



**Certificación ISO 9001:2000 ‡
Laboratorios acreditados por EMA §**

FORMULACIÓN DE LA NORMA SCT DE CARGAS VEHICULARES PARA DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES CARRETEROS

Octavio A Rascón Chávez

**Publicación Técnica No 243
Sanfandila, Qro, 2004**

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

**Formulación de la Norma SCT de Cargas
Vehiculares para Diseño Estructural de Puentes
Carreteros**

**Publicación Técnica No. 243
Sanfandila, Qro, 2004**

Créditos

Esta publicación fue realizada por el Director General del Instituto Mexicano del Transporte, Dr Octavio A Rascón Chávez.

Se agradecen los comentarios del Ing Amílcar Galindo en los ajustes a los modelos, y se reconoce el apoyo de Raúl Vicente Orozco Escoto para elaborar el escrito.

Índice

Resumen	III
Abstract	V
Resumen ejecutivo	VII
1. Antecedentes.....	1
2. Diseño de la norma de carga viva vehicular, IMT 66.5, para carreteras principales.....	3
2.1. Cálculo del sistema de cargas concentradas.....	4
2.2. Determinación del sistema de cargas concentradas nominales, y de los factores de carga viva	6
2.3. Cálculo del sistema de carga uniforme.....	9
2.4. Comparación del modelo IMT 66.5 con el modelo original.....	10
2.5. Presencia simultánea de cargas vivas en varios carriles	12
3. Diseño de la norma de carga viva vehicular, IMT 20.5, para carreteras alimentadoras.....	13
4. Nueva normativa SCT de cargas vivas vehiculares.....	19
4.1. Cargas y acciones.....	19
4.1.1. Definición y clasificación	19
4.1.1.1. Cargas permanentes.....	19
4.1.1.2. Cargas variables.....	19
4.1.1.3. Cargas eventuales	19
4.1.1.4. Clasificación de cargas con fines de diseño.....	20
4.1.1.4.1. Cargas de servicio	20
4.1.1.4.2. Cargas últimas	20
4.1.2. Cargas variables.....	20

4.1.2.1.	Cargas vivas.....	20
4.1.2.1.1.	Ubicación de las cargas vivas vehiculares en los carriles de circulación	21
4.1.2.1.2.	Modelos de cargas vivas vehiculares	21
4.1.3.	Impacto	26
4.2.	Combinaciones de cargas.....	28
4.2.1.	Definición	28
4.2.2.	Grupos de cargas	28
5.	Conclusiones.....	33
6.	Referencias	35

Resumen

El propósito fundamental de este trabajo es describir la metodología que se siguió para generar la **norma mexicana de cargas vivas vehiculares**, que toma en cuenta las dimensiones y los pesos que transportan en el país los grandes vehículos de carga con seis a nueve ejes de rodamiento, para realizar el análisis estructural de los puentes carreteros en México.

Dicha norma está ya vigente en la nueva normativa técnica de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (referencia 8).

Lo anterior se realizó adaptando los dos modelos de cargas vivas desarrollados por el autor, publicados en las referencias 2 y 5 de este escrito; **uno para carreteras principales, tipos ET, A, B y C; y otro para alimentadoras, tipo D**. En la nueva norma de la SCT, dichos modelos se denominaron **IMT 66.5** e **IMT 20.5**, respectivamente.

Ambos modelos **comprenden un sistema de cargas concentradas, y uno de carga uniformemente repartida**. Los valores asignados a las cargas concentradas se calcularon mediante diversos análisis probabilísticos de riesgos, en tanto que los correspondientes a las cargas uniformes fue a través de procesos de simulación estocástica de secuencias, o convoyes de vehículos pesados. Los resultados fueron validados satisfactoriamente.

En el desarrollo de los modelos se calcularon también los diversos valores que debe tomar el **factor de carga viva**, para cada una de las diferentes combinaciones de cargas que se utilicen para diseño estructural, y para revisión por condiciones de servicio y fatiga, los cuales aparecen en la norma.

Al hacer lo anterior se generaron **sistemas de cargas concentradas nominales**, congruentes con los pesos brutos máximos que se establecen en el reglamento sobre pesos y dimensiones de vehículos que está vigente en México (referencia 4).

Asimismo, se proponen los factores de ocupación simultánea de carriles múltiples.

Como productos adicionales, de utilidad para el diseño preliminar de los puentes, se presentan las gráficas de las fuerzas cortantes y los momentos flexionantes máximos, que producen los sistemas de cargas de la nueva norma en puentes simplemente apoyados, con claros hasta de 60 m.

