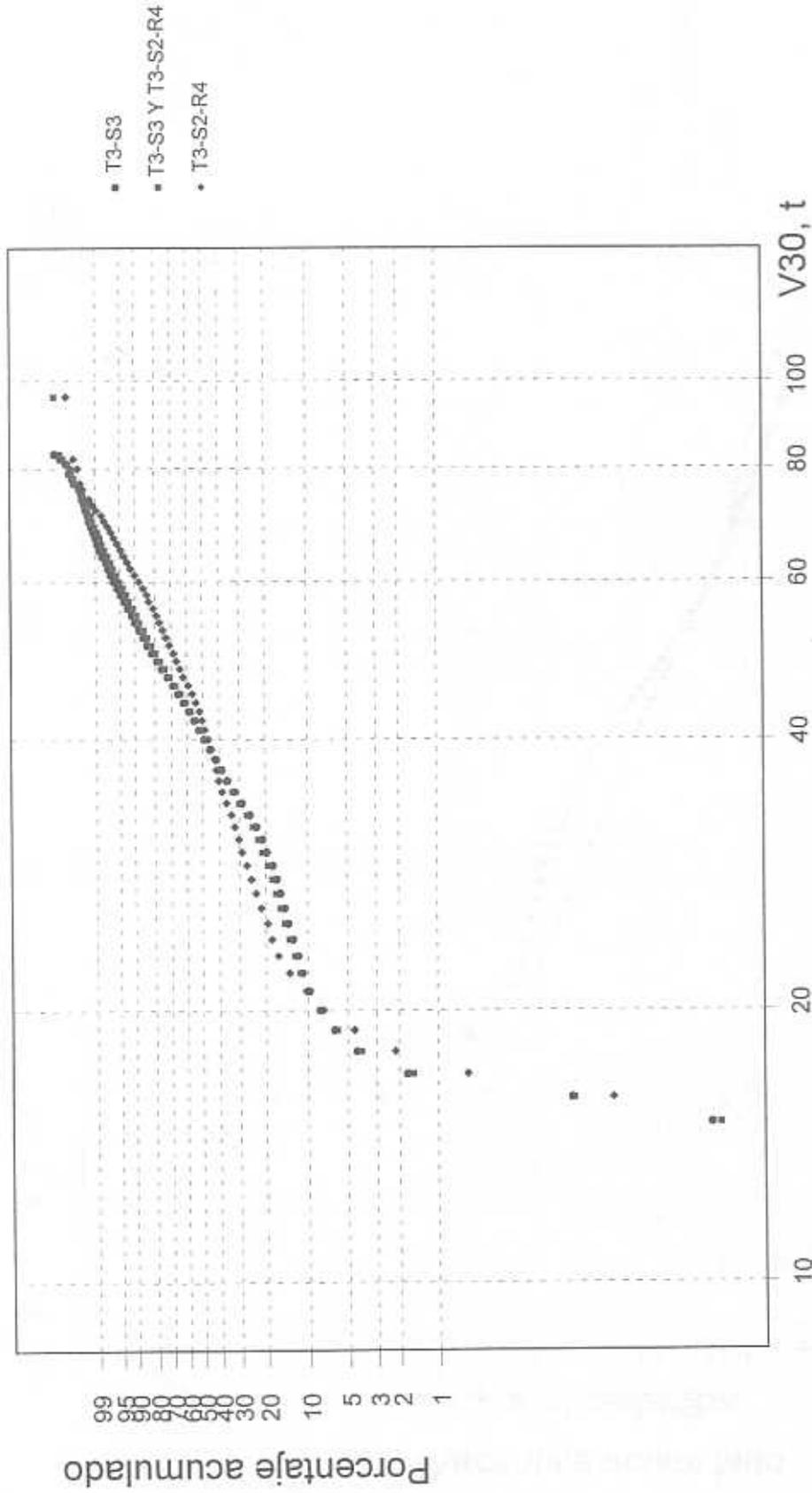


Fig. 6.19 Distribución de probabilidades de Weibull para V30, 1996

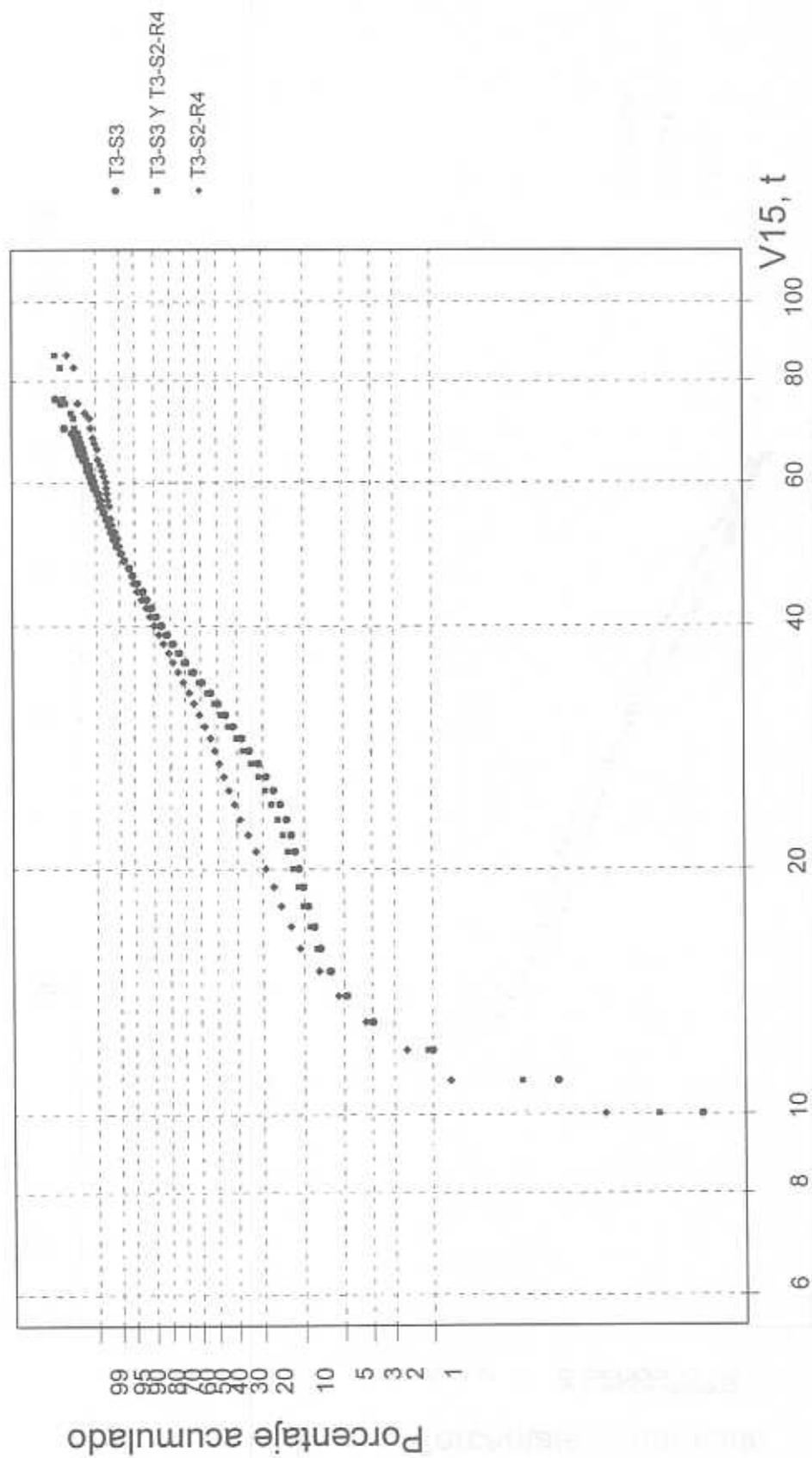


Fig. 6.20 Distribución de probabilidades de Weibull para V15, 1996

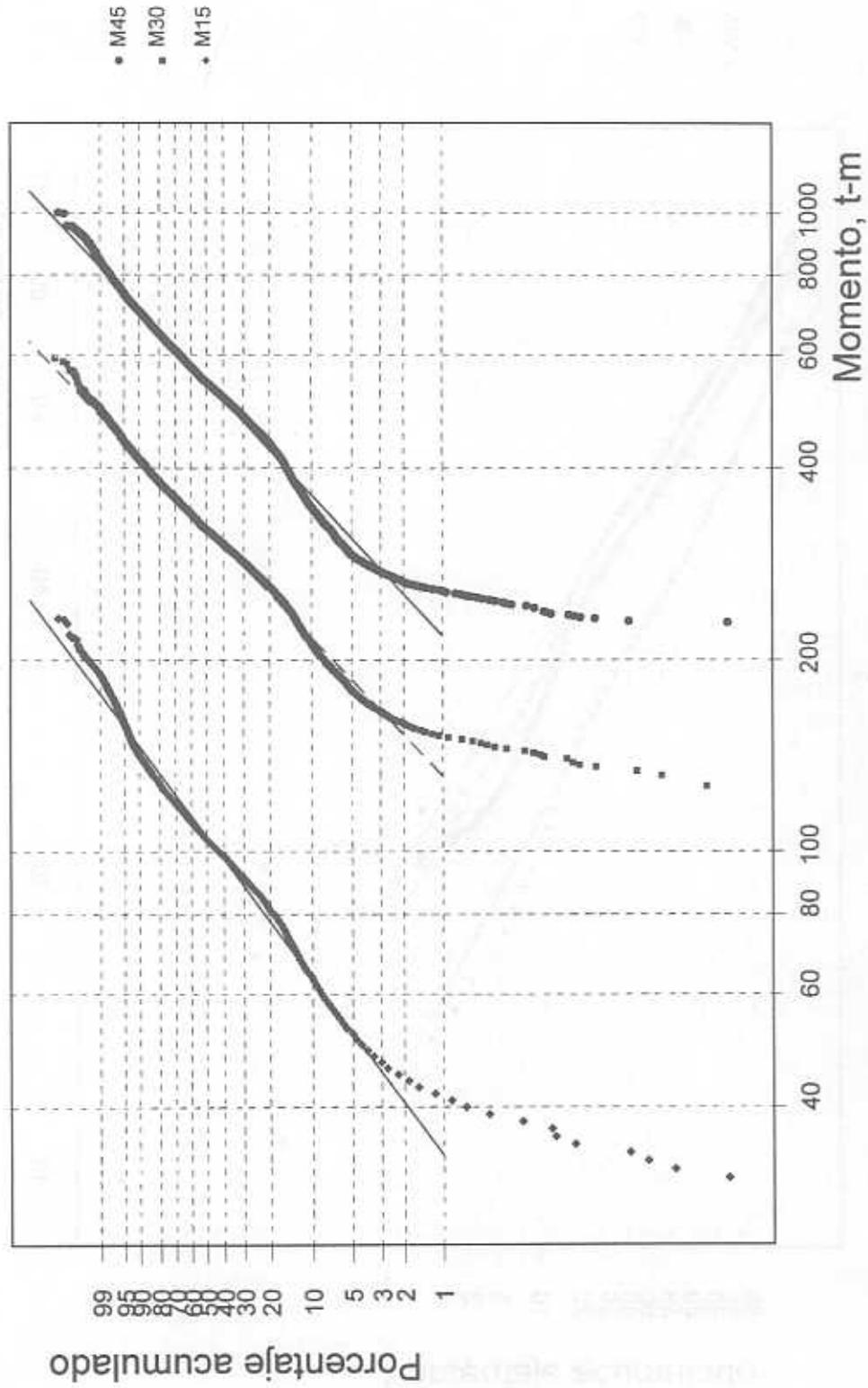


Fig. 6.21 Distribución de Weibull para momentos, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993

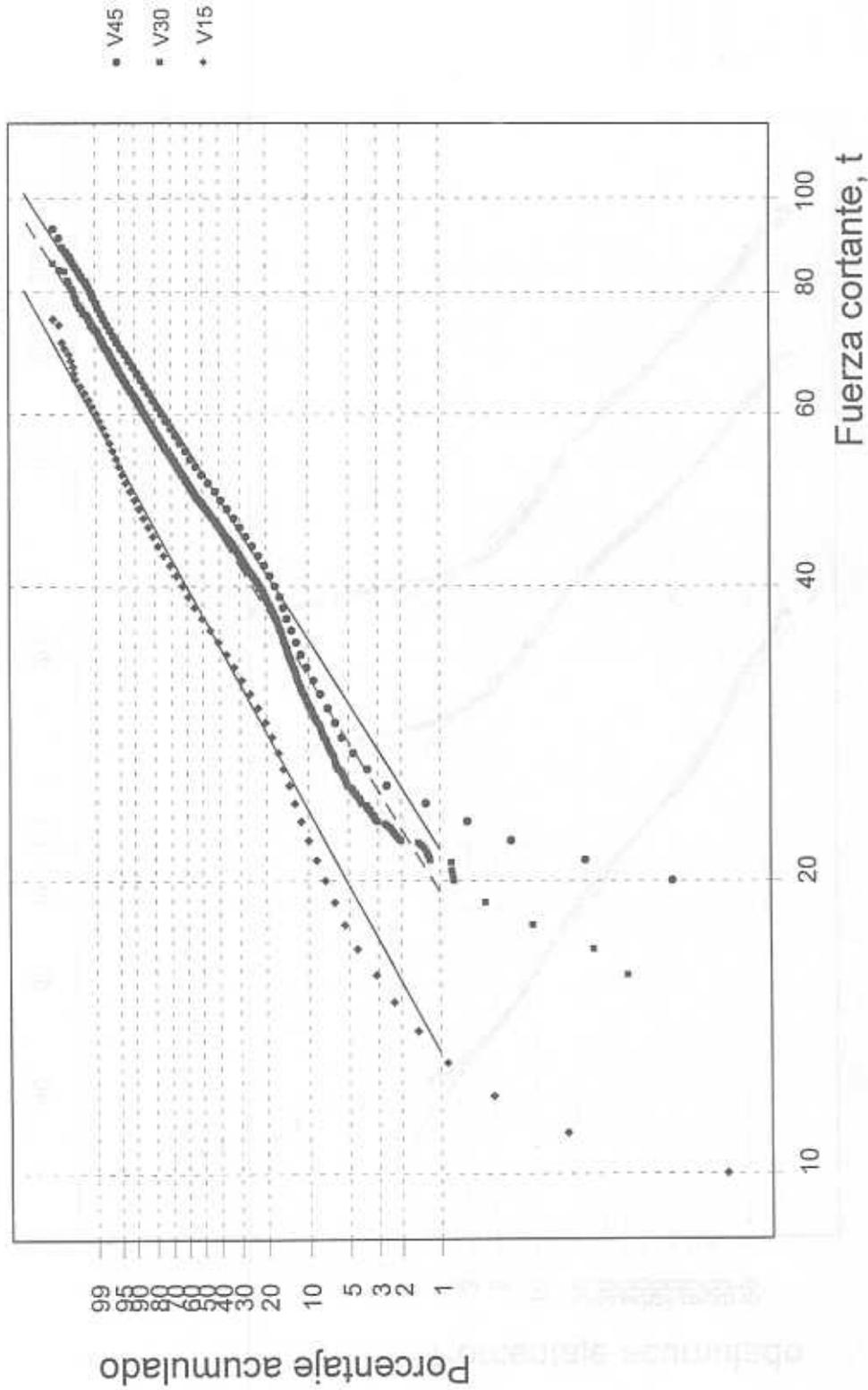


Fig. 6.22 Distribución de probabilidades de Weibull para V15, V30 y V45, 1993

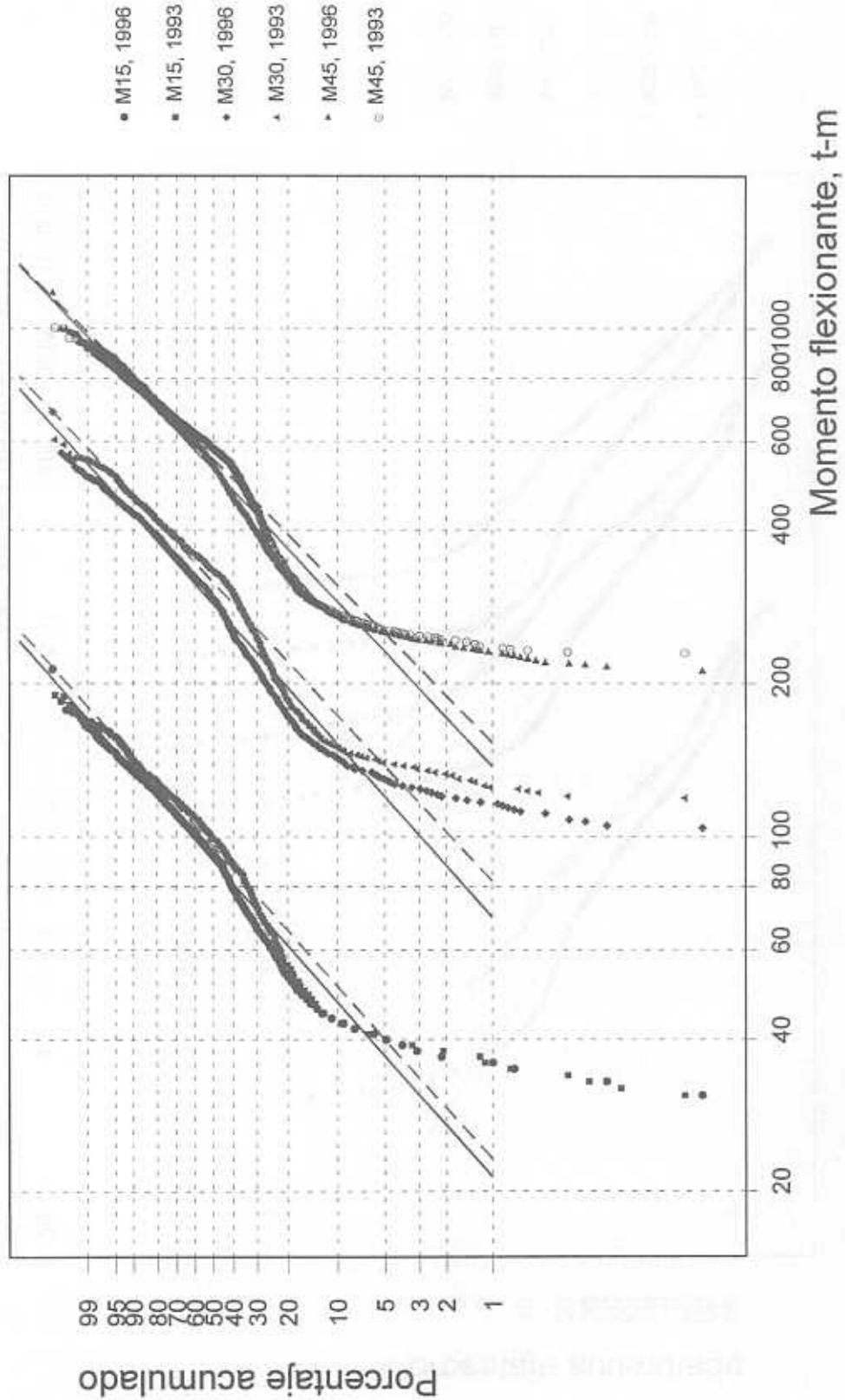


Fig. 6.23 Distribución de Weibull para momentos, T3-S2-R4, 1993 y 1996

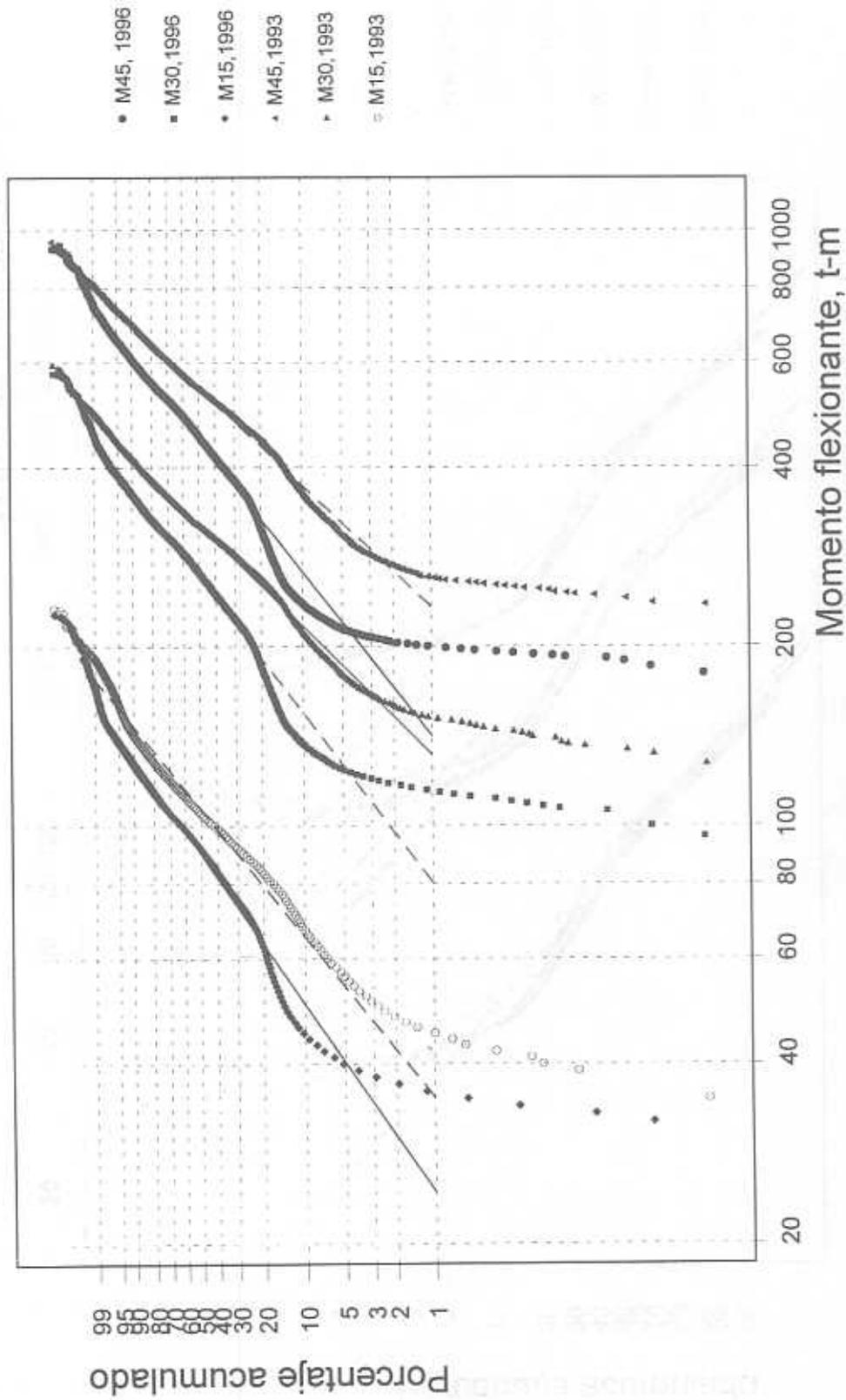


Fig. 6.24 Distribución de Weibull para momentos, T3-S3, 1993 y 1996

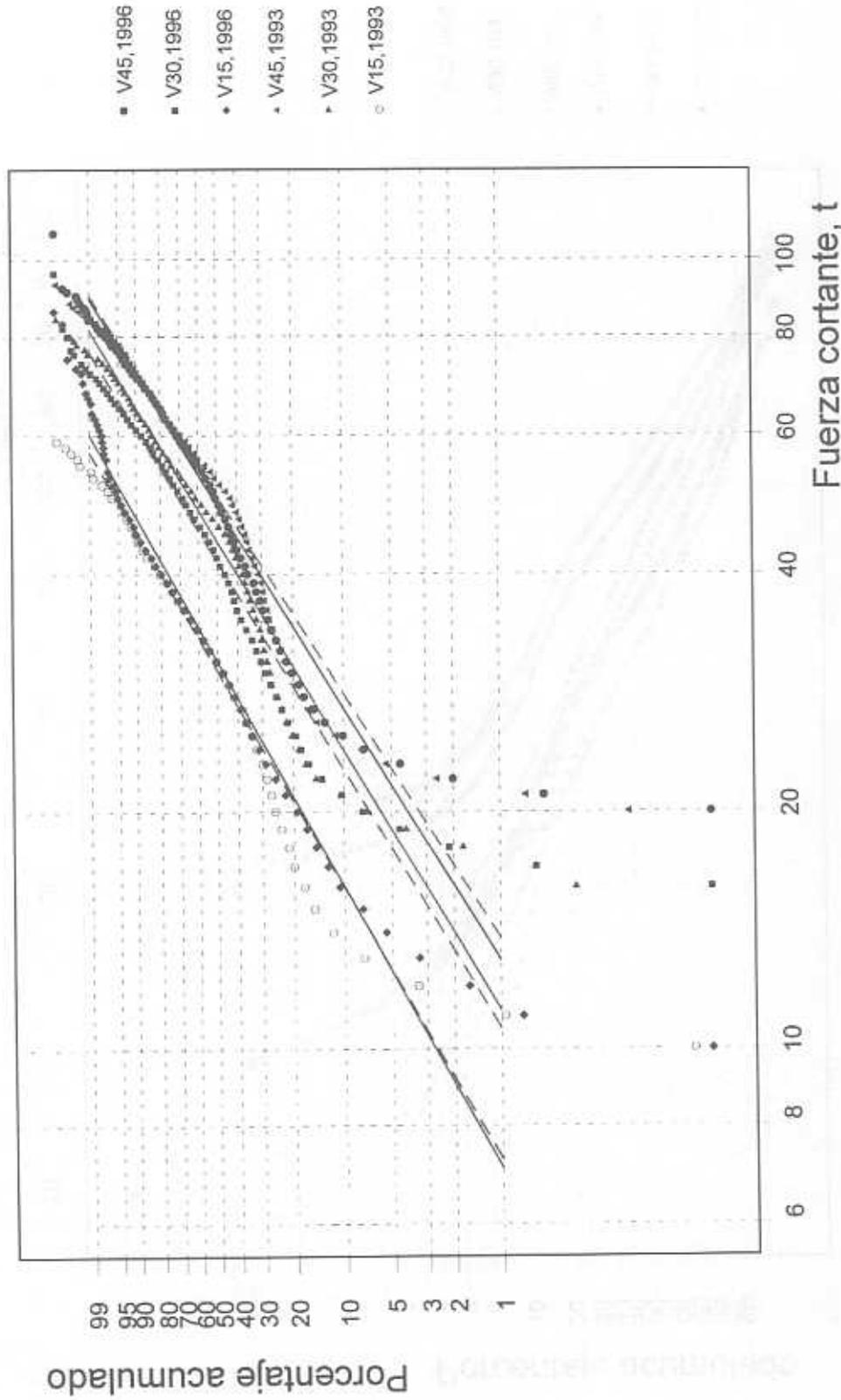


Fig. 6.25 Distribución de Weibull para fuerzas cortantes, T3-S2-R4, 1993 y 1996

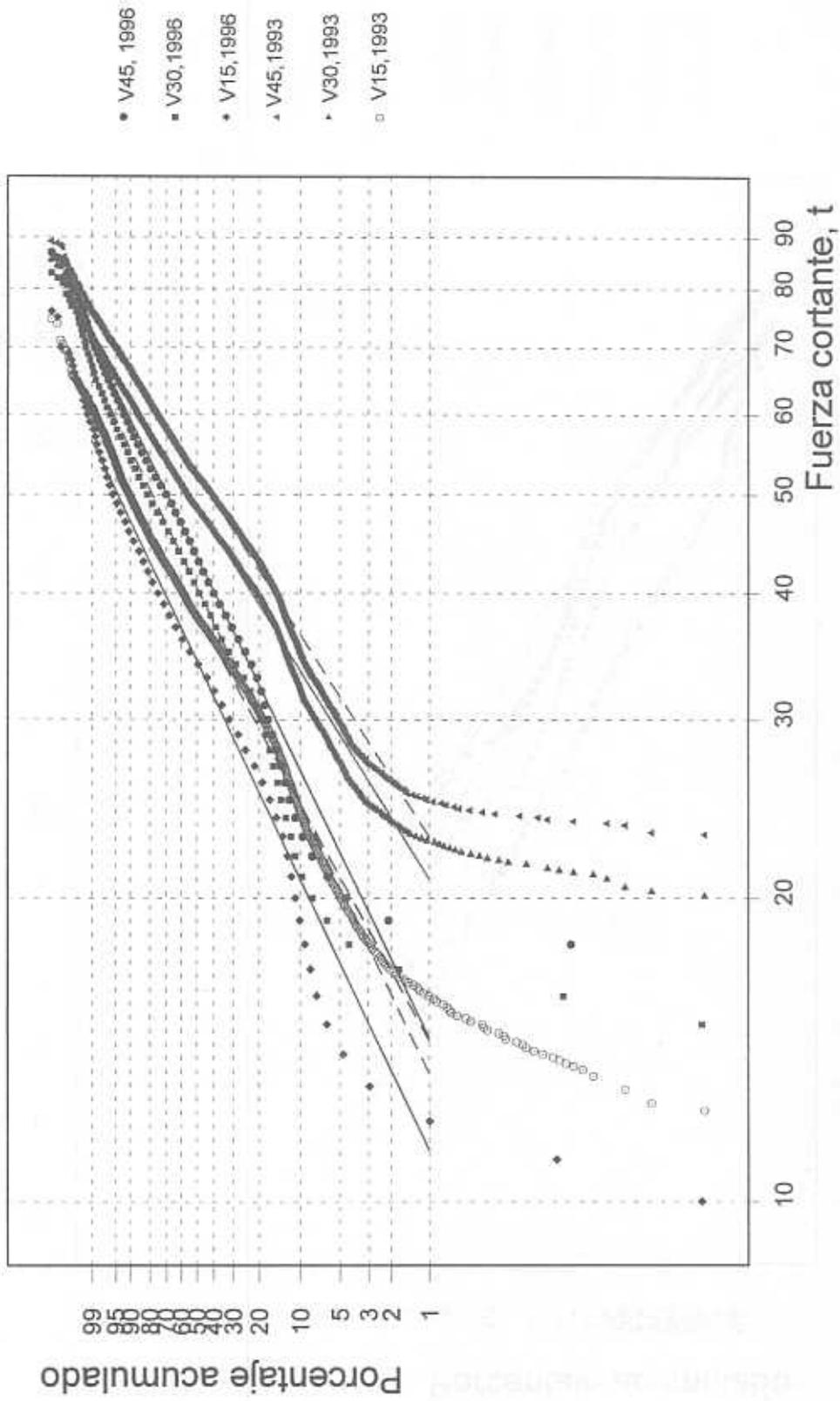


Fig. 6.26 Distribución de Weibull para fuerzas cortantes, T3-S3, 1993 y 1996

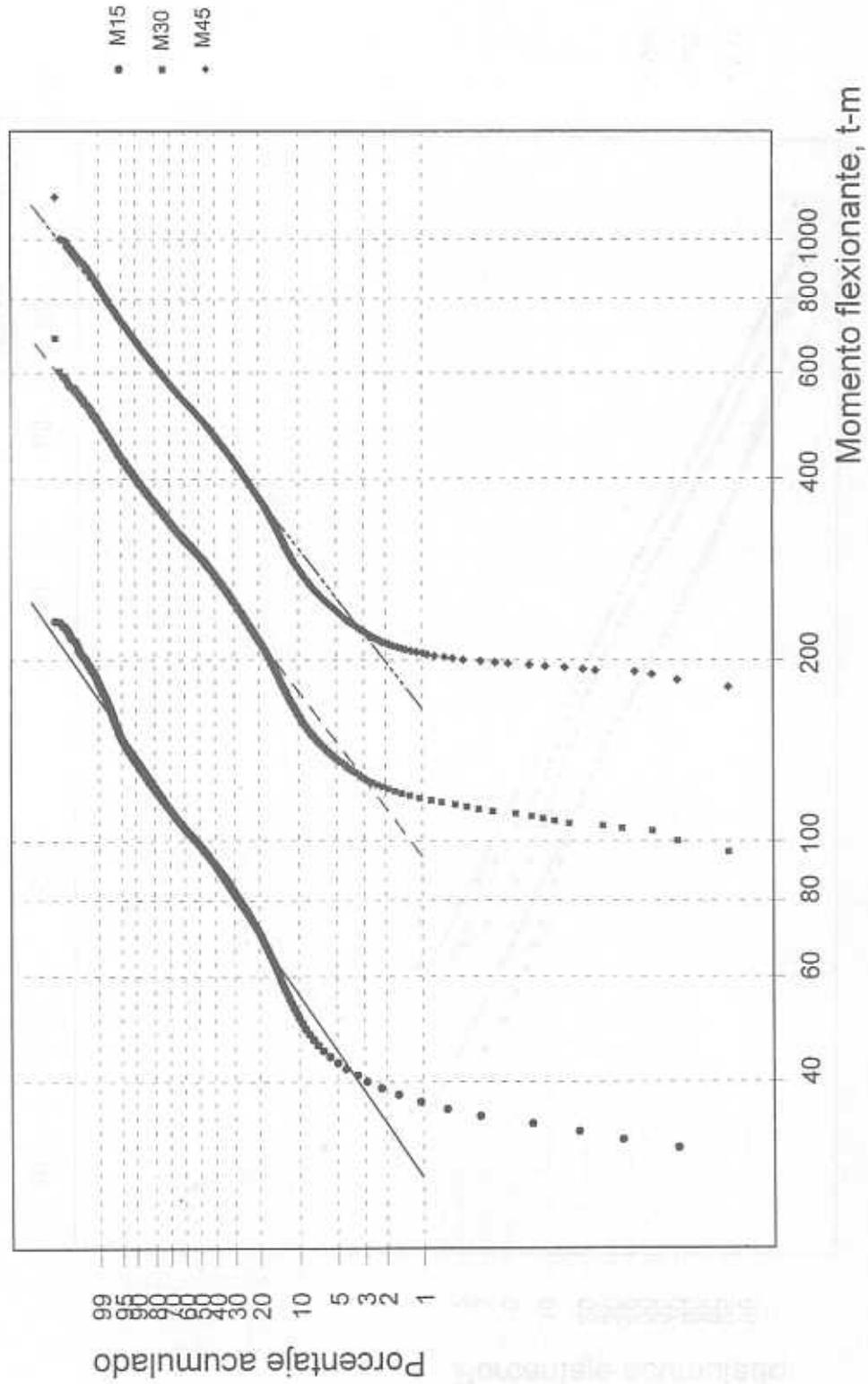


Fig. 6.27 Distribución de Weibull para momentos, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993 y 1996 juntos

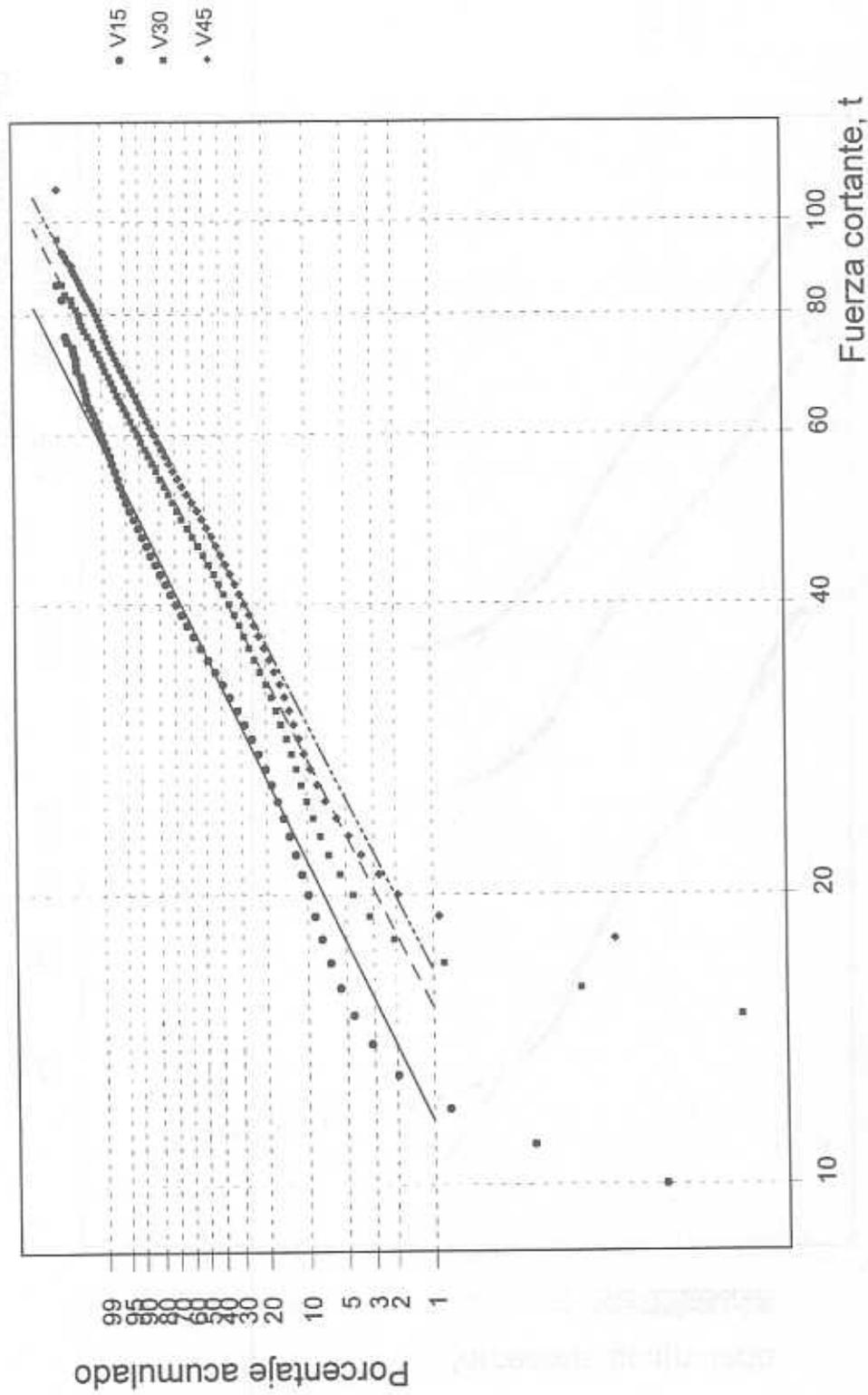


Fig. 6.28 Distribución de Weibull para cortantes, T3-S3 y T3-S2-R4, 1993 y 1996 juntos

probabilidad acumulada sobrestima a la frecuencia relativa acumulada. Se nota, asimismo, que en los casos de M30, M45, V30 y V45 queda un punto fuera de la secuencia en el extremo superior derecho; estos corresponden a los efectos que produce un vehículo tipo T3-S2-R4 que por suerte apareció en la muestra de 1996, y que hace patente que un vehículo así o, inclusive, otro que produzca mayores efectos puede presentarse aunque su probabilidad sea muy baja. Más adelante se validará el modelo para ver si cubre satisfactoriamente a los valores extremos que arrojan los vehículos T3-S2-R4 tomados como población estadística independiente.

Con el fin de proceder a verificar si el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas aquí propuesto, arroja elementos mecánicos que cubren satisfactoriamente a los **valores máximos esperados**, que resultan de calcularlos con las leyes de probabilidades ya determinadas, para una probabilidad de excedencia de 2.78×10^{-7} en 50 años, se procedió a la determinación de estos últimos, obteniéndose los resultados que se muestran en las figuras 6.29 y 6.30, para los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes, respectivamente, en las cuales se observa que los valores que arroja el modelo son ligeramente mayores que los esperados, por lo que el modelo propuesto es satisfactorio.

6.8.3 Validación utilizando los valores máximos que se predicen con las regresiones múltiples

Para validar en tercera instancia el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas, se calcularon los elementos mecánicos utilizando las ecuaciones (1) a (6) de las regresiones lineales múltiples que se obtuvieron en este trabajo. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos, notándose, en primer lugar, que éstos se parecen mucho a los valores calculados con el análisis probabilístico; en segundo lugar, se aprecia que los resultados de aplicar el modelo de cargas vivas superan ligeramente a los de las regresiones en todos los casos, por lo que quedan del lado de la seguridad, en el rango del 1.2 al 11.2 por ciento respecto a los valores más grandes predichos en cada caso marcado con sombra en la tabla.