Abstract

The main objective of this paper is to describe the methodology followed **to develop the Mexican norm for vehicle live loads**, in such a manner to take into account the weights that the big trailers regularly transport in our country, to carry out the structural highway bridge design in México.

The norm is already in use, and was published by the Mexican Secretaría de Comunicaciones y Transportes (reference 8).

To do this, the **live load models** developed by the author in references 2 and 5 were adapted, **one for main roads and other for secondary roads**. These models are named **IMT 66.5 and IMT 20.5**, respectively.

The live load models were developed by means of statistics and probability analysis of risks, by using several random variables on weights and dimensions, and large samples of data collected in Mexican roads.

The configuration of each of this live loads models, as other models do, have a **concentrated loads system and a uniformly distributed load**.

The values assigned to each one of the concentrated loads were calculated using probability and reliability analysis. The values of the distributed loads were calculated with stochastic simulation processes of sequences or convoys of heavy vehicles on a traffic line. The results were evaluated quite satisfactorily (reference 4).

For the development of the model, the values that must take the **live load factors** in each one of the different loads combinations used for structural design and for revision by conditions on service and fatigue, where also obtained. After doing this, the **load systems of concentrated loads are the nominal ones**, which are congruent with the maximum gross weights established in the regulation on weights and dimensions of vehicles that is effective in Mexico (reference 4).

Also the load reduction factors for occupation of multiple tracks on the bridge where proposed and validated.

Additional products, useful for the preliminary design of the bridges, are the maximum shear forces and flexion moments, produced by the models IMT 66.5 and IMT 20.5 on simply supported bridges, up to 60m length, which are also shown in several figures of this paper.

Resumen ejecutivo

Se tomaron como antecedentes las conclusiones y recomendaciones de la referencia 1, en la que se demostró, utilizando la información correspondiente a muestras de pesos y dimensiones de vehículos de carga capturada por la SCT, que los **modelos de cargas vivas vehiculares** que se utilizan en el país y que se establecen en el reglamento para diseño estructural de puentes carreteros de la AASHTO (referencia 3) en Estados Unidos de Norteamérica, producen momentos flexionantes y fuerzas cortantes (elementos mecánicos) para diseño **bastante inferiores** a las que ocasionan los grandes vehículos de carga (tipos T3-S3 y T3-S2-R4), que transitan por las principales carreteras en México.

De lo anterior, se concluyó que no es aconsejable seguir utilizando el modelo de cargas vivas del reglamento de la AASHTO. Estos resultados se corroboraron en las referencias 2 y 5.

Por tanto, **fue necesario que se formularan modelos de cargas vivas que arrojen elementos mecánicos 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 puedan utilizarse para revisar la seguridad de los ya existentes.

Dichos modelos fueron desarrollados en las referencias 2 y 5, para puentes en carreteras principales, tipos ET, A, B y C, y en carreteras alimentadoras, tipo D, respectivamente.

Para proponer la topología de los modelos de cargas vivas, se tomó 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 sistema de **cargas concentradas** produce efectos en los puentes equivalentes a los que ocasiona un vehículo muy pesado con una probabilidad muy baja de presentarse en el lapso de vida útil de diseño del puente. Por su parte, el sistema de **carga uniforme** genera efectos a los que ocasiona una secuencia (convoy) de vehículos pesados, que al circular en un carril, uno tras otro, producen elementos mecánicos iguales o mayores, dependiendo del claro del puente, que los que origina cualesquiera de ellos individualmente.

Para diseñar los estudios estadísticos y probabilísticos para puentes en **carreteras principales**, 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 consideraron. Asimismo, se estimó 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 tandems, trídems y dobles tandems.

Por lo anterior, como punto de partida se planteó la hipótesis de que el **momento flexionante y la fuerza cortante máximos** que cada vehículo 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; se comprobó estadísticamente que la hipótesis es correcta utilizando puentes simplemente apoyados con claros de 15 a 60 m.

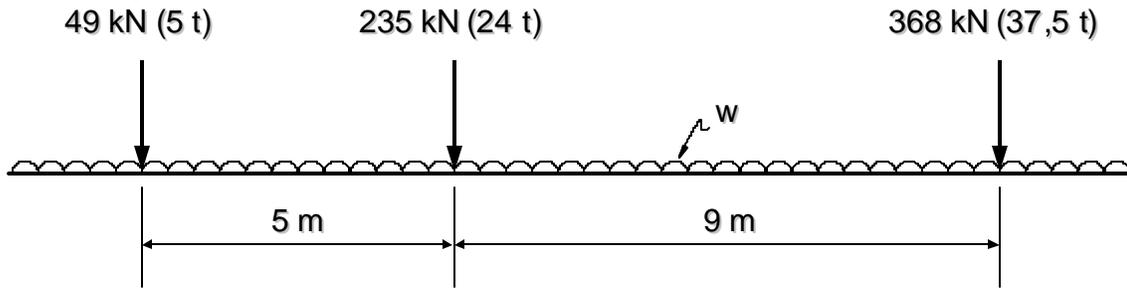
Por otra parte, se toma en cuenta la conclusión de la referencia 1, de que los elementos mecánicos más grandes calculados que generan a los puentes los vehículos T3-S3, son muy parecidos a los que ocasionan los T3-S2-R4.