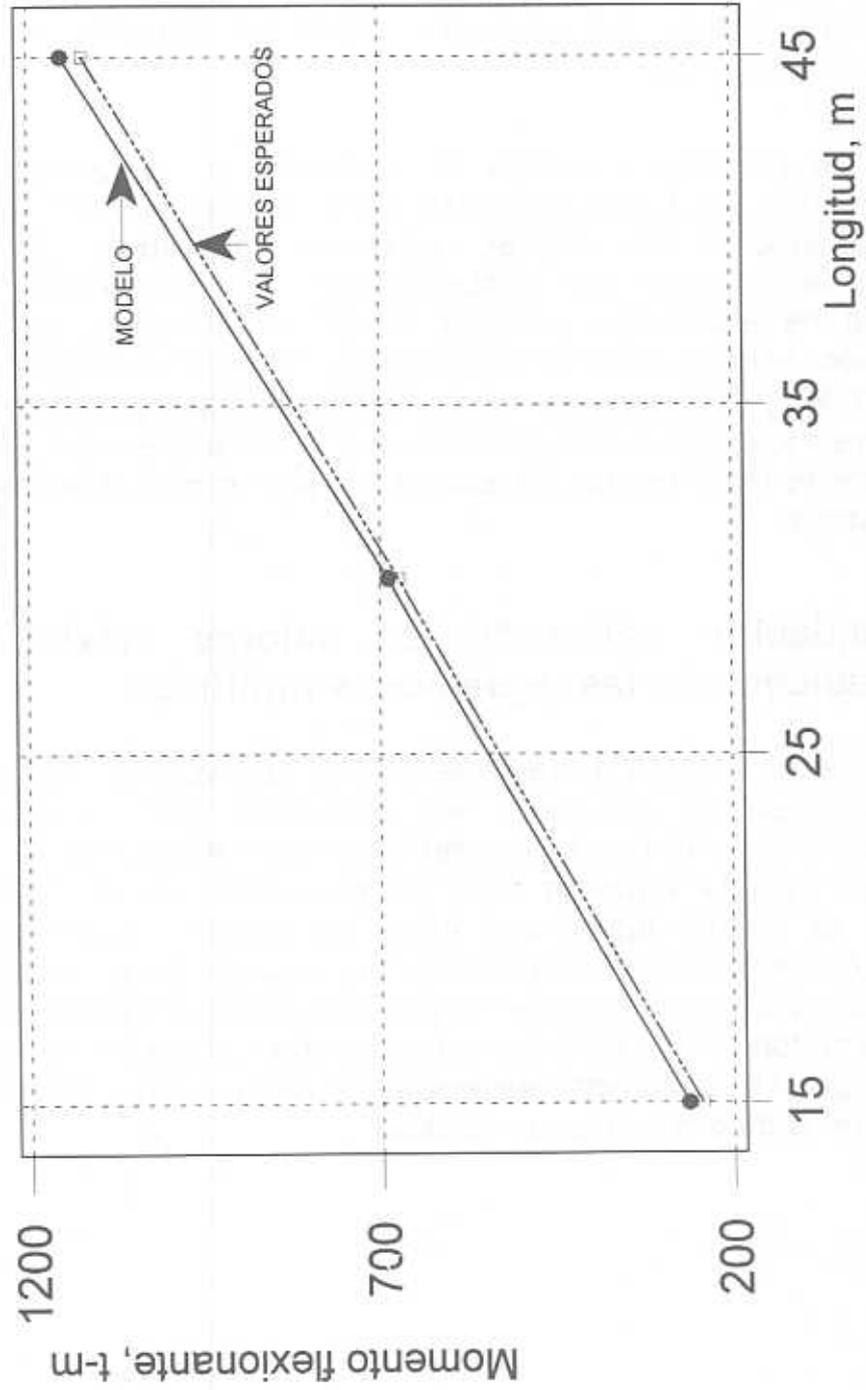


Fig. 6.29 Validación del modelo con valores esperados; momentos flexionantes

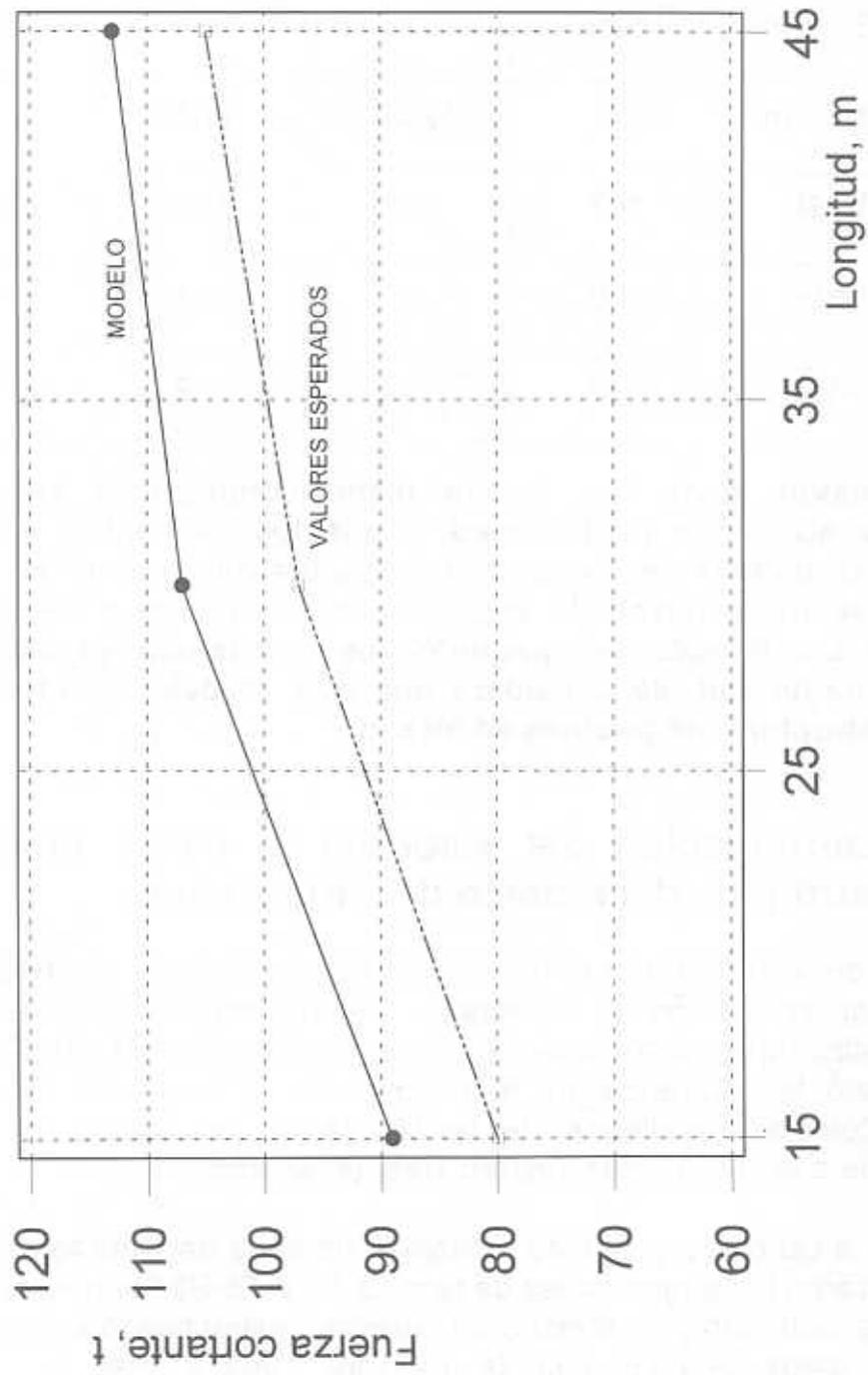


Fig. 6.30 Validación del modelo con valores esperados; fuerzas cortantes

Elemento mecánico	Predicción con regresión múltiple	Predicción con modelo probabilístico	Modelo de cargas vivas	Diferencia
M45, t-m	1138	1122	1152	1.2%
M30, t-m	679	673	688	1.3%
M15, t-m	231	245	264	7.8%
V45t	107	105	113	5.6%
V30t	100	97	107	7.0%
V15t	76	80	89	11.2%

En conclusión, dado que existe plena congruencia entre todos los resultados obtenidos hasta ahora, y que los elementos mecánicos que ocasiona el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas que aquí se ha desarrollado supera razonablemente a los reales y a los predichos, con riesgos muy pequeños de excedencia, es decir con un alto grado de seguridad, se considera que este modelo es adecuado para el análisis estructural de puentes en México.

6.9 Determinación del valor de la carga uniformemente distribuida del modelo de cargas vivas

Con el fin de incorporar en el modelo de cargas vivas la posibilidad de que en una línea de circulación de un puente transiten varios vehículos pesados a la vez, se realizó un proceso de simulación estocástica tipo Monte Carlo, en el cual se consideró la ocurrencia de tres vehículos consecutivos en una línea del tránsito. Con los resultados de la simulación se calcula el valor que le corresponde a la carga virtual uniformemente repartida.

Para llevar a cabo el proceso de selección aleatoria de cada tercia de vehículos, se consideraron las proporciones de tipo T3-S3 a T3-S2-R4 que se tuvieron en la muestra de cada año y se efectuó un muestreo estratificado sobre una colección parcial de datos de cada tipo de los años 1993 y 1996 por separado; los vehículos a muestrear fueron los 300 más pesados de los T3-S3 y los 200 más

pesados de los T3-S2-R4. El muestreo se realizó utilizando una tabla de números aleatorios para seleccionar en primer término el tipo y, en segundo, a cada vehículo que sería incorporado a cada secuencia de tres. Por ejemplo, con los datos de 1996, las proporciones de vehículos fueron de 0.85 para T3-S3 y 0.15 para T3-S2-R4.

Para realizar la simulación se generó el siguiente procedimiento:

1. Determinar aleatoriamente el tipo del primer vehículo de cada secuencia de tres.
2. Determinar aleatoriamente el vehículo correspondiente al tipo seleccionado.
3. Repetir los pasos 1 y 2 para el segundo vehículo y luego para el tercero de cada terna. Para cada año se sacaron 66 ternas de vehículos.
4. Calcular la probabilidad de excedencia que le corresponde a cada vehículo seleccionado, utilizando su valor de PT2 y la ley de probabilidades de la variable aleatoria PT2, para con ellas obtener la probabilidad de excedencia simultánea de los tres que componen cada terna. Considerando que la excedencia en cada vehículo es independiente de la excedencia en los otros dos de cada terna, la probabilidad de que los tres de la secuencia excedan los valores de PT2 que cada uno tiene, es el producto de las tres probabilidades.
5. Para los vehículos de cada terna 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. Para hacer esto, se desarrolló una subrutina de cómputo que se integró al sistema MCmax.
6. Para cada longitud de puente, trazar las gráficas de los momentos y cortantes máximos, versus el logaritmo base 10 de la probabilidad de ocurrencia de cada terna de vehículos, y calcular las rectas de regresión correspondientes, ya que se encontró una regular correlación lineal de cada tipo de elemento mecánico con dicho logaritmo.
7. Para la probabilidad de no excedencia en 50 años, igual a la que se usó para los vehículos individuales en la muestra globalizada, determinar, para cada longitud de puente, los valores del momento y del cortante máximos, utilizando las ecuaciones de las rectas de regresión

correspondientes y sumándole, a cada uno, la mitad del intervalo de predicción asociado al 95% de nivel de confianza.

8. Para cada longitud de puente, calcular el valor de la carga uniformemente distribuida, w , que produce a cada elemento mecánico máximo y seleccionar el más grande de todos ellos.

Al realizar los pasos 1 a 6 se obtuvieron las gráficas, ecuaciones de regresión, intervalos de predicción del 95% y coeficientes de correlación que se muestran en las figuras 6.31 a 6.38, en las que se incluyen los 132 casos simulados para los dos años de muestreo. En todas ellas se observa que existe una regular regresión lineal entre cada par de variables involucradas, con coeficientes de correlación que varían entre 59 y 70%.

En la siguiente tabla se presentan los elementos mecánicos que se calcularon con el criterio señalado en el punto 7 del procedimiento.

Longitud, m	Momento, t-m	Cortante, t
15	237	72
30	731	113
45	1526	150
60	2542	177

6.9.1 Determinación del valor de w

Para calcular el valor de w 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 3m), la velocidad que llevan es baja y, por tanto, 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 (estos criterios también se aplican en el reglamento de la AASHTO).

Por otra parte, para el sistema de cargas concentradas del modelo, se utiliza aquí el mismo factor de impacto de la AASHTO, que es 1.33.

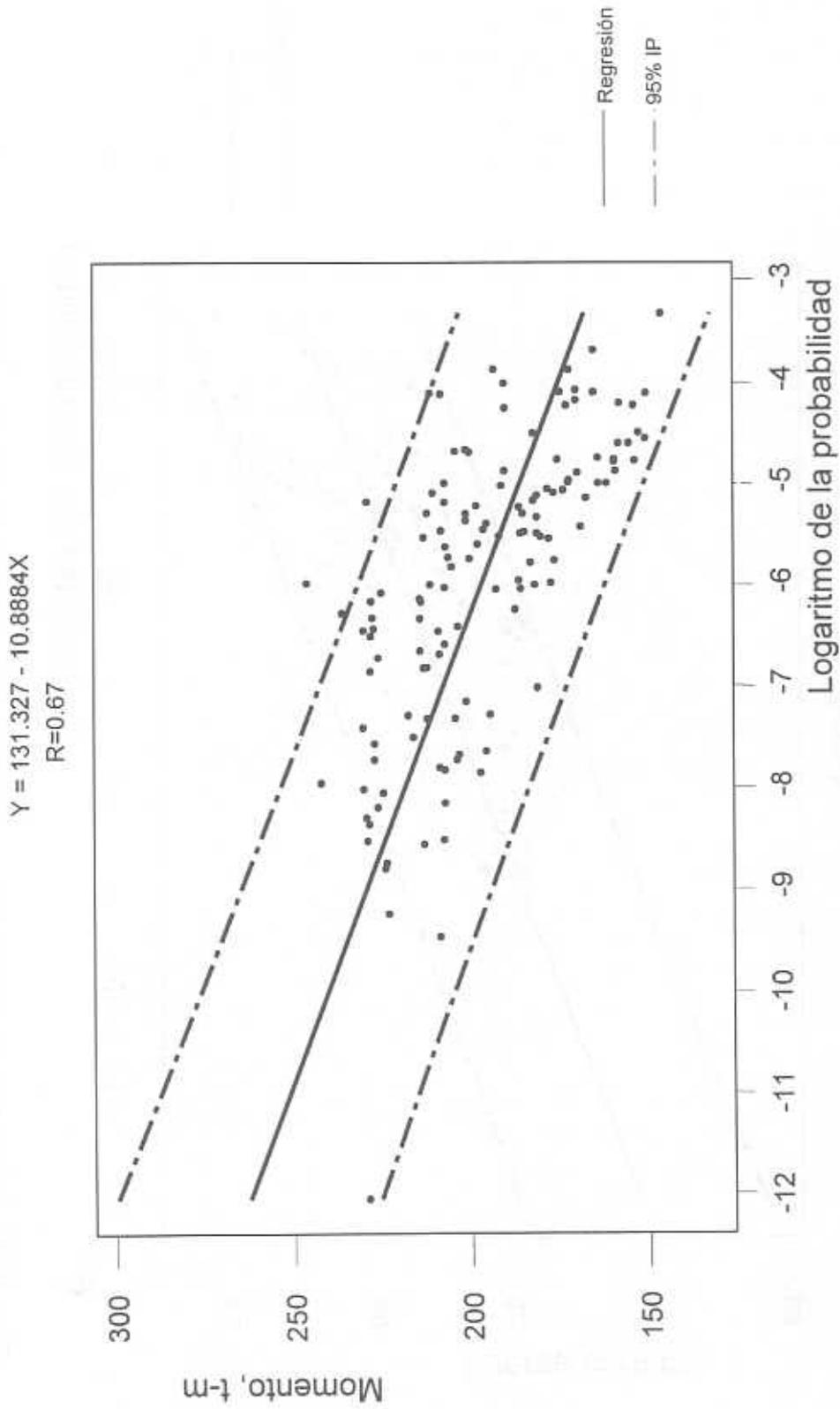


Fig. 6.31 Momentos flexionantes por secuencias de vehículos, 1993 y 1996; L=15m

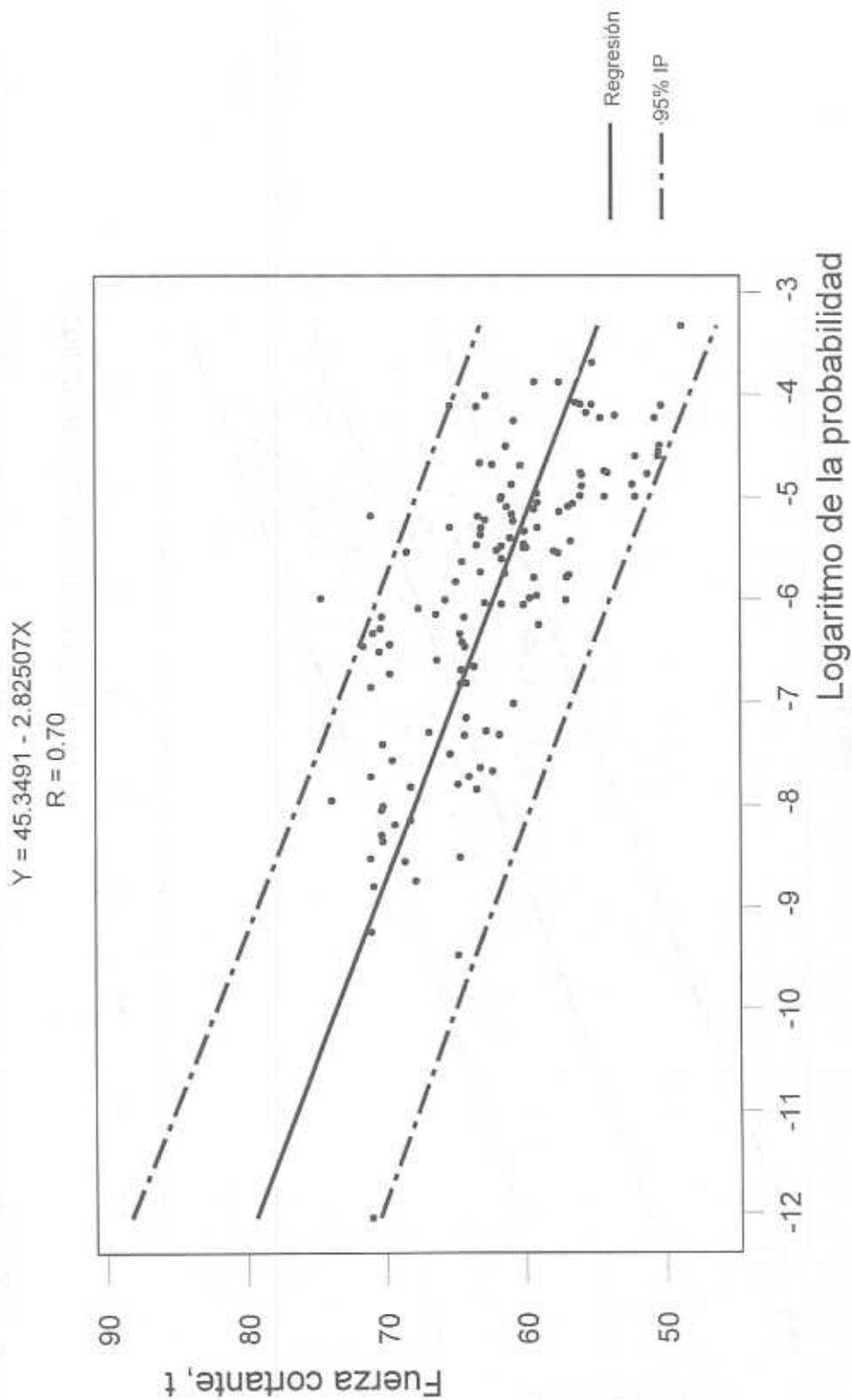


Fig. 6.32 Fuerza cortante por secuencias de vehículos, 1993 y 1996; L=15 m

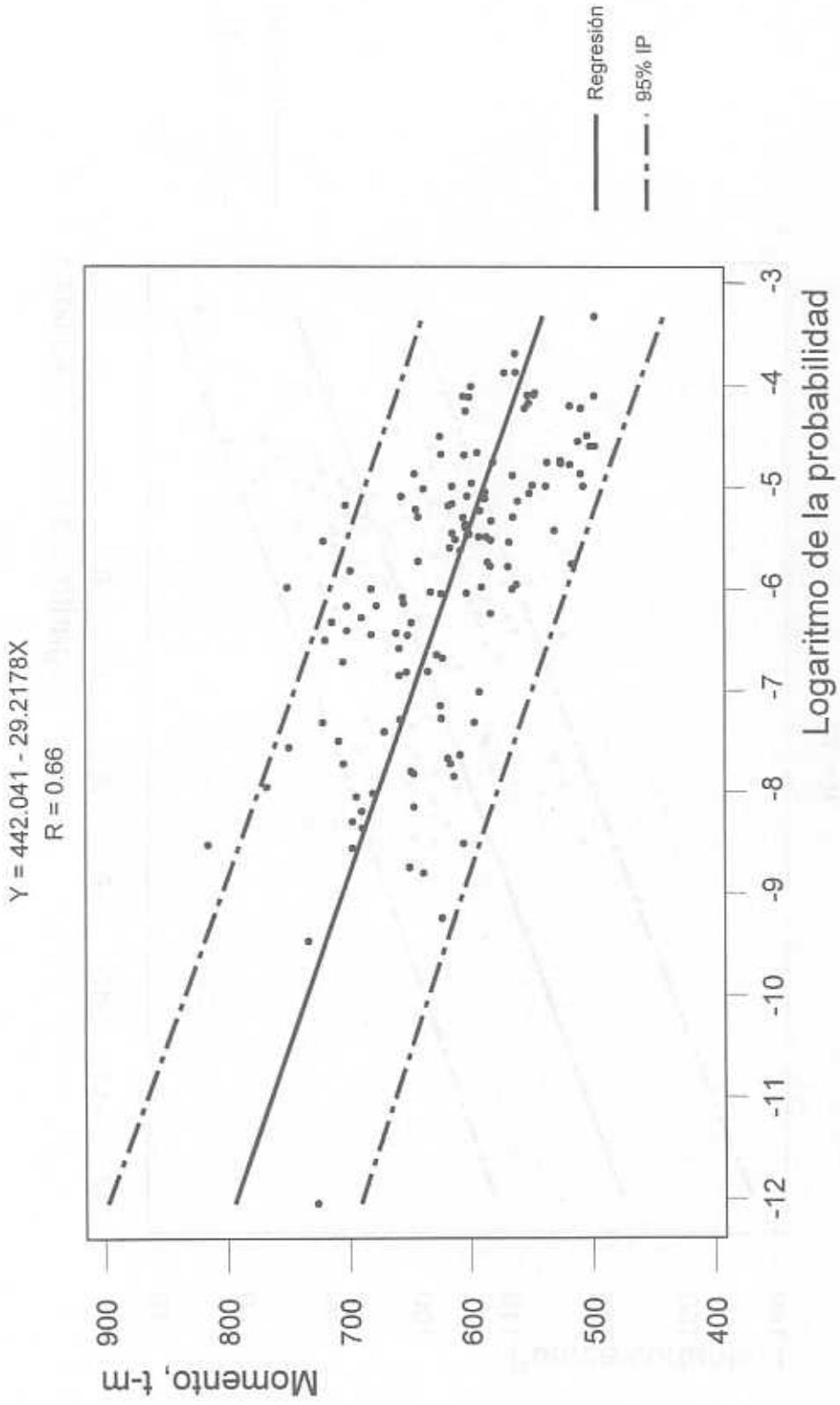


Fig. 6.33 Momentos flexionantes por secuencias de vehículos, 1993 y 1996; L=30 m

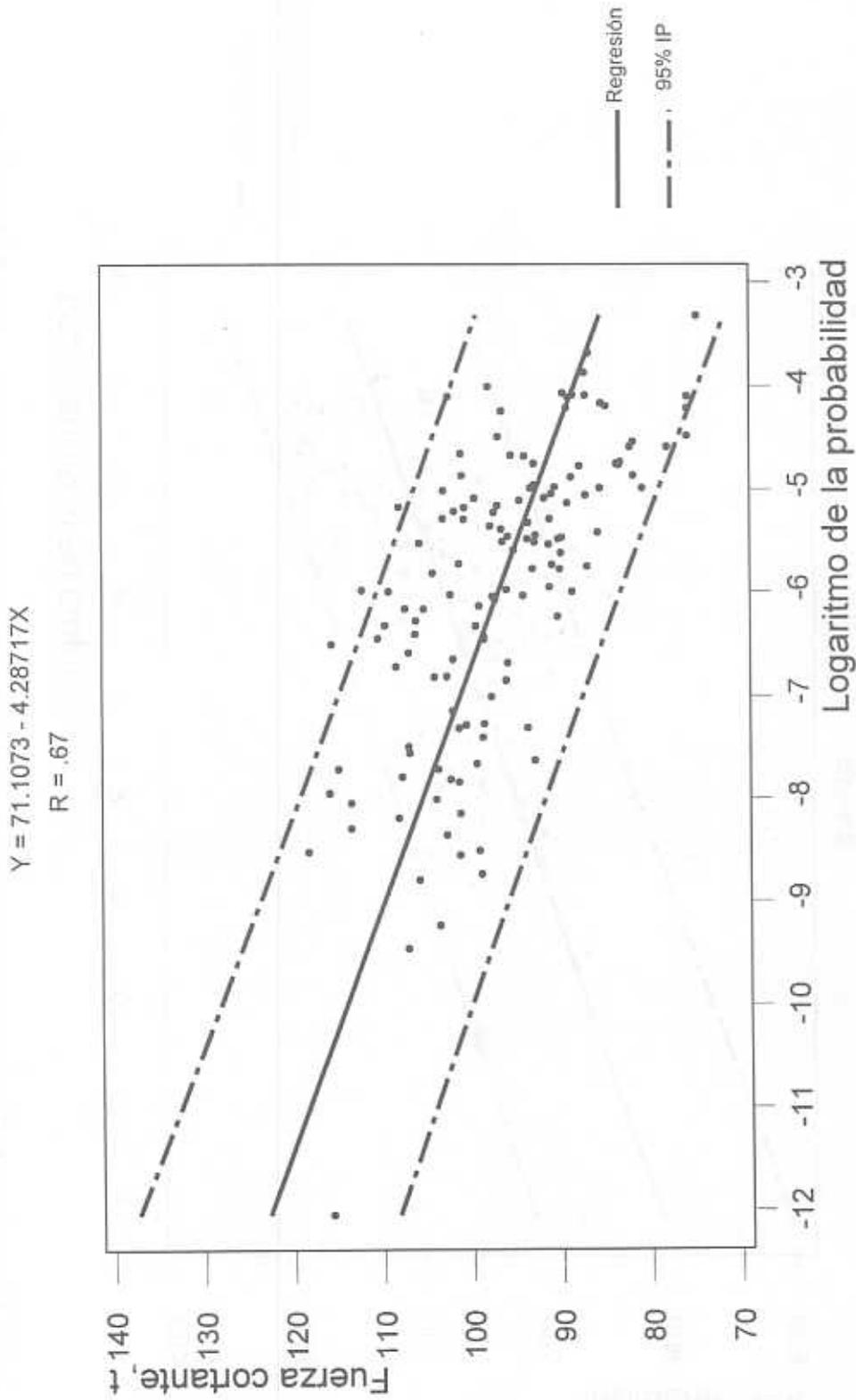


Fig. 6.34 Fuerza cortante por secuencias de vehículos, 1993 y 1996; L=30 m

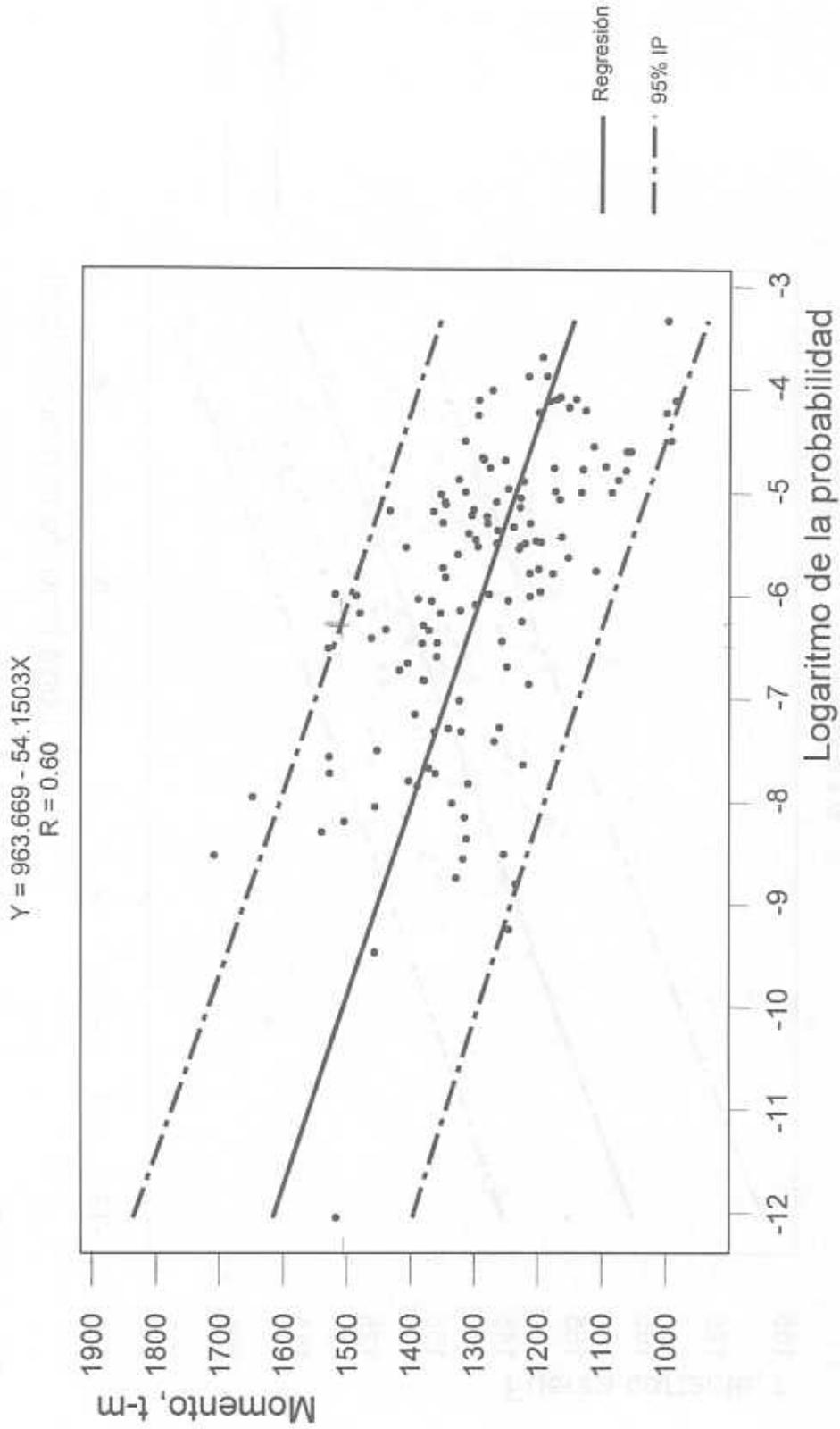


Fig. 6.35 Momentos flexionantes por secuencias de vehículos, 1993 y 1996; L=45 m

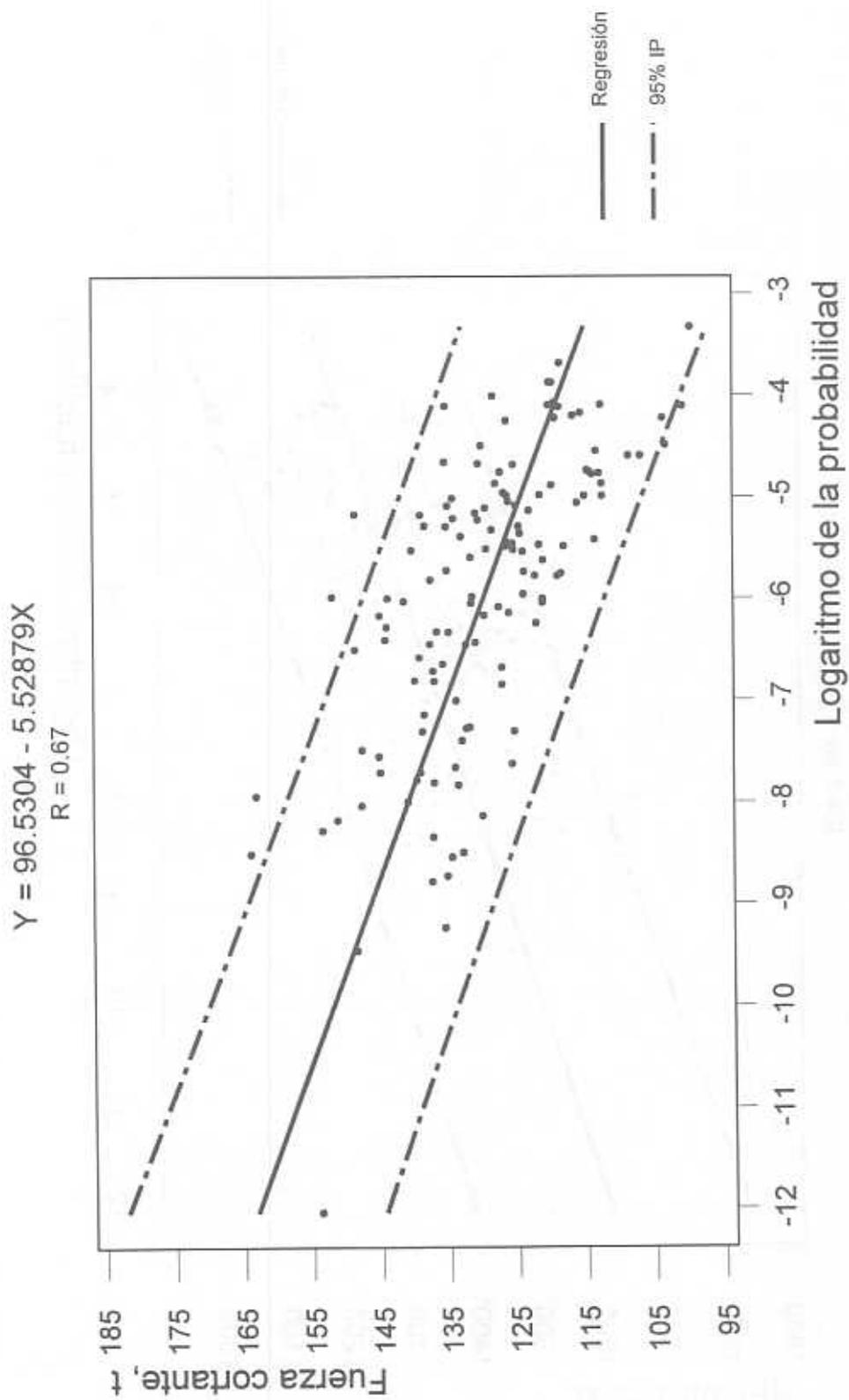


Fig. 6.36 Fuerza cortante por secuencias de vehículos, 1993 y 1996; L=45 m

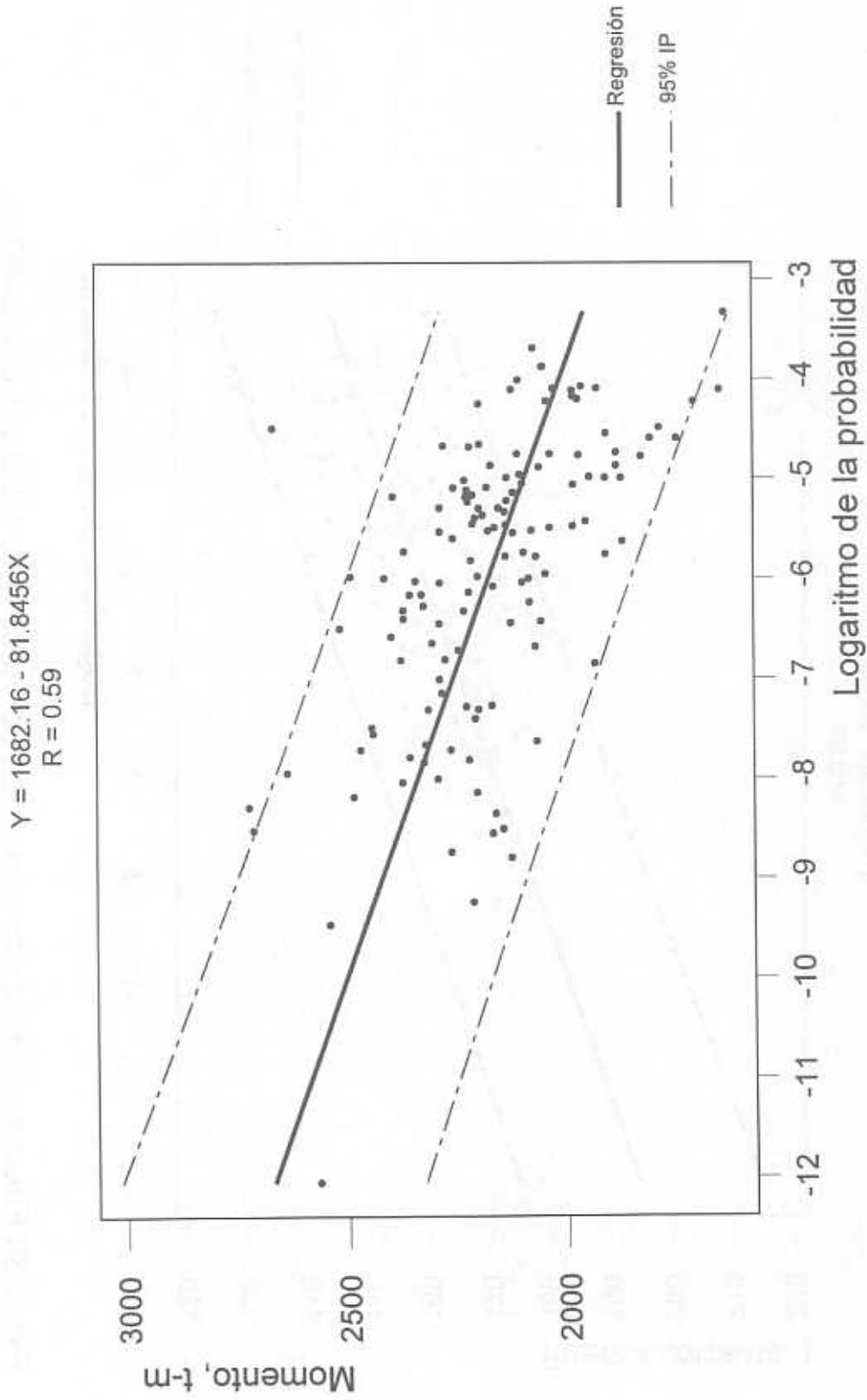


Fig. 6.37 Momentos flexionantes por secuencias de vehículos, 1993 y 1996; L=60m

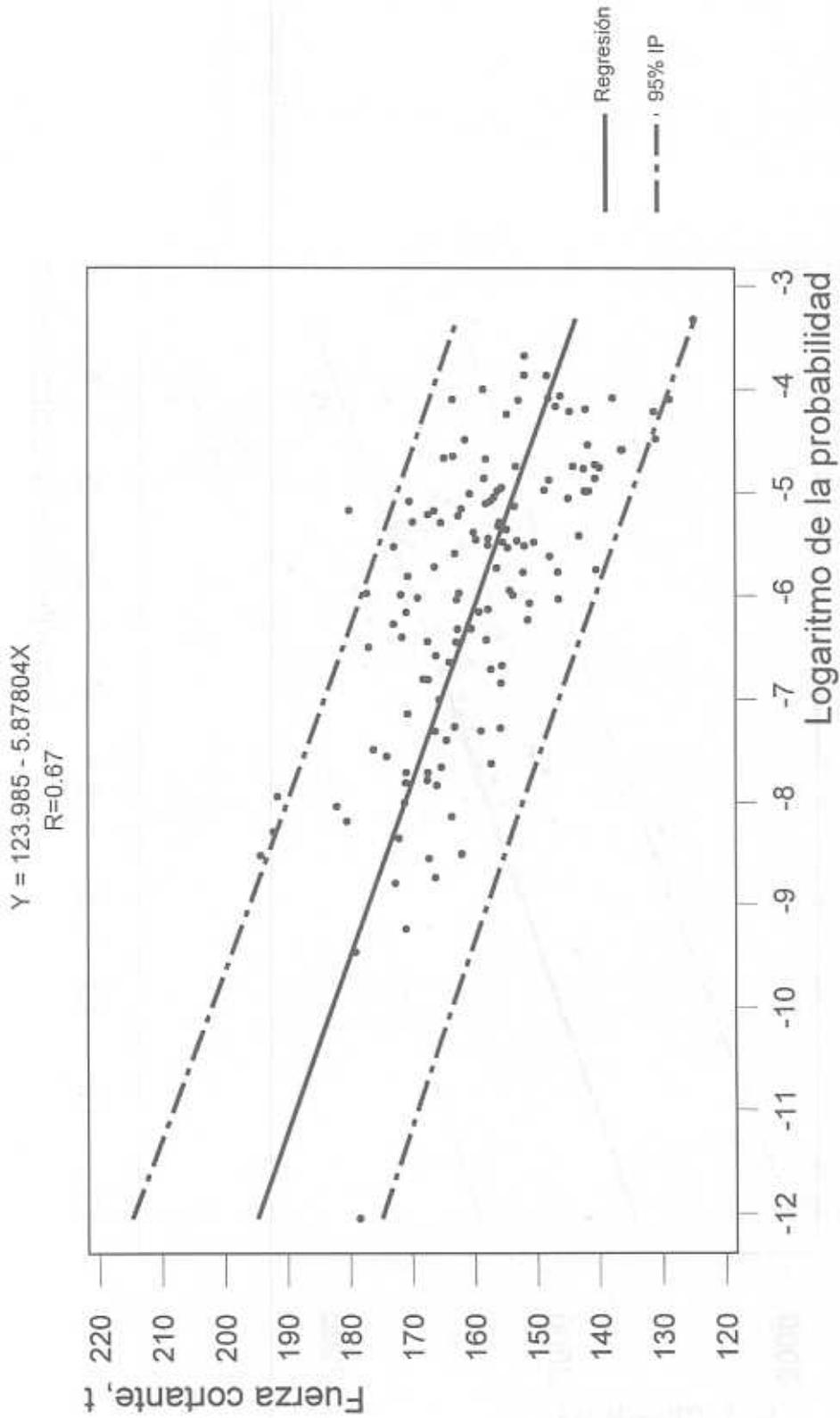


Fig. 6.38 Fuerza cortante por secuencia de vehículos, 1993 y 1996; L=60 m

Sean M_m y V_m los símbolos para denotar a los momentos flexionantes y a las fuerzas cortantes que produce la carga uniformemente distribuida, ω , y M_p y V_p los que denotan a los mismos elementos mecánicos, pero producidos por el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas. Al igualar el momento máximo total, M_T , producido por la secuencia de vehículos con la suma de los dos anteriores se obtiene:

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

Por tanto,

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

Al aplicar el sistema de cargas concentradas del modelo en un puente simplemente apoyado de 60m, que resultó ser el caso más desfavorable, y después multiplicar el momento flexionante máximo que le ocasiona por los factores de carga viva (1.9) y de impacto (1.33), se obtiene que $M_{60} = 2153\text{t}\cdot\text{m}$. Por tanto, con la ecuación (8) resulta que $\omega = 8(2542-2153)/3600 = 0.86 \text{ t/m}$.

Con el propósito de que los elementos mecánicos que producen las cargas concentradas y la uniformemente distribuida del modelo, se amplifiquen multiplicando su suma por el mismo factor de carga, el valor de ω antes calculado se divide entre 1.9, lo cual da $\omega = 0.46 \text{ t/m}$, que redondeado a una decimal es $\omega = 0.5\text{t/m}$.

En las figuras 6.39 y 6.40 se muestran las poligonales que resultan al aplicar el modelo total de cargas vivas, y se comparan con las que resultan de utilizar solamente el sistema de cargas concentradas del mismo, en puentes hasta de 60m; las diferencias entre ellas, medidas en la escala vertical, corresponden a las contribuciones de la carga uniformemente repartida.

Aunque la inmensa mayoría de los puentes simplemente apoyados tienen claros de menos de 60m, por lo que con lo desarrollado hasta aquí se cubren casi todos los casos prácticos, a continuación se presenta una serie de cálculos que conducen a proponer lo necesario para que se agregue un elemento que permite la aplicación del modelo de cargas vivas para claros hasta de 90m.