Por eso se decidió que el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas vehiculares para carreteras principales, podría tener una topología simple de **sólo tres ejes de aplicación** de las cargas para puentes en carreteras principales, 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, a la carga total que se transmite por el tándem del tractor; y el trasero, al peso total que baja por el trídem 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 donde no se permite el tránsito de estos vehículos, como es el caso de las **carreteras alimentadoras**. Por tanto, fue necesario desarrollar otro modelo, especial para vías alimentadoras con sólo dos ejes de carga, para el cual se utilizó la información estadística de los camiones tipo C3, por ser los de mayor peso que se autoriza circulen por esa clase de caminos.

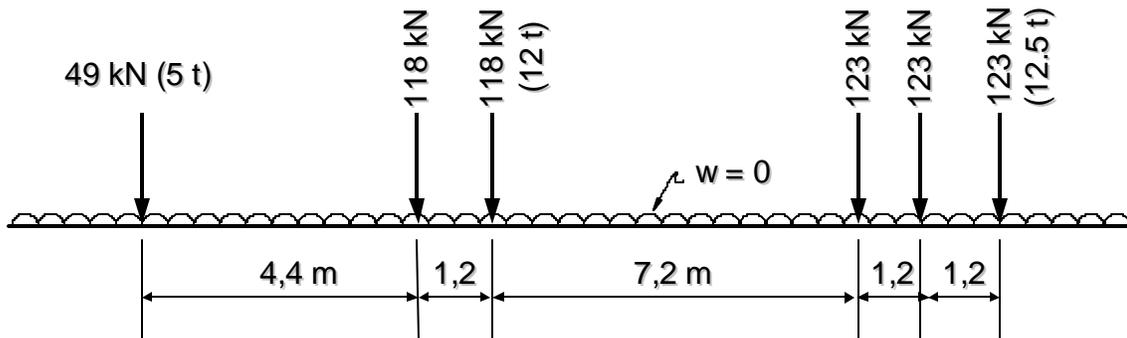
La adaptación y validación satisfactoria con fines normativos de los modelos de cargas vivas vehiculares señalados, se explica en el cuerpo de este trabajo, y condujo a **formular la norma correspondiente** para ambos tipos de carreteras, misma que ya está vigente (referencia 8); en el Capítulo 4 se transcribe la parte alusiva.

El **modelo para carreteras principales** se denomina **IMT 66.5** en la norma, habiendo quedando de la siguiente manera:

Para claros mayores o iguales a 30 m

$$w = (L - 30) / 60 \text{ t/m} = (L - 30) / 6 \text{ kN/m, si } 30 \text{ m} = L = 90 \text{ m}$$

$$w = 1 \text{ t/m} = 10 \text{ kN/m, si } L > 90 \text{ m}$$

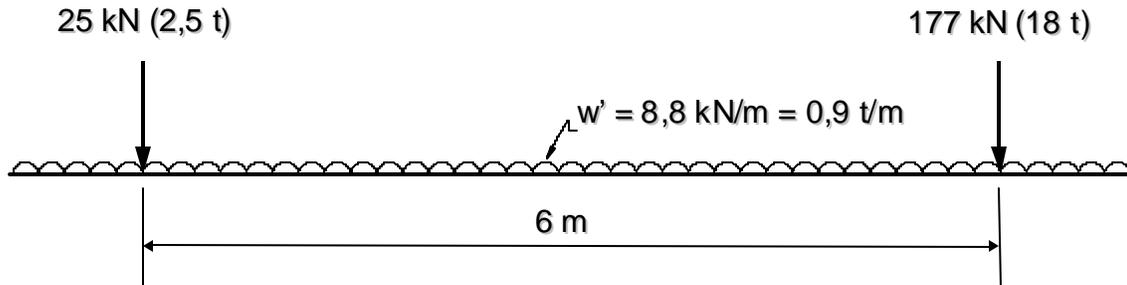
Para claros menores de 30 m**Modelo de cargas vivas IMT 66.5**

El **modelo para carreteras alimentadoras** se denomina **IMT 20.5** en la norma, y se formuló con igual metodología que el IMT 66.5, pero considerando que los vehículos más grandes que pueden transitar por ellas son los tipo C3, la referencia 5 se concibió con dos ejes virtuales de carga.