Como primer paso, se verificó si el sistema de cargas concentradas cubre satisfactoriamente a los resultados de extrapolar los valores predichos, de los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes, que se calcularon con el análisis probabilístico de riesgos de excedencia, mismos que se obtuvieron para longitudes de puentes de 15, 30 y 45m. En la figura 6.41 se presentan los

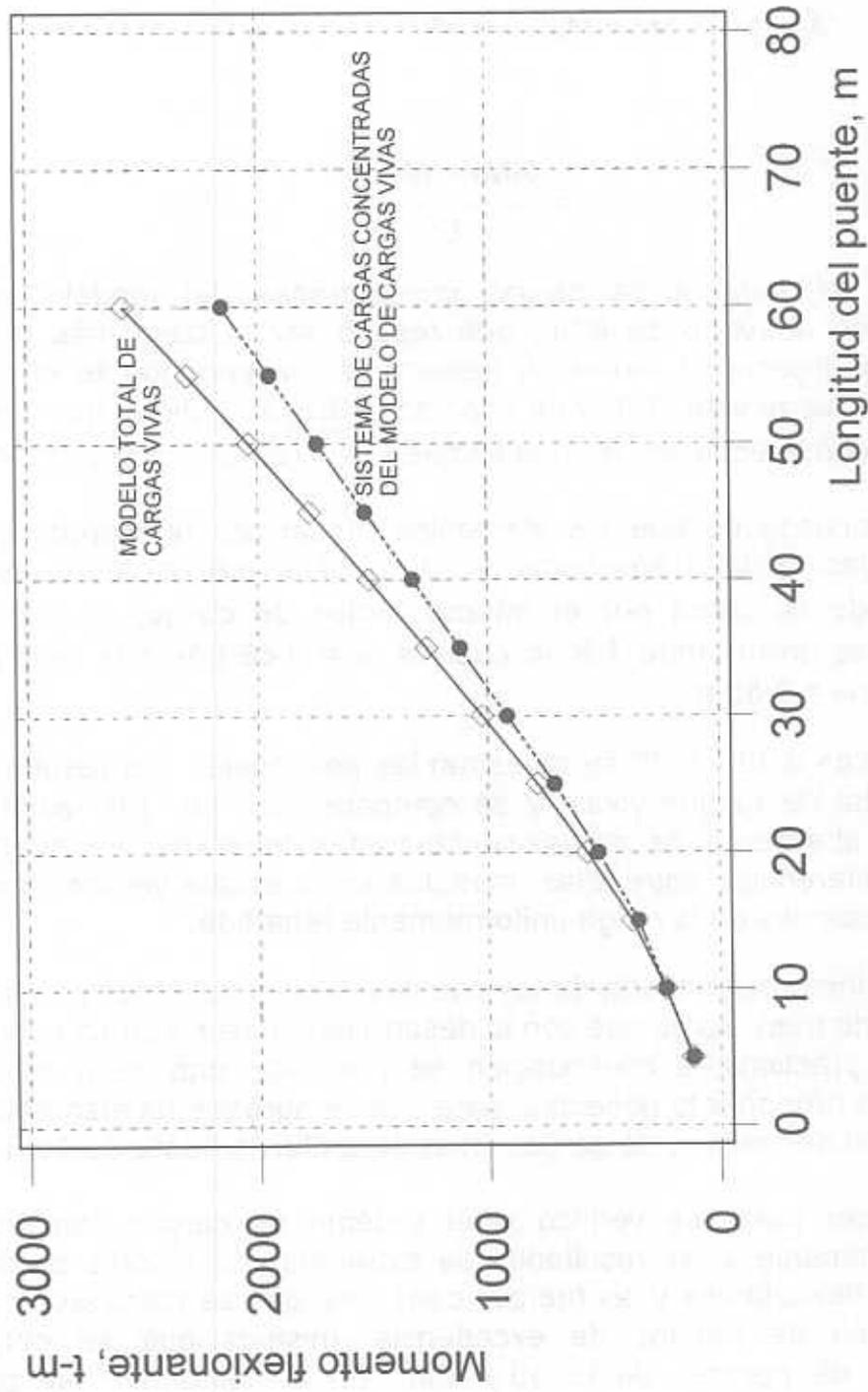


Fig. 6.39 Comparación de momentos con modelo total y cargas concentradas

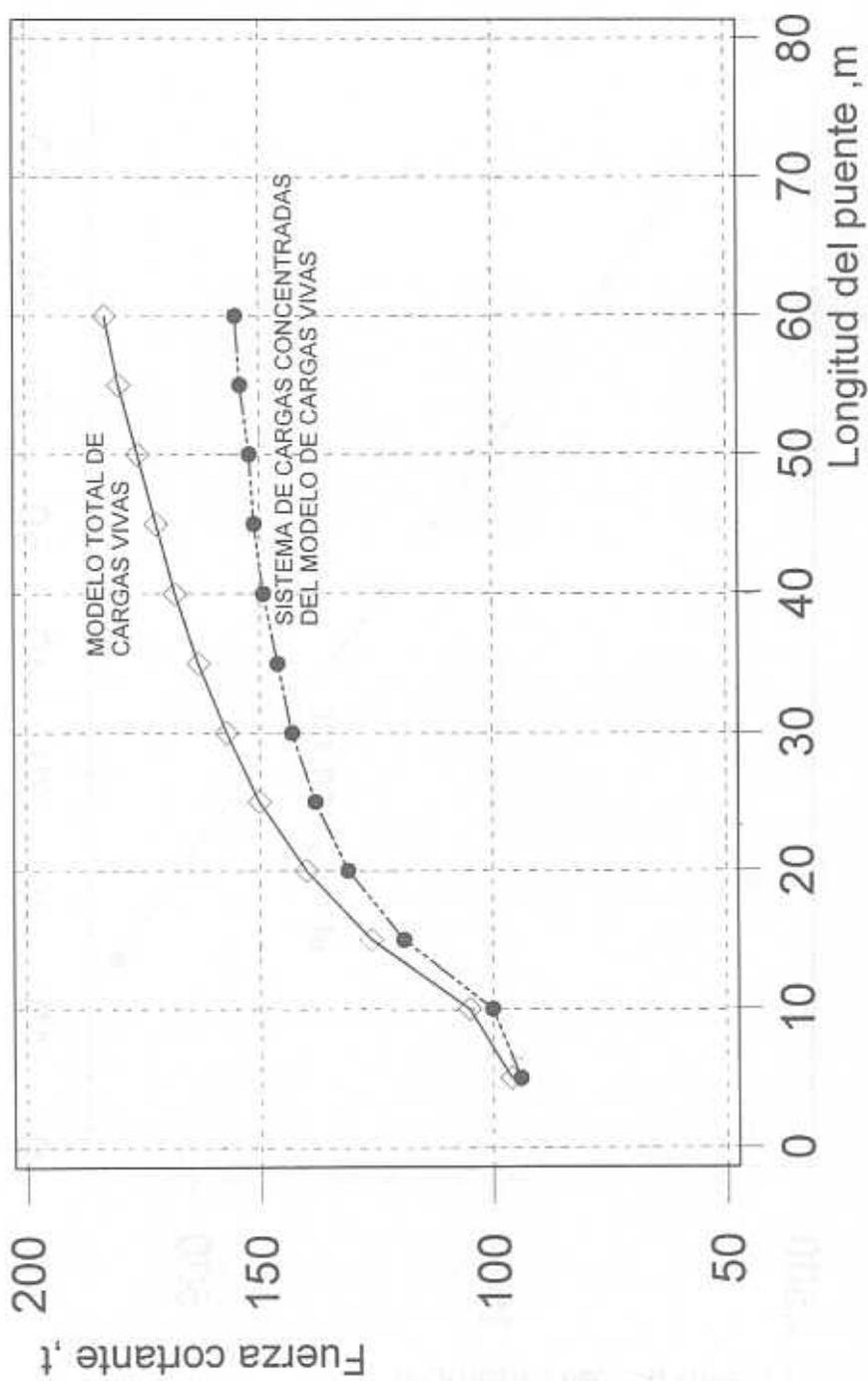


Fig. 6.40 Comparación de cortantes con modelo total y cargas concentradas

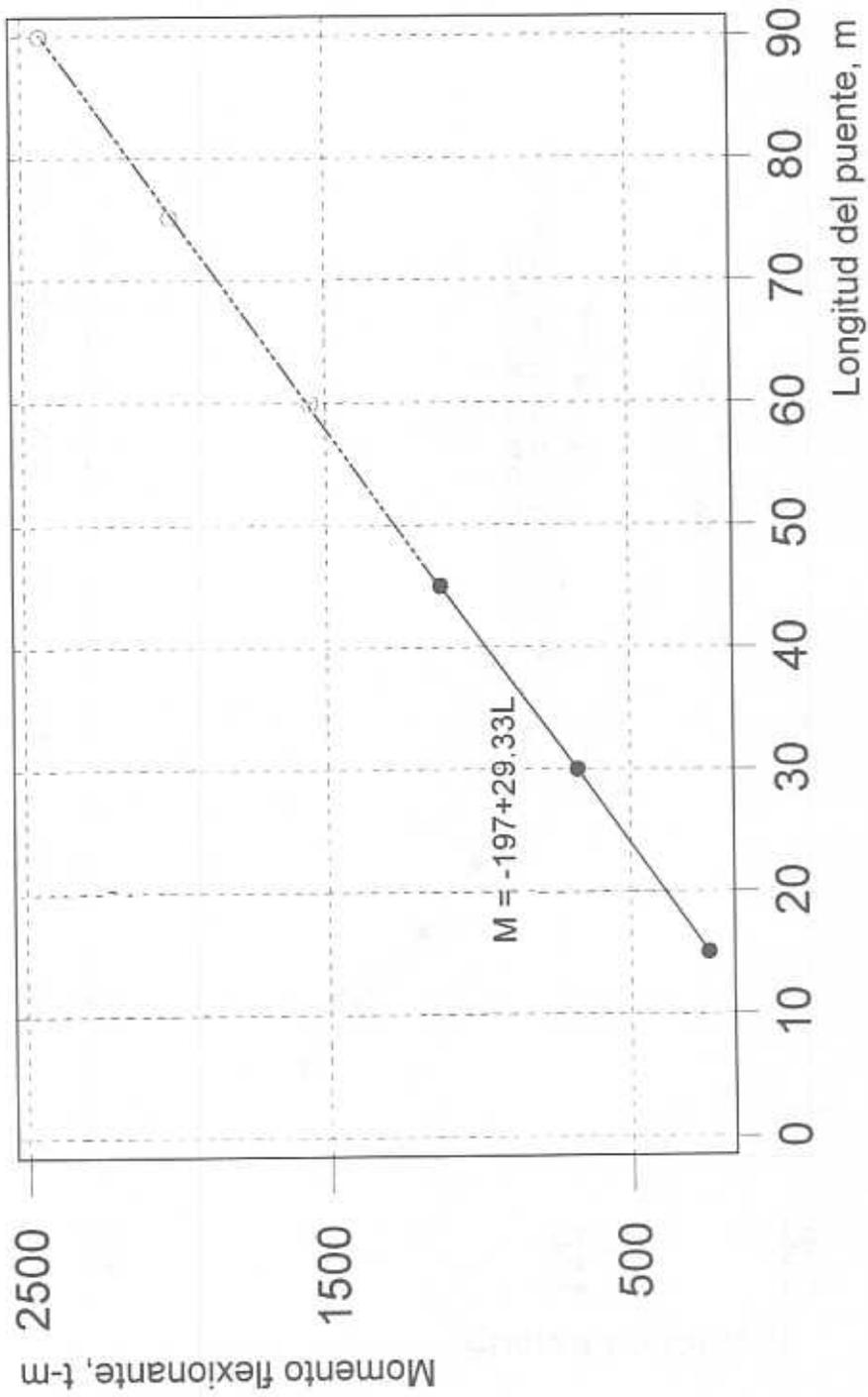


Fig. 6.41 Ajuste y extrapolación de momentos; sistema de cargas concentradas del modelo

momentos que se predicen con el modelo probabilístico; en ella se observa que una línea recta cuya ecuación es:

$$M = -197 + 29.33L$$

se ajusta muy bien a la secuencia de puntos; con línea semipunteada se tiene marcada la extrapolación gráfica.

Por su parte, en la figura 6.42 se presentan las fuerzas cortantes que se predicen con el modelo probabilístico; en ella se observa un buen ajuste de una curva logarítmica de ecuación:

$$V = 18.15 + 52.84 \log L$$

En la siguiente tabla se comparan los valores que se predicen con las dos ecuaciones anteriores, multiplicados por el factor de impacto, con los que resultan de aplicar el sistema de carga concentradas del modelo que aquí se propone, M_p y V_p .

L	1.33M	1.33V	M_p	V_p
60	2079	149	2154	155
75	2664	156	2776	157
90	3249	161	3400	159

Al comparar entre sí los momentos flexionantes, se observa que los del modelo superan razonablemente, entre 3.6 y 4.6% a los esperados. En el caso de las fuerzas cortantes, las diferencias también son pequeñas, y van del 4 al -1.3%. Por tanto, se concluye que el sistema de cargas concentradas reproduce muy bien los valores esperados para claros hasta de 90m.

Como segundo paso, se procede a estimar, mediante extrapolaciones, a los momentos y cortantes máximos que producirían las secuencias de vehículos utilizados en la simulación estocástica realizada para calcular el valor de la carga uniformemente distribuida, w , que se incluye en el modelo de cargas vivas que aquí se propone.

En las figuras 6.43 y 6.44 se presentan las curvas de segundo grado que se obtuvieron como ajustes a los momentos y cortantes, respectivamente. En ambas se observa que las curvas se ajustan muy bien y sus ecuaciones son:

$$M = -22.75 + 8.47L + 0.57 L^2$$

$$V = -22.5 + 3.51 L - 0.0156L^2$$

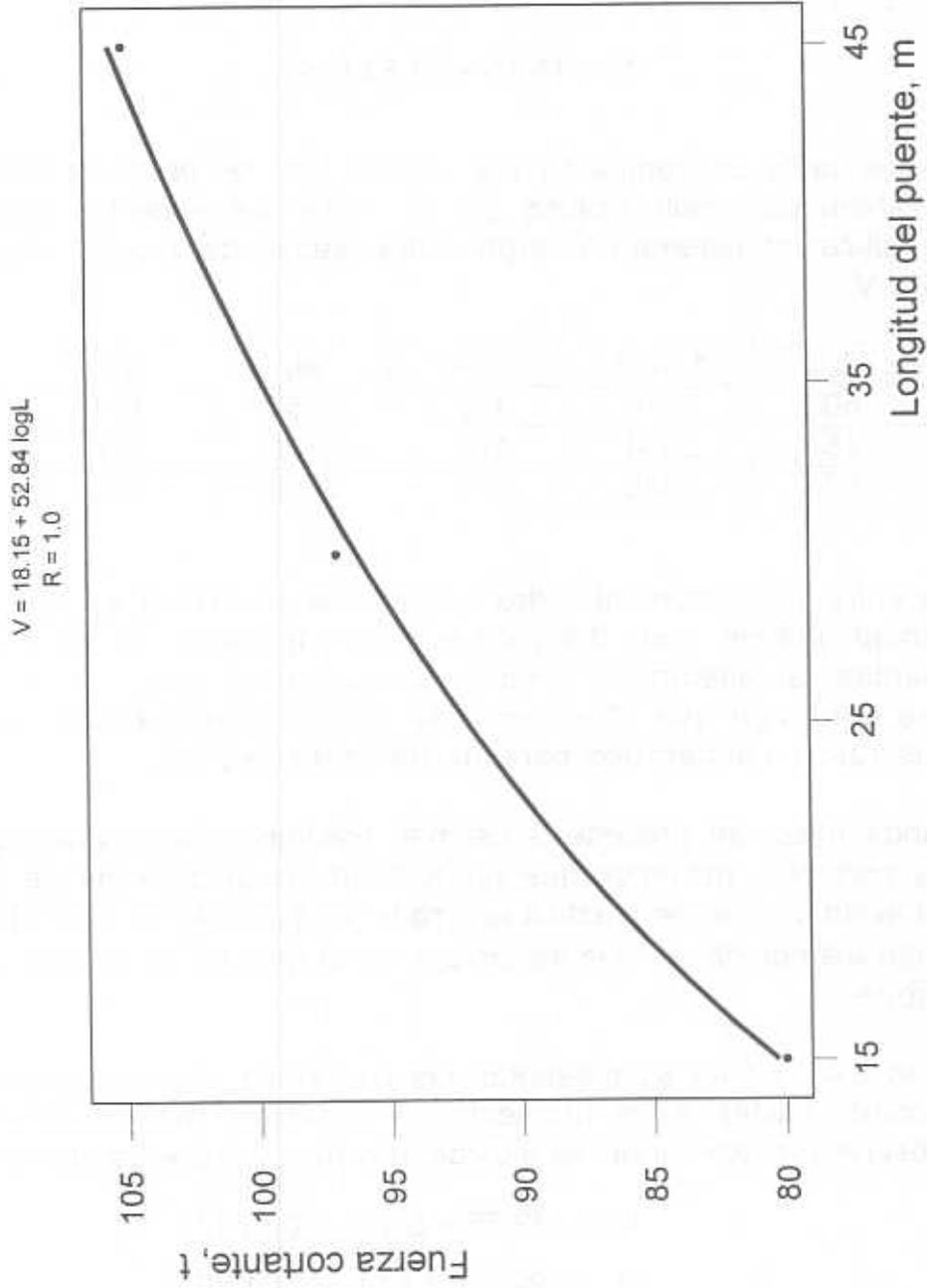


Fig. 6.42 Ajuste de fuerzas cortantes; sistema de cargas concentradas del modelo

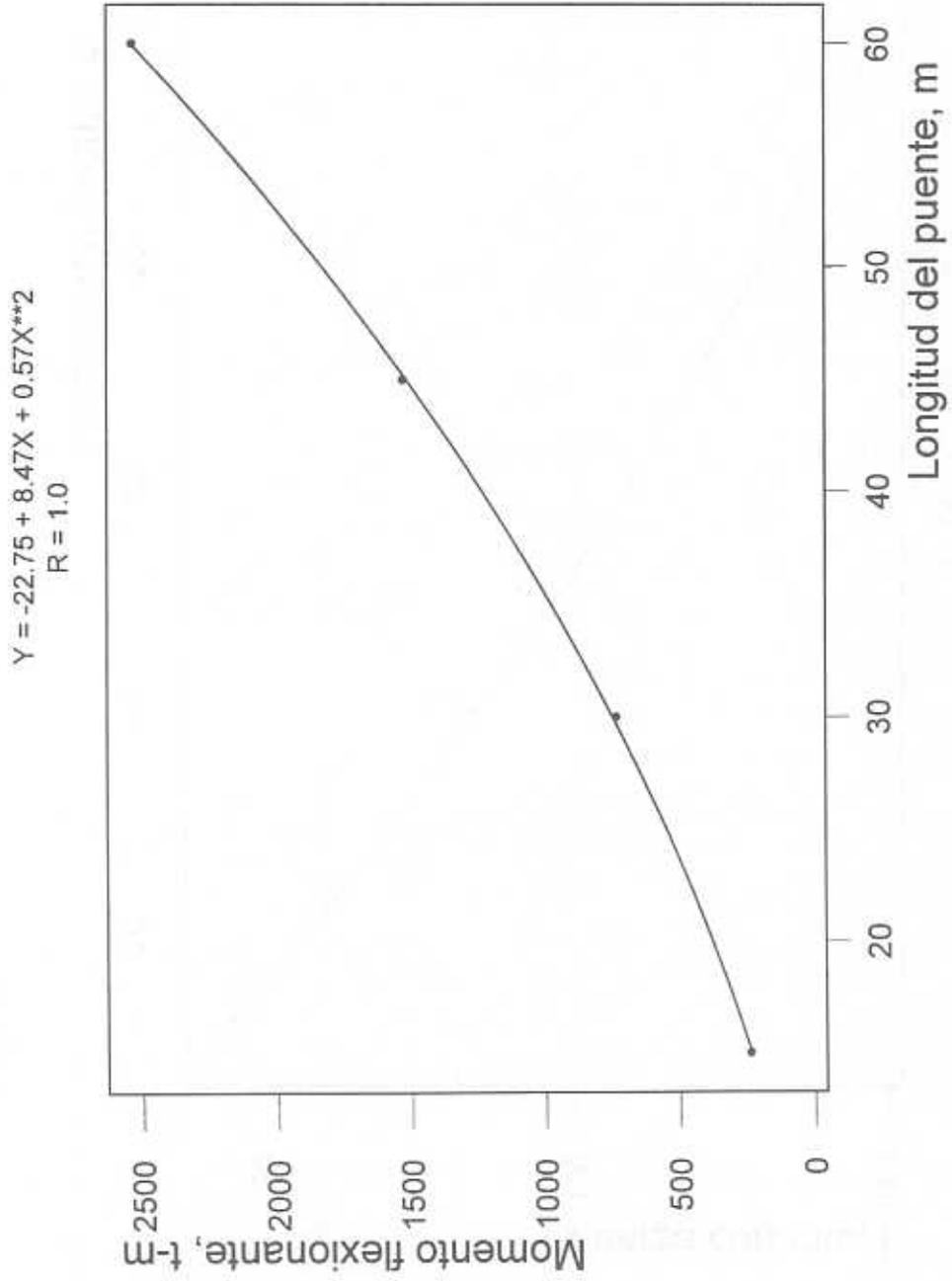


Fig. 6.43 Momentos flexionantes máximos por secuencias de vehículos

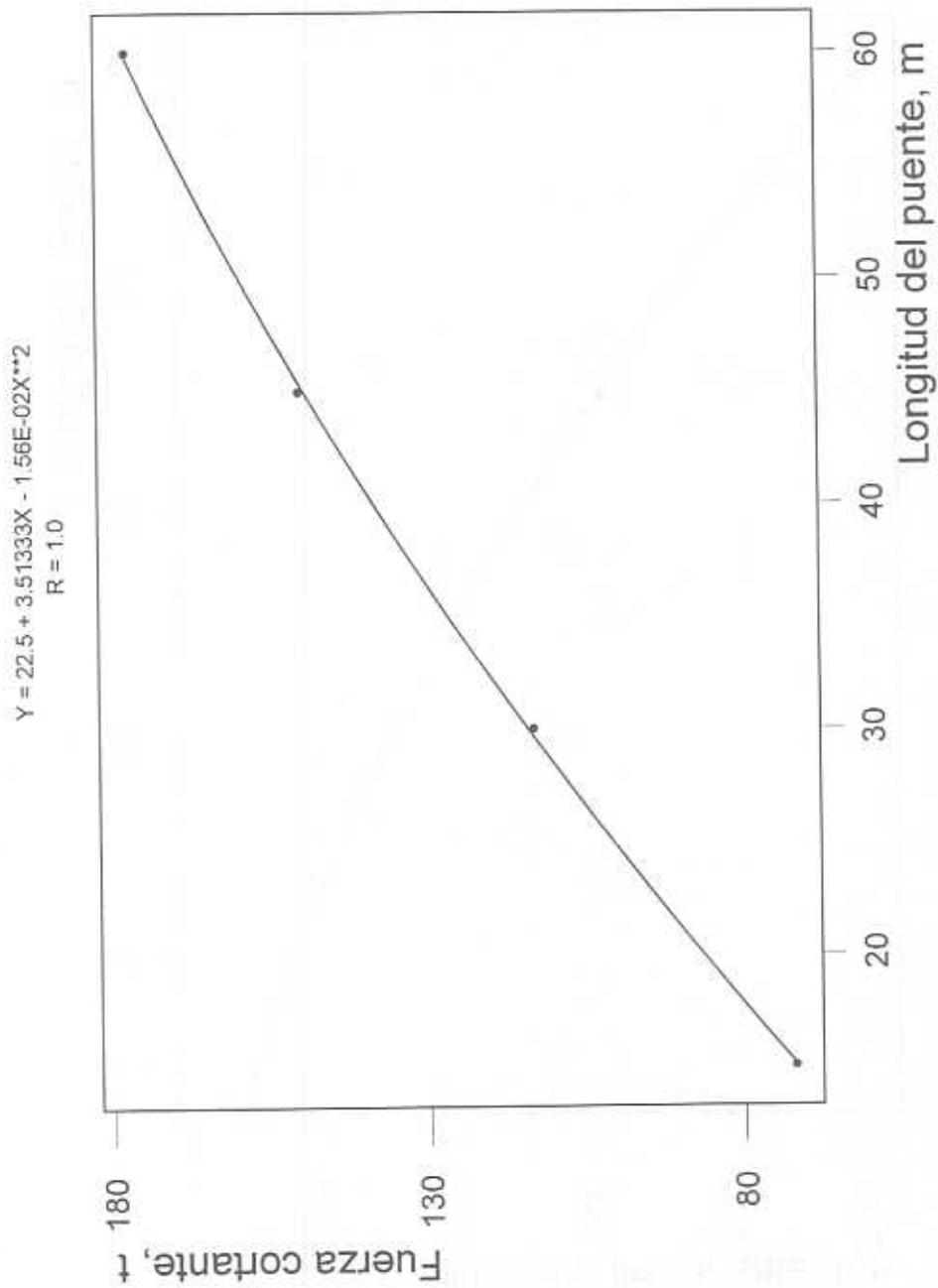


Fig. 6.44 Fuerzas cortantes máximas por secuencias de vehículos

Al aplicar la primera de las dos ecuaciones anteriores para longitudes, L , de 75 y 90m, se obtienen $M_{75} = 3819 \text{ t-m}$ y $M_{90} = 5357 \text{ t-m}$. Al calcular los valores de ω que les corresponden, de acuerdo con la ecuación (8), se obtienen $\omega = 0.78 \text{ t/m}$ y $\omega = 1$; los que resultan al utilizar las fuerzas cortantes son menores. Por tanto, y debido a que para $L = 60\text{m}$ se obtuvo $\omega = 0.50 \text{ t/m}$ y a que para estas longitudes muy grandes los momentos y los cortantes cambiarían mucho en valores absolutos, si se escogiera un solo valor de ω para el rango $60 < L \leq 90$, se decidió ajustar una línea recta a esos tres valores en función de L , con lo cual se tiene que:

$$\omega = 0.5 + (L - 60)/60, \text{ si } 60 < L \leq 90 \quad (10)$$

En las figuras 6.45 y 6.46 se muestran los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes, respectivamente, que resultan al incluir en el modelo de cargas vivas el cálculo de ω con la ecuación 9, y utilizar el factor de carga de 1.9.

Vale la pena señalar que el patrón de las cargas vehiculares que transitan por la red carretera puede cambiar con el transcurso del tiempo, conforme las acciones del control en ruta que realiza la SCT se haga más efectivo y generalizado. Por consiguiente, es recomendable que periódicamente se revise y, en su caso, se actualice el modelo de cargas vivas, aplicando la metodología aquí propuesta y utilizando la información que se capte en los procesos de muestreo que realice en el futuro la SCT sobre tipos, cantidades, pesos y dimensiones de vehículos, ya que es de preverse una posible reducción (gradual) de las magnitudes de las cargas virtuales del modelo.

Asimismo, es conveniente destacar que la metodología que se estableció y aplicó para formular el modelo de cargas vivas, puede ser utilizada en otros países en que se requiera generar sus propios modelos para el diseño estructural de puentes.

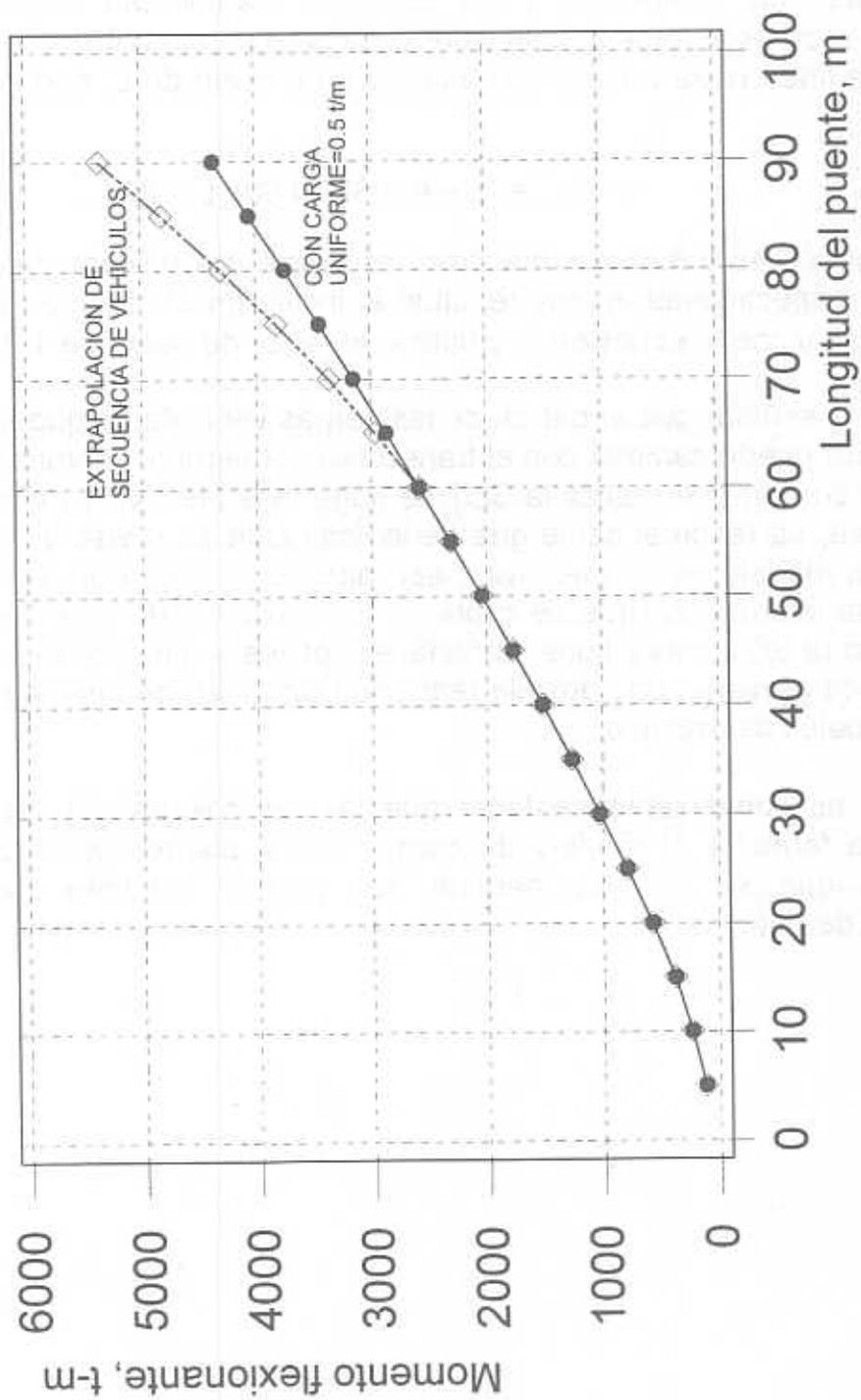


Fig. 6.45 Aplicación del modelo de cargas vivas; momentos flexionantes

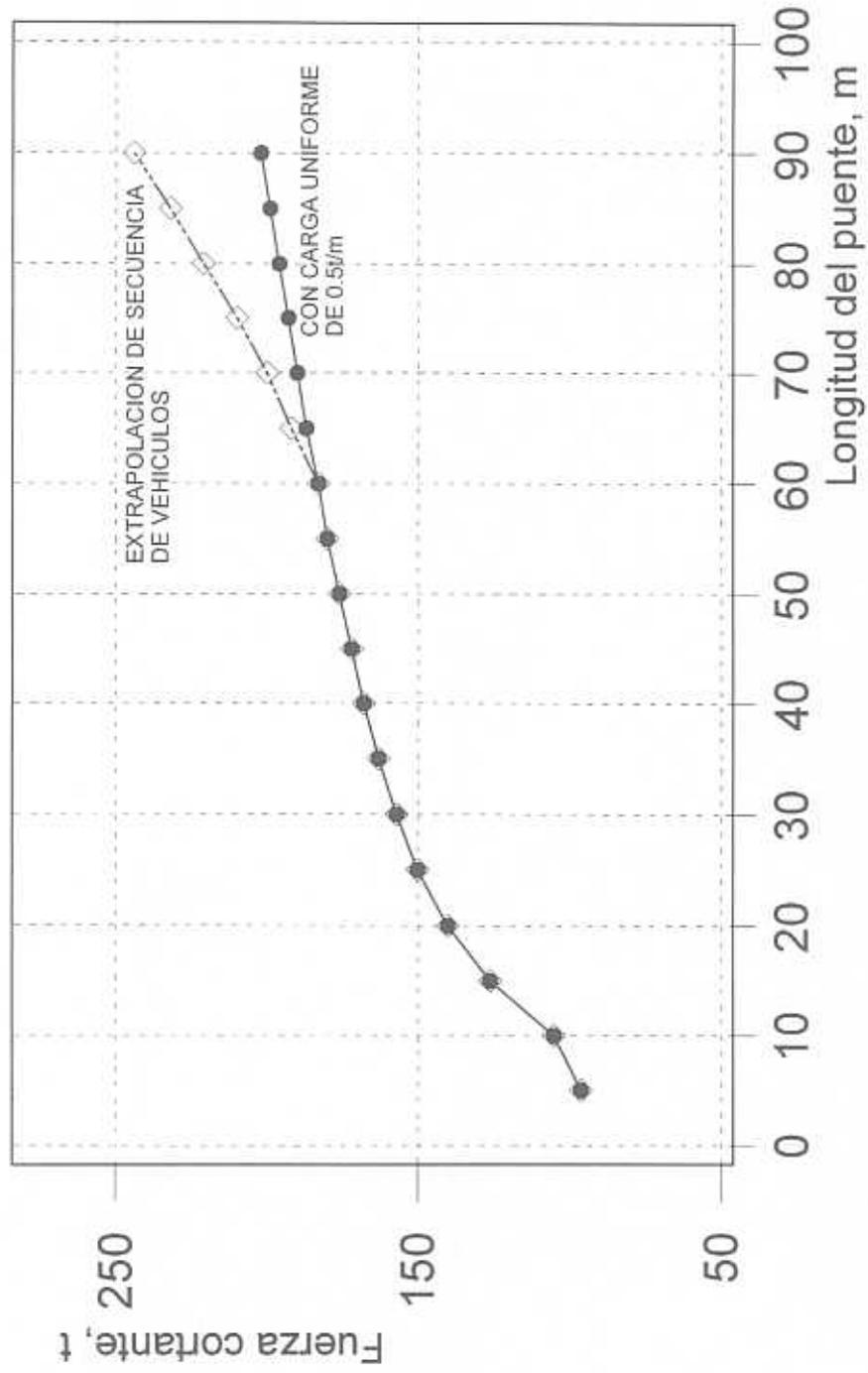


Fig. 6.46 Aplicación del modelo de cargas vivas; fuerzas cortantes



7. Validación final del modelo de cargas vivas vehiculares

Con el propósito de evaluar en última instancia al modelo de cargas vivas vehiculares que se desarrolló en este trabajo, se procedió a aplicarlo a puentes con claros de 15, 30, 45 y 60 metros, idealizados como simplemente apoyados, y a comparar los elementos mecánicos que produce, con los valores extremos de los mismos que podrían esperarse en el caso más desfavorable.

Por los análisis probabilísticos realizados, estos últimos ocurrirían si se tomara a los vehículos T3-S2-R4 como los prototipos de gran peso que transitan por los puentes, ya que las leyes de probabilidades que se ajustan a los elementos mecánicos que producen los vehículos de este tipo en la muestra, predicen valores más grandes que los que se predicen con las distribuciones de probabilidades que corresponden a los T3-S3 y T3-S2-R4 juntos, en virtud de que en la muestra de los T3-S2-R4 se tuvo un vehículo que ocasionó elementos mecánicos muy grandes, que se salen de la secuencia de puntos de la distribución de frecuencias relativas acumuladas y que influyen en los ajustes de las leyes de probabilidades.

En efecto, en las figuras 7.1 y 7.2 se muestran las distribuciones de Weibull que se ajustan a los momentos flexionantes y a las fuerzas cortantes, respectivamente, con base en las muestras de 1993 y 1996 de los vehículos T3-S2-R4. En el caso de los momentos, los ajustes en la mitad derecha, del percentil 40 en adelante, son razonables; en el de las fuerzas cortantes son razonables los ajustes para V45 y V30, en tanto que para V15 no lo es en el extremo derecho, por lo que en este único caso el valor que se predice se toma de una extrapolación (línea punteada) de los últimos cinco puntos de la cola derecha.

Para calcular los valores que se predicen con estas leyes de probabilidades, se cuantificó primero la probabilidad de que se excedan dichos valores en un lapso de 50 años. Esto último se hizo tomando en cuenta que en las muestras de los dos años de vehículos T3-S2-R4, se observaron 2603 unidades en un lapso acumulado de muestreo de 103 días, lo cual daría un total de 496,200 vehículos en 50 años, si no se alterara el patrón de tránsito de los mismos, a lo cual corresponde una probabilidad de excedencia $p = 0.00000215$.

En la siguiente tabla se muestran los valores extremos M y V que se obtienen para esta probabilidad, usando la función de riesgo de Weibull, así como los resultados de multiplicarlos por el factor de impacto (1.33):

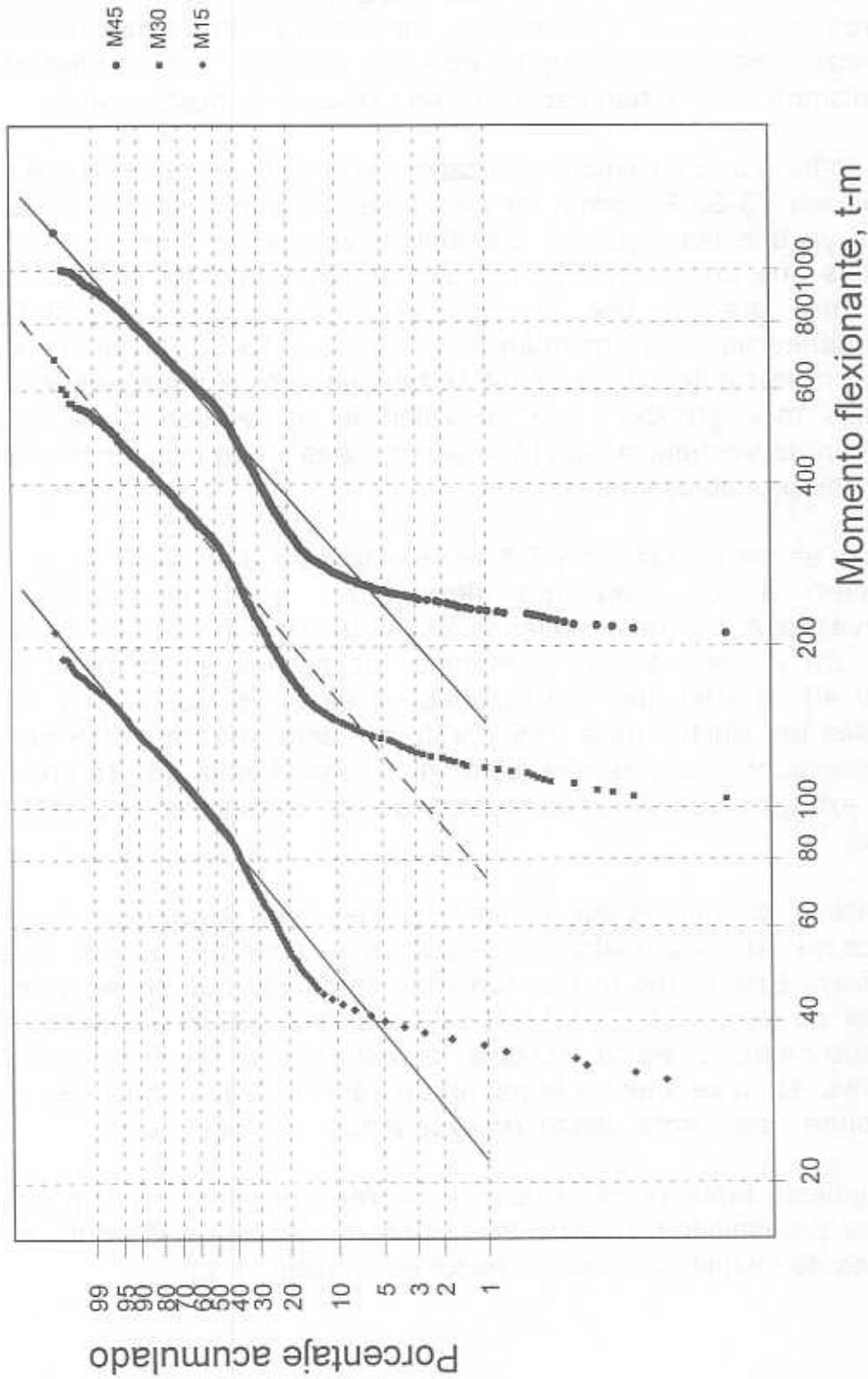


Fig. 7.1 Distribución de Weibull para momentos, T3-S2-R4, 1993 y 1996

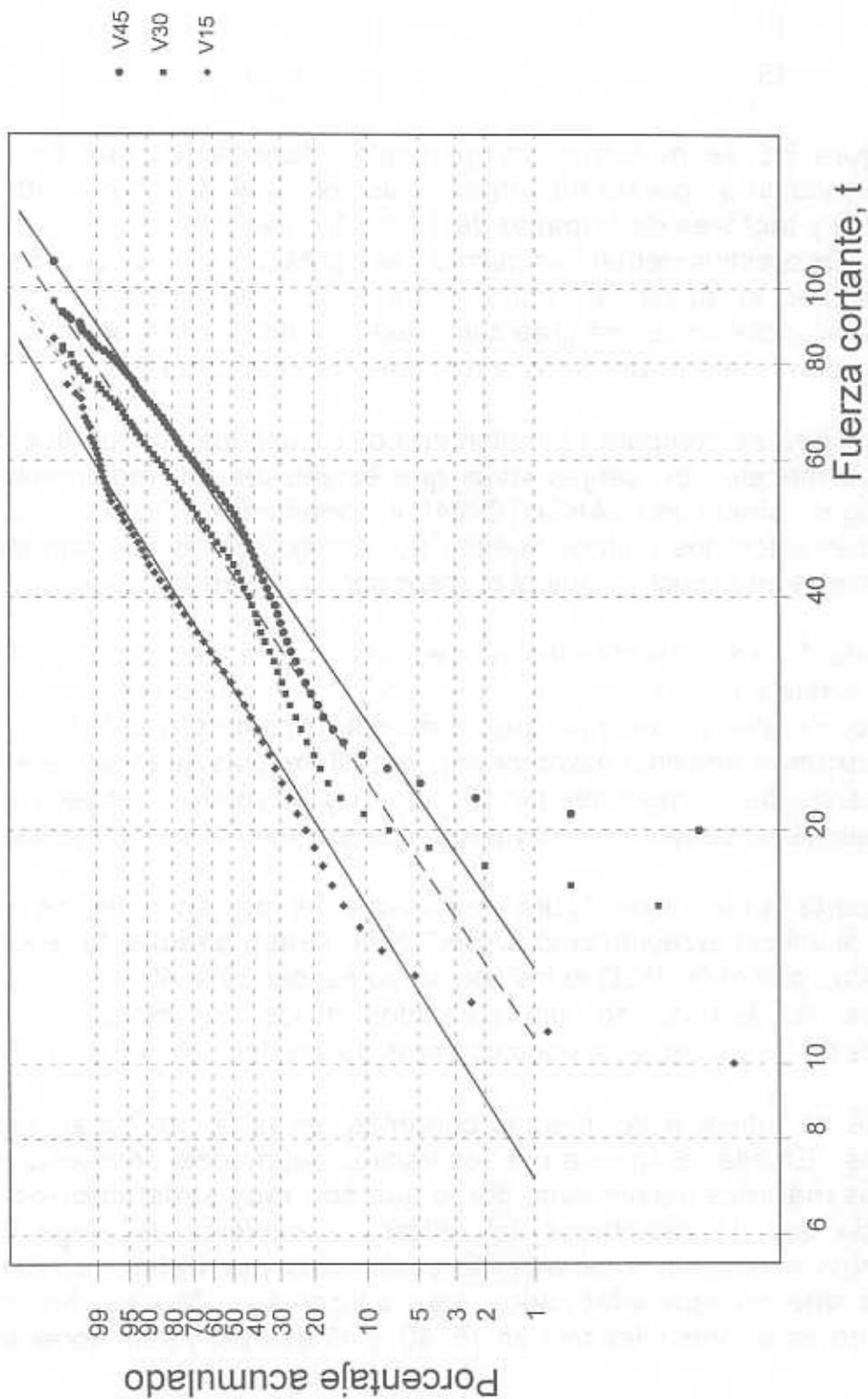


Fig. 7.2 Distribución de Weibull para cortantes, T3-S2-R4, 1993 y 1996

L, m	M, t-m	V, t	1.33 M, t-m	1.33 V, t
15	251	92	334	122
30	794	111	1056	147
45	1347	124	1791	164

En la figura 7.3 se muestran los momentos flexionantes que se obtienen al aplicar el modelo propuesto de cargas vivas vehiculares, con el **factor de carga viva de 1.9** y **factores de impacto de 1.33 y 1.0** para las cargas concentradas y uniforme, respectivamente; asimismo se presentan los valores extremos afectados por el factor de impacto de 1.33, identificados como "*máximo maximorum*", notándose una gran coincidencia entre las respectivas poligonales, por lo que el modelo cubre satisfactoriamente esta situación.

En dicha figura se comparan también ambos resultados con los que resultan de aplicar los modelos de cargas vivas que establecen los reglamentos europeo (eurocódigo), americano (AASHTO-94) y canadiense (OHBOC); en ellas se aprecia que estos dos últimos quedan por debajo, por lo que son inadecuados para aplicarse en México, y que el primero queda por arriba, salvo en $L = 30\text{m}$.

En la figura 7.4 se presentan los valores relativos de los momentos flexionantes de los mismos casos anteriores, con respecto a los que arroja el modelo aquí propuesto. En ella se confirma que **el modelo propuesto cubre muy bien los casos extremos** (*máximo maximorum*), con diferencias que van de +12, -3, -1 y +2 por ciento, para longitudes de 15, 30, 45 y 60 metros, respectivamente; los déficits que se presentan son muy pequeños, por lo cual son aceptables.

Por otra parte, en la misma figura se nota que los momentos flexionantes que se obtienen al aplicar el reglamento AASHTO-94, **tienen déficits superiores al 20%**, en tanto que con el OHBCD éstos son mayores, del 30 al 40%. En contraste, los resultados del Eurocódigo son parecidos a los del modelo propuesto en longitudes de 15 y 30m, y un poco mayores, hasta del 10%, en 45 y 60m.

En lo que se refiere a las fuerzas cortantes, en la figura 7.5 se muestran los resultados. En ella se aprecia que los valores del modelo propuesto superan un poco a los máximos *maximorum*, por lo que **son muy satisfactorios**; asimismo, se aprecia que los resultados de aplicar los modelos de carga viva de los reglamentos americano y canadiense **están muy por debajo** de éstos, lo cual **confirma que no son adecuados** para aplicarse en México, en tanto que el Eurocódigo da valores inferiores en 15, 30 y 45 metros, y superiores en 60m.

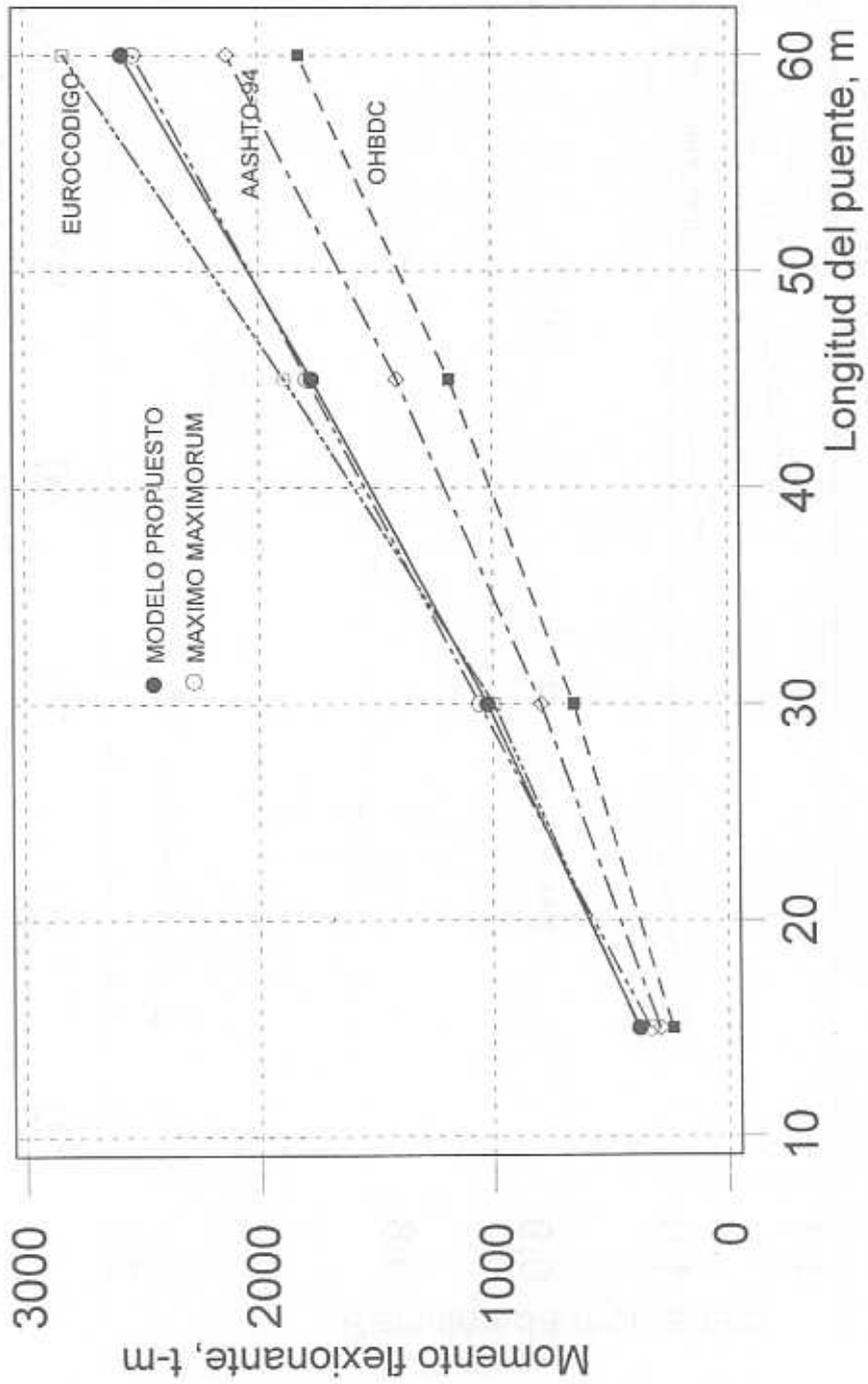


Fig. 7.3 Validación final del modelo; momentos flexionantes

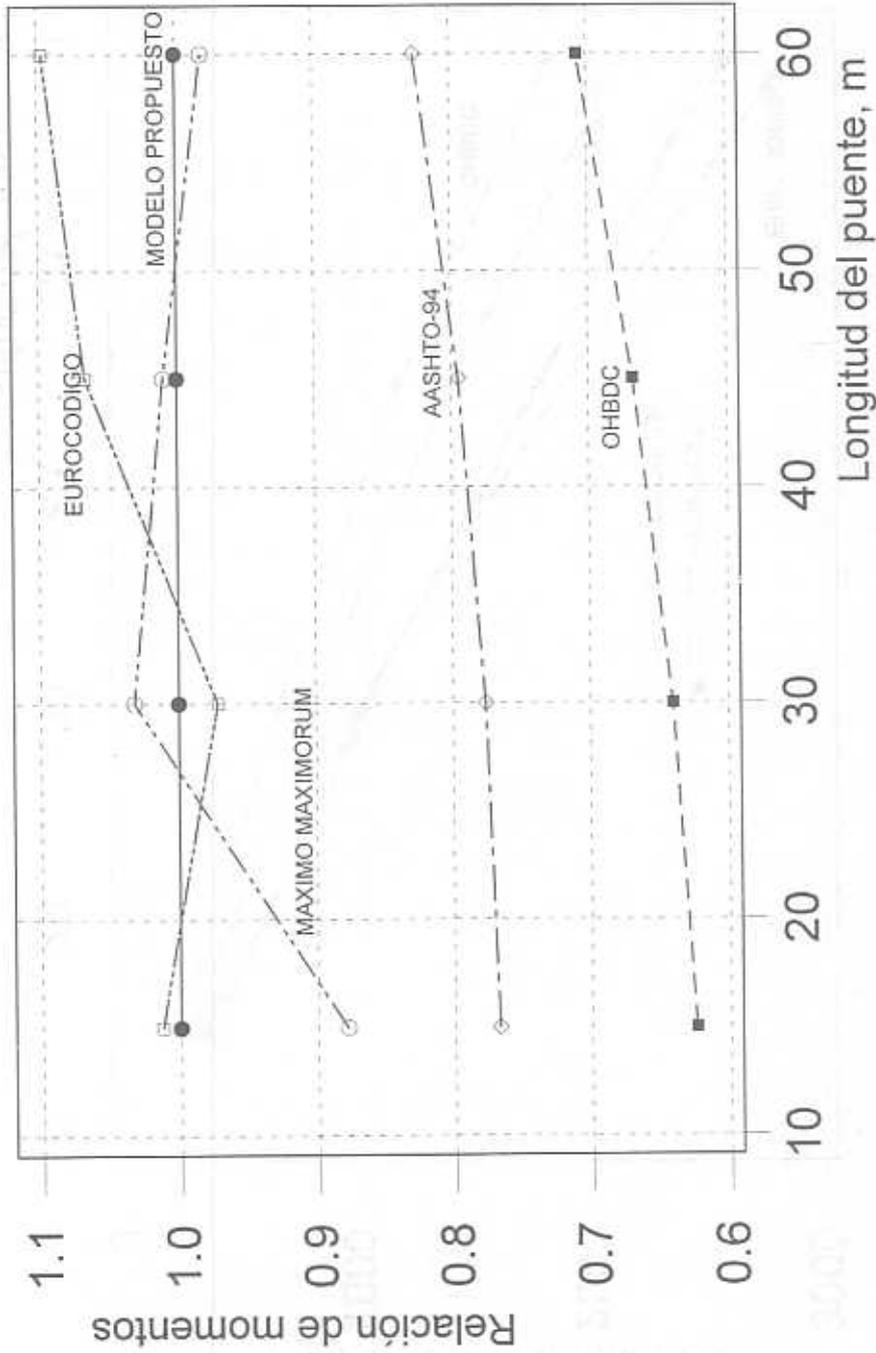


Fig. 7.4 Validación final del modelo; valores relativos de momentos

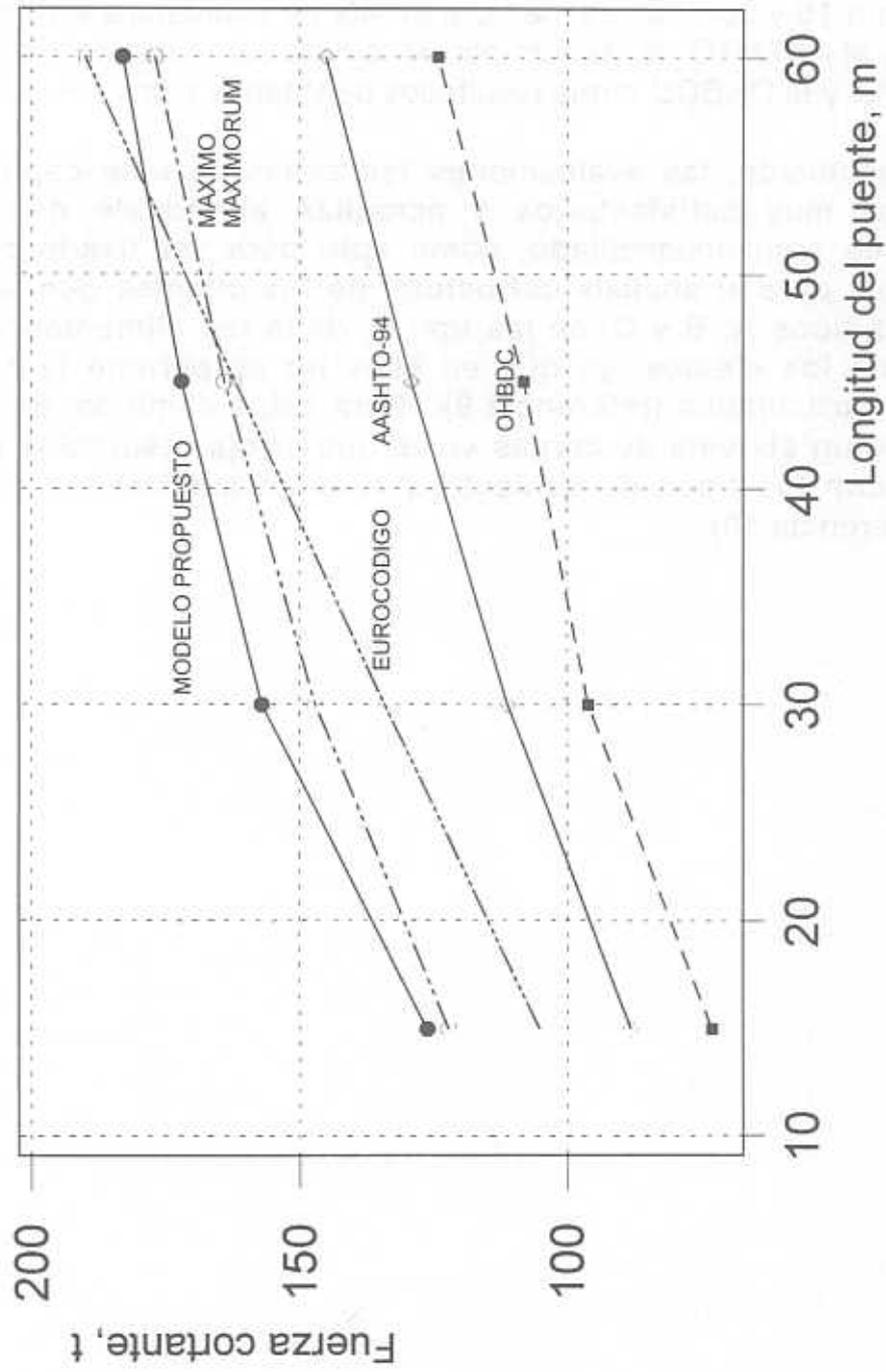


Fig. 7.5 Validación final del modelo; fuerzas cortantes

Asimismo, en la figura 7.6 se muestran las fuerzas cortantes relativas con respecto a las que resultan del modelo aquí propuesto, en la que se nota que éste proporciona resultados por arriba de los máximos máximum entre 3 y 5 por ciento, por lo que son muy razonables.

Por su parte, el Eurocódigo subestima en 12% y 9% a los máximos máximum asociados a 15 y 30m, da casi exacto en 45m y sobrestima en 7% en 60m. En contraste, el AASHTO da valores por debajo de los máximos máximum, entre 17% y 27%, y el OHBDC arroja resultados deficitarios entre 29% y 39%.

Como conclusión, las evaluaciones realizadas en este capítulo arrojaron resultados muy satisfactorios y acreditan al modelo de cargas vivas vehiculares aquí desarrollado, como apto para ser usado en la práctica profesional para el análisis estructural de los puentes que se ubiquen en carreteras tipos A, B y C; en las tipo D, de la red alimentadora, el modelo sobrestima los efectos, ya que en ellas no se permite la circulación de vehículos articulados (referencia 9). Para estos caminos, se encuentra en desarrollo un sistema de cargas vivas que arroje resultados satisfactorios acordes con los tipos de vehículo que están autorizados a transitar por ellas (referencia 10).

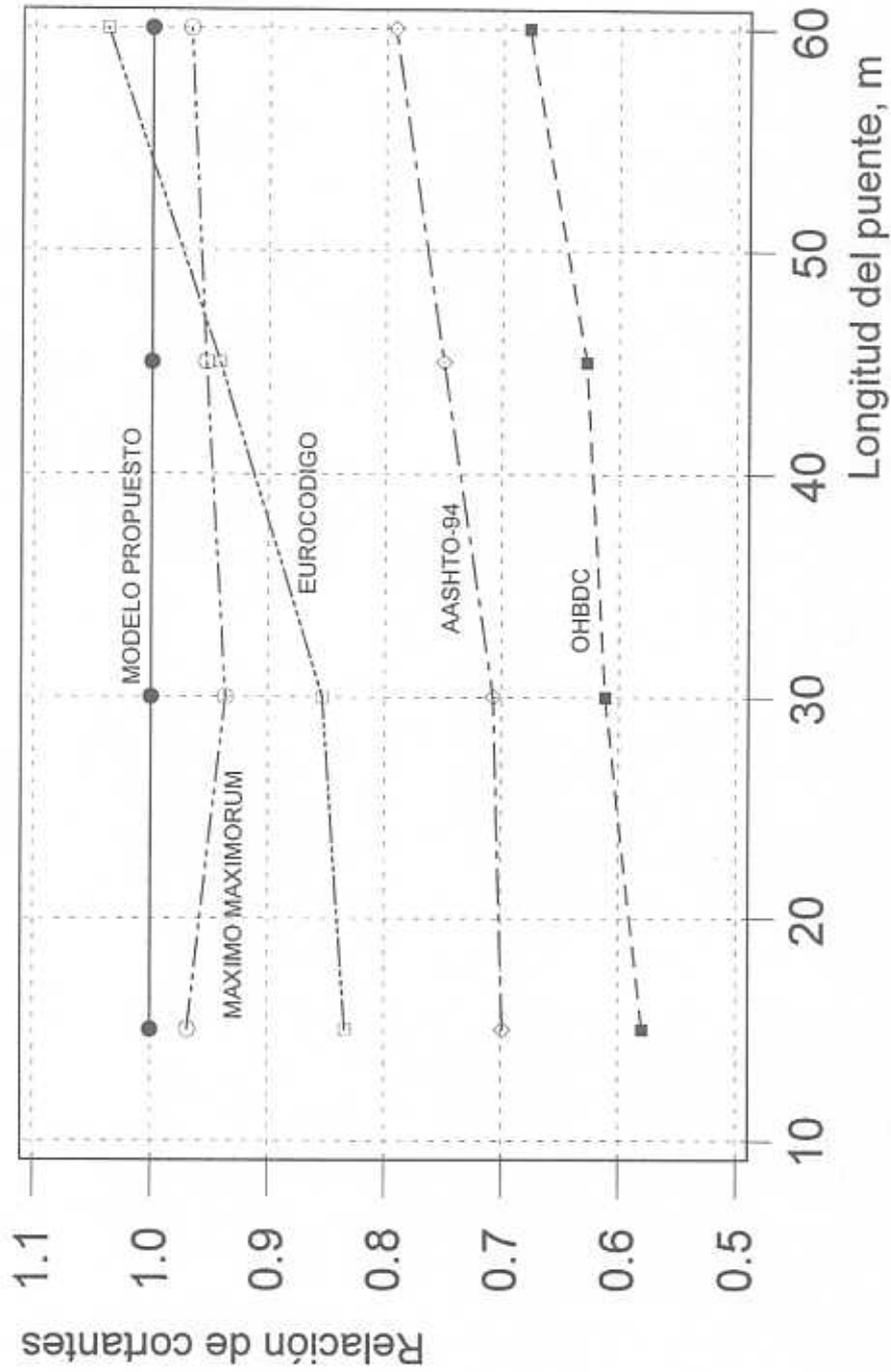
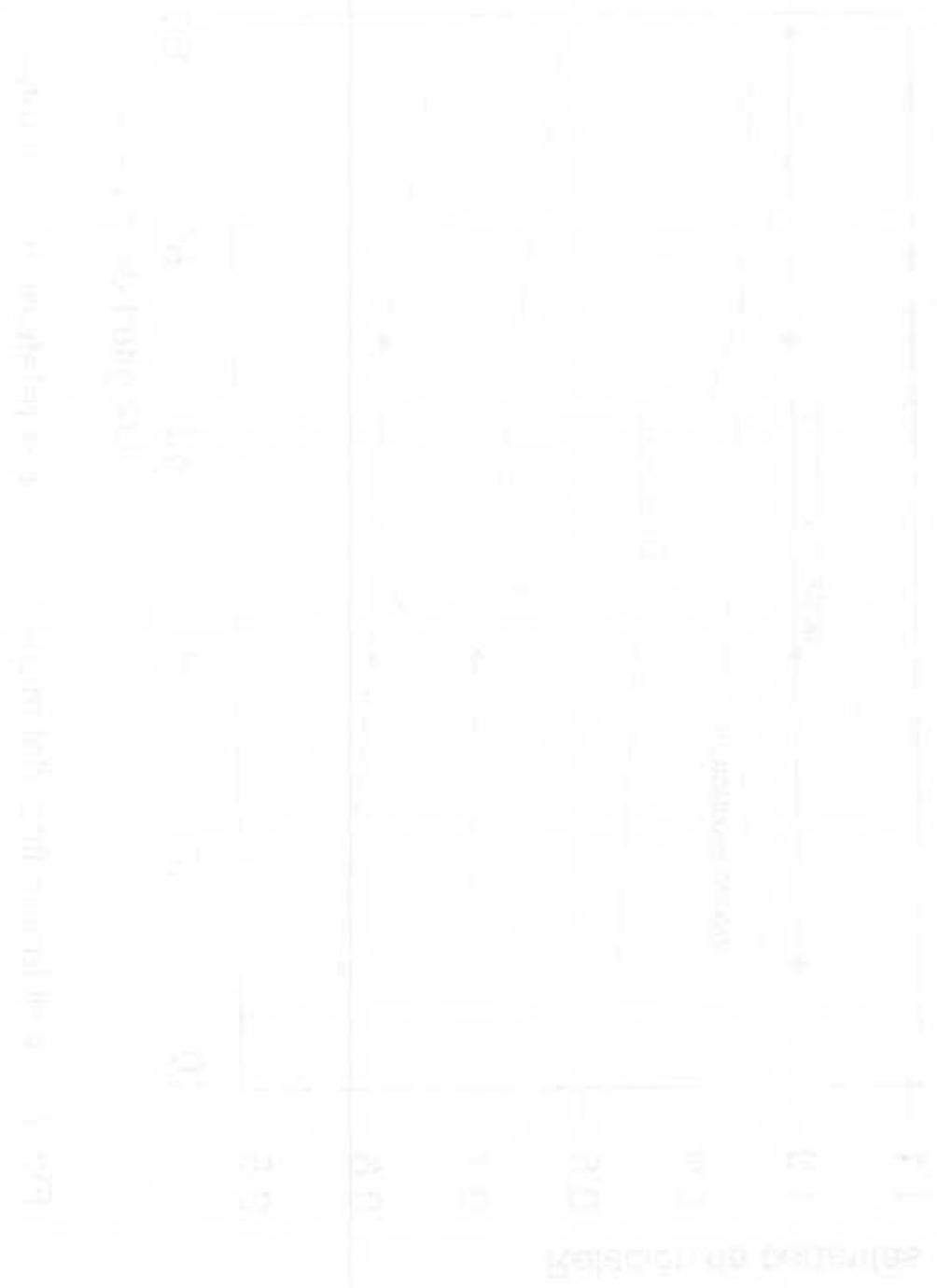


Fig. 7.6 Validación final del modelo; valores relativos de cortantes



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 la normativa general que en él se establece, cambiando el modelo de cargas vivas por el desarrollado en este trabajo, con factores de carga para diseño, servicio y fatiga congruentes con las magnitudes del sistema de cargas concentradas 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". El valor 1.9 que se calculó en este trabajo se aplicará al caso "Resistencia I", que es la considerada como básica para diseño.

Para calcular los otros dos, se adapta 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 $(1.35/1.75)1.9=1.47$. Por tanto, para estos dos casos se propone aplicar un factor de carga viva de 1.5.

El valor de la carga viva que resulta al aplicar este factor de carga tiene una probabilidad de excedencia de 0.22%, según la función de riesgo de Weibull para PT2.

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 los vehiculares, un valor razonable es 0.5, por lo que, si no se tiene mejor opción, se sugiere adoptar uno que guarde la proporcionalidad antes referida: $(0.5/1.75) 1.9 = 0.55$, al igual que para el "Evento extremo II". Por tanto, se propone usar para estos casos un factor de carga viva de 0.55.

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 una vez por semana en promedio. Para este lapso el número de vehículos promedio que pasarían sobre el puente sería de 1376, por lo que el riesgo es $p=0.000726$ y la confiabilidad es $q=0.999274$.

Utilizando la distribución de probabilidades de Weibull que se determinó para la variable aleatoria PT2, se obtiene, para las probabilidades anteriores, que $PT2=57.6t$, a la cual corresponde un factor de carga de $57.6/37 = 1.56$. Este valor se aplica 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"*.

Por coincidencia, este valor del factor de carga es igual al que resulta en el propio reglamento de la AASHTO de multiplicar el 1.2, que se especifica para un carril de circulación, por el 1.3 que se tabula en él como valor del factor de carga. Por simplicidad, para esta condición de servicio se propone usar un factor de carga viva de 1.6.

Para la revisión por "Condición de Servicio I", se propone aquí conservar la misma proporcionalidad que existe en el reglamento de la AASHTO, y usar un factor de carga viva de $(1.0/1.3)1.6=1.2$. 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 PT2, el valor que resulta de usar el factor de carga de 1.2 corresponde a una probabilidad de excedencia de 5%.

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 un factor de carga viva vehicular de $(0.8/1.3)1.6 = 1$. La carga viva que resulta de esto, de acuerdo con la función de riesgo de PT2, tiene probabilidad de excedencia de 20%.

Para la revisión por fatiga se utiliza solamente el sistema de cargas concentradas con un factor de carga de 0.9, que resulta de aplicar el mismo criterio de proporcionalidad antes referido.

En la siguiente tabla se presentan las combinaciones de carga que establece la AASHTO y los factores de carga que se aplican a cada tipo de carga en cada combinación en que aparece. La notación utilizada es la de la AASHTO, pero los valores del factor de carga asociados a la carga vehicular se han cambiado por los que se proponen en este trabajo (columna sombreada LL, IM, CE, BR, PL, LS); los demás factores de carga son los de la AASHTO:

TABLA 1 – FACTORES DE CARGA

Combinación de carga →	DC DD DW EH EV ES	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU CR SH	TG	SE	Use éstas, una a la vez			
										EQ	IC	CT	CV
Resistencia – I	γ_P	1.9	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Resistencia – II	γ_P	1.5	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Resistencia – III	γ_P	-	1.00	1.40	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Resistencia – IV EH, EV, ES, DW Sólo DC	γ_P 1.5	-	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	-	-	-	-	-	-
Resistencia – V	γ_P	1.5	1.00	0.40	0.40	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Evento extremo – I	γ_P	0.55	1.00	-	-	1.00	-	-	-	1.00	-	-	-
Evento extremo – II	γ_P	0.55	1.00	-	-	1.00	-	-	-	-	1.00	1.00	1.00
Servicio – I	1.00	1.2	1.00	0.30	0.30	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Servicio – II	1.00	1.6	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20			-	-	-	-
Servicio – III	1.00	1.0	1.00	-	-	1.00	0.50/1.20	γ_{TG}	γ_{SE}	-	-	-	-
Fatiga, LL, IM y CE solamente	-	0.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Los significados de los símbolos adicionales son: DC = carga muerta de componentes estructurales y no estructurales, DD = "downdrag", DW = carga muerta de las superficies de rodamiento e instalaciones, EH = presión horizontal de tierra, ES = sobrecarga por rellenos de tierra, EV = presión vertical por carga muerta de rellenos de tierra, CR = flujo plástico (creep), CT = fuerza de colisión vehicular, CV = fuerza de colisión de embarcaciones, EQ = sismo, FR = fricción, ICE = hielo, IM = fuerza dinámica vehicular, LL = carga viva vehicular, PL = carga viva peatonal, SE = asentamientos, SH = contracción, TG = gradiente de temperatura, TU = temperatura uniforme, WA = cargas de agua y presión de la corriente, WL = viento sobre carga viva, WS = viento sobre la estructura, y γ_p , γ_{TG} y γ_{SE} = factores de carga.

8.3 Presencia múltiple de cargas vivas

En los diversos reglamentos que existen para el diseño estructural de puentes, es aceptable afectar por factores iguales o menores que uno a los efectos que producen los sistemas de cargas vivas cuando éstas se aplican a más de un carril simultáneamente. 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 modelo de cargas vivas, corresponde a la probabilidad de no excedencia (confiabilidad) adoptada como aceptable en una sola línea de tránsito, no se requiere incrementar la carga viva como lo hace la AASHTO. Por consiguiente, se propone utilizar los factores señalados en la siguiente tabla, que son iguales a los del reglamento de Ontario, Canadá:

Número de líneas cargadas	Factor de presencia múltiple, "m"
1	1.00
2	0.90
3	0.80
4	0.70
5	0.60
6 o más	0.55

Esta propuesta 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 afectada por el factor 0.9. En efecto, de acuerdo con la distribución de probabilidades de Weibull y considerando que la ocurrencia

de cada vehículo es estadísticamente independiente de la otra, la probabilidad de que esto suceda es el producto de la probabilidad de excedencia de cada uno, o sea, el cuadrado de ella.

En tal caso, se tiene que la carga viva virtual CV2 sería de 63.3t para cada vehículo virtual, por lo que, utilizando la función de riesgo de Weibull de PT2, se obtiene que la probabilidad de excedencia de este valor es de 5×10^{-5} , por lo cual su cuadrado es 2.5×10^{-9} , que es inferior a la de excedencia en un solo carril que, como se recuerda, es de 2.78×10^{-7} .

Haciendo algo semejante para el caso de tres carriles, la probabilidad de excedencia de la carga viva para un carril afectada del factor 0.8, es aproximadamente 1×10^{-3} , por lo que su cubo es 1×10^{-9} ; para cuatro carriles, la probabilidad que resulta es 6.5×10^{-8} , las cuales también son menores que 2.78×10^{-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 debe multiplicarse por un factor que se denominó "factor de impacto" y que se asumió con un valor de 1.33, que 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 nuevo reglamento de la AASHTO, sección 3.6.2, para incorporar el efecto dinámico.

En tal caso, las cargas estáticas establecidas en el modelo de cargas vivas vehiculares aquí desarrollado, deben multiplicarse por el **factor de impacto**

$$FI = (1 + IM/100) \quad (11)$$

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

Tabla 2 – Efecto Dinámico

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

Para componentes enterrados y puentes de madera se especifican otros valores.

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 sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas aquí propuesto, situado al 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, pero tomando como carga viva sólo la total del sistema de cargas concentradas nominales del modelo aquí desarrollado, afectada por el factor de carga viva de 1.9.

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 (9.81m/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.

Para calcular la **fuerza de frenado**, se toma el 25% del peso total del vehículo virtual (con factor de carga viva de 1.9), tomando todas las líneas de tránsito de un mismo sentido y aplicando los factores por presencia múltiple que correspondan. La fuerza horizontal longitudinal que resulta, se aplica a una altura de 1.8m sobre la superficie de rodamiento.

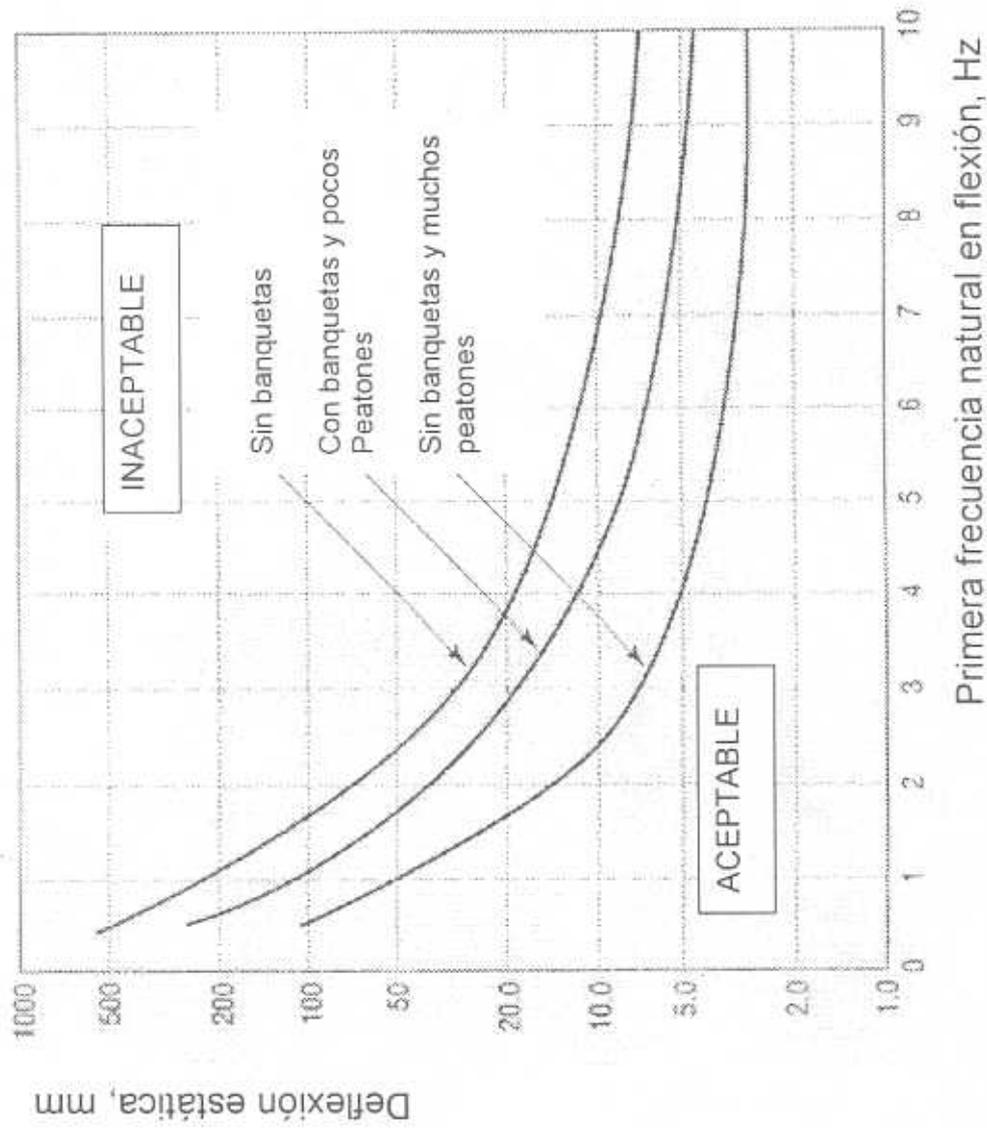


Fig. 8.1 Regiones de aceptación y rechazo de deflexiones verticales

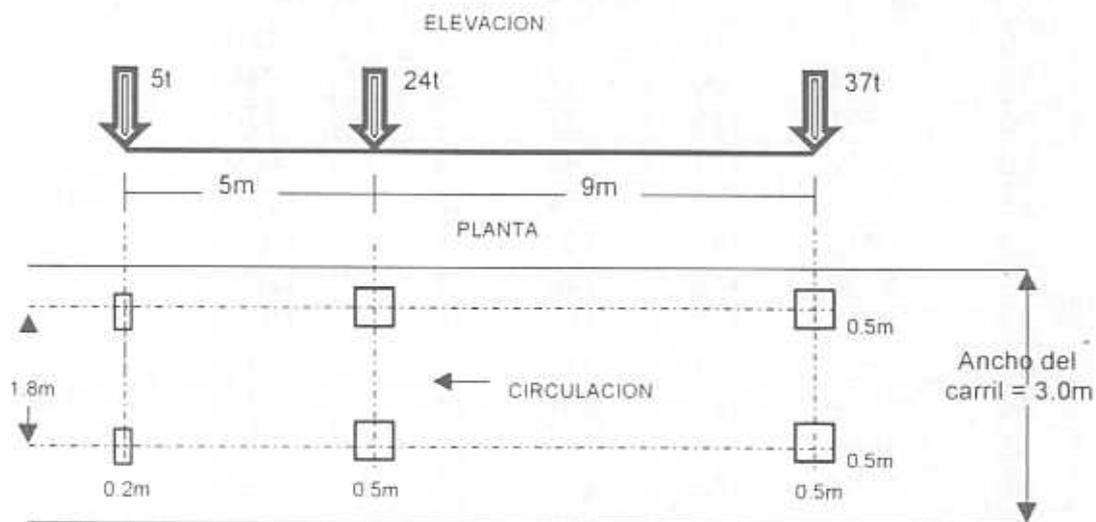


9. Modelo de cargas vivas vehiculares. Conclusión y recomendación

9.1 Conclusión

El modelo de cargas vivas vehiculares que fue desarrollado en este trabajo, y que se propone para el análisis estructural de puentes en México, utilizando métodos de diseño que consideran estados límite de resistencia, servicio y fatiga, fue validado exhaustivamente y queda conformado con los dos siguientes sistemas de cargas, que se aplican en un solo carril y cuyos efectos son aditivos:

- 1) Sistema de cargas concentradas nominales, aplicadas en tres ejes virtuales:



Los valores que puede asumir el factor de impacto se calculan con la ecuación 11 y la Tabla 2.

- 2) Carga uniformemente distribuida, w , con los siguientes valores:

$$w = 0.5 \text{ t/m} \quad \text{si} \quad L \leq 60\text{m}$$

$$w = 0.5 + (L - 60)/60 \quad \text{si} \quad 60 < L \leq 90\text{m}$$

$$\text{Factor de impacto} = 1$$

Los valores que puede asumir el factor de carga viva para ambos sistemas de carga se presentan en la Tabla 1; 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 6.45, para momentos flexionantes, y 6.46, para fuerzas cortantes totales máximos. En ellas se utiliza un factor de carga viva de 1.9 para ambos sistemas de carga y 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 la siguiente tabla, desglosados en términos de sus componentes (el índice p identifica los resultados del sistema de cargas concentradas y el ω los de la carga uniformemente repartida).

L,m	M_p , t-m	V_p , t	M_ω , t-m	V_ω , t	$M_T=M_p+M_\omega$,t-m	$V_T=V_p+V_\omega$,t
5	117	94	3	2	120	96
10	234	100	12	5	246	105
15	351	119	27	7	378	126
20	522	131	48	9	570	140
25	712	138	74	12	786	150
30	916	143	107	14	1023	157
35	1120	146	146	17	1266	163
40	1326	149	190	19	1516	168
45	1532	151	241	21	1773	172
50	1739	152	297	24	2036	176
55	1946	154	359	26	2305	180
60	2154	155	428	28	2582	183
65	2361	156	585	36	2946	192
70	2569	157	775	44	3344	200
75	2776	157	1002	53	3778	210
80	2984	158	1266	63	4250	221
85	3192	158	1573	74	4765	232
90	3400	159	1923	85	5323	244

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 tipos A, B y C, pero cambiando tanto el modelo de cargas vivas vehiculares, como los factores de carga viva y de presencia múltiple, por los desarrollados en este trabajo y considerando las condiciones sísmicas, eólicas y meteorológicas del territorio mexicano.

Referencias

1. 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.
2. Mendoza, A. y Cadena, A.; **Análisis Estadístico del Peso y las Dimensiones de los Vehículos de Carga que Circulan por la Red Nacional de Carreteras**, Documento Técnico No. 8, IMT, 1992.
3. Gutiérrez, J.L., Mendoza, A. Y Dontchev, P., **Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional. Análisis Estadístico de la Información Recopilada en las Estaciones Instaladas en 1995 y 1996**. Documento Técnico No. 20, IMT, 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. **Eurocode 1, Basis of Design and Actions on Structures, Part 3. Traffic Loads on Bridges**. European Committee for Standardization, Bélgica, 1995.
7. Leyva, J.R., **Elementos Mecánicos Máximos Desarrollados por Cargas Vivas en Puentes**. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil, Universidad Autónoma de Sinaloa, 1998.
8. Miller, I, y Freund, J.E., **Probability and Statistics for Engineers**. Ed. Prentice Hall.
9. **Reglamento sobre el Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Autotransporte que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal**. Diario Oficial, 4 de septiembre de 1995.
10. Rascón, O., **Sistema de Cargas Vehiculares para Diseño de Puentes en Carreteras Alimentadoras**. Estudio en proceso, Instituto Mexicano del Transporte.

CIUDAD DE MEXICO

Av. Popocatepetl 506 B
Xoco-Benito Juárez
03330 México, D.F.
Tels. 5 688 76 29
5 688 76 03
Fax. 5 688 76 08

SAN FANDILA

Km 4+000, Carretera
Los Cues-Galindo
76700 P. Escobedo, Qro.
Tels. (4) 216 97 77
216 96 46
216 95 97
Fax. (4) 216 96 71
Internet <http://www.imt.mx>.