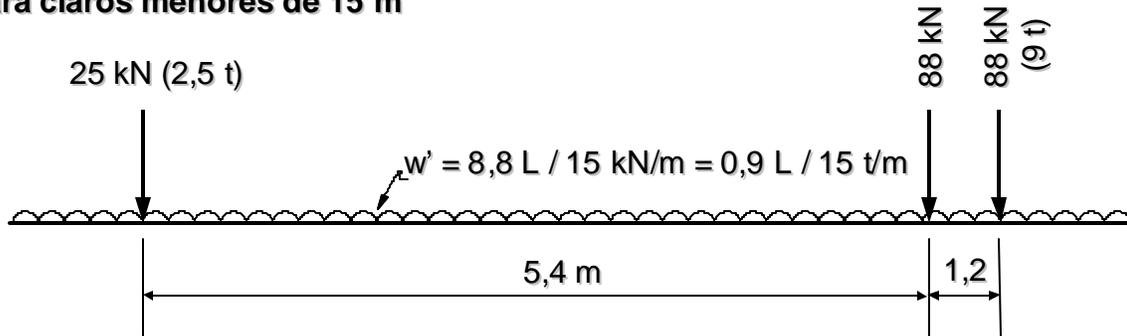
Además se tomó en cuenta que en ciertas condiciones el reglamento de pesos y dimensiones (referencia 4) permite el tránsito por estas carreteras, de vehículos articulados pesados.

En la siguiente figura se presenta el **modelo IMT 20.5**:

Para claros mayores o iguales a 15 m

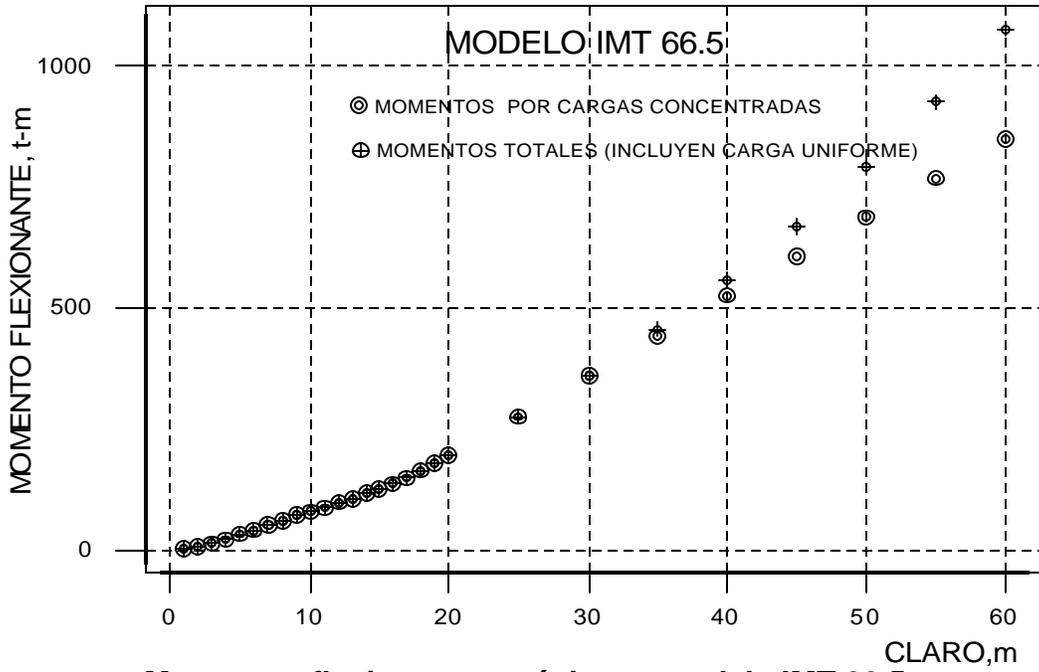


Para claros menores de 15 m

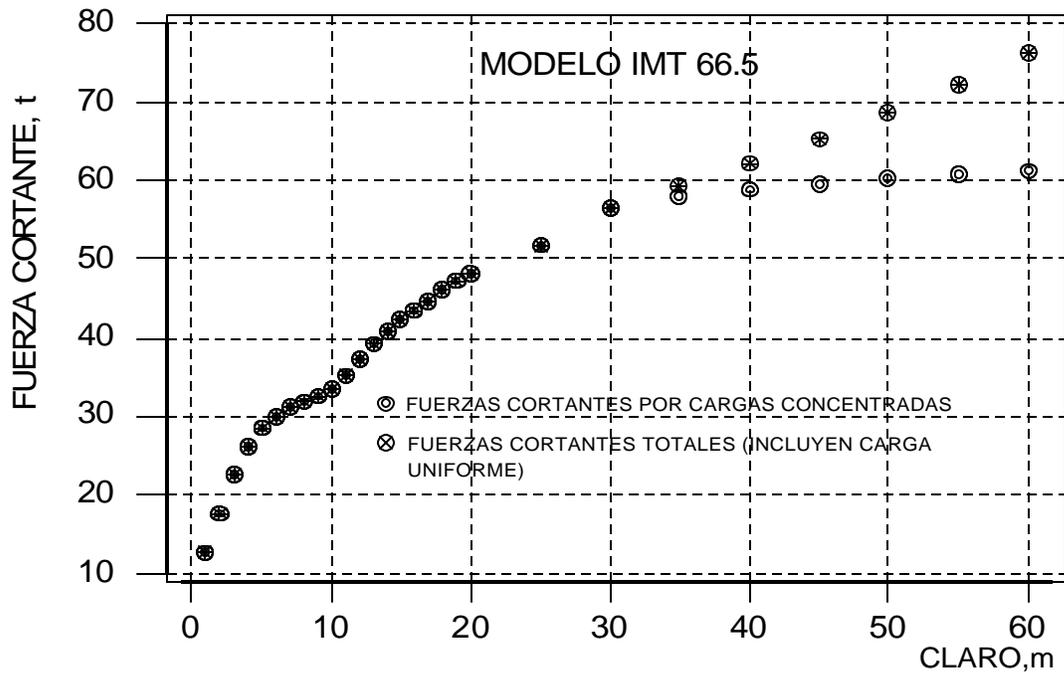


Modelo de cargas vivas IMT 20.5

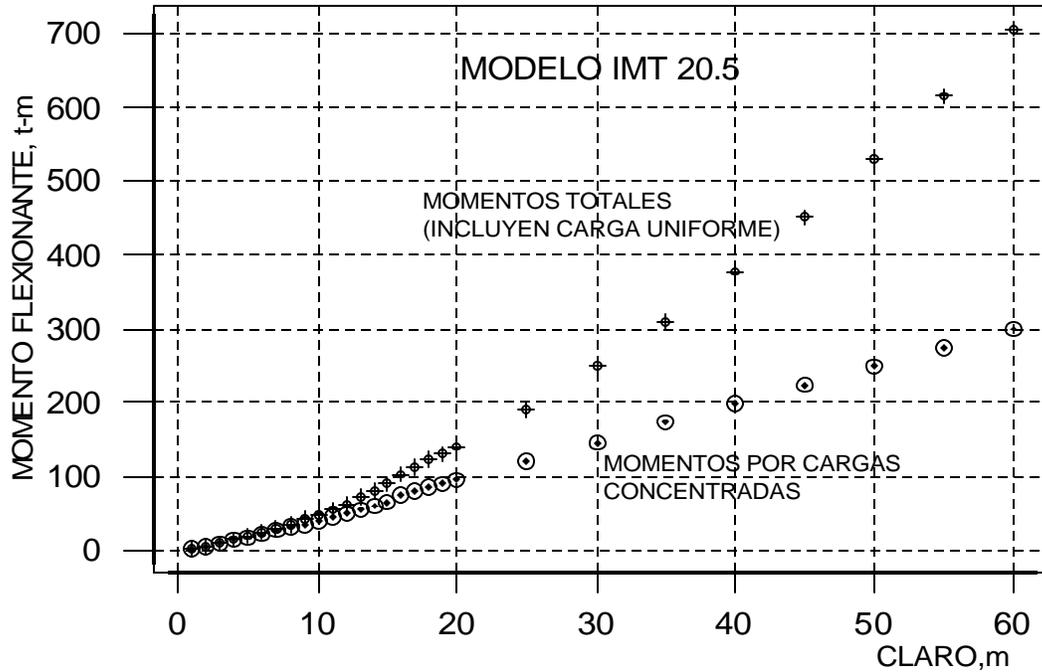
Con el fin de proporcionar ayudas para el diseño preliminar de los puentes simplemente apoyados con claros de 1 a 60 m en ambos tipos de carreteras, se calcularon las fuerzas cortantes y los momentos flexionantes máximos que cada modelo de cargas vivas les ocasiona, mismos que se presentan en las siguientes figuras.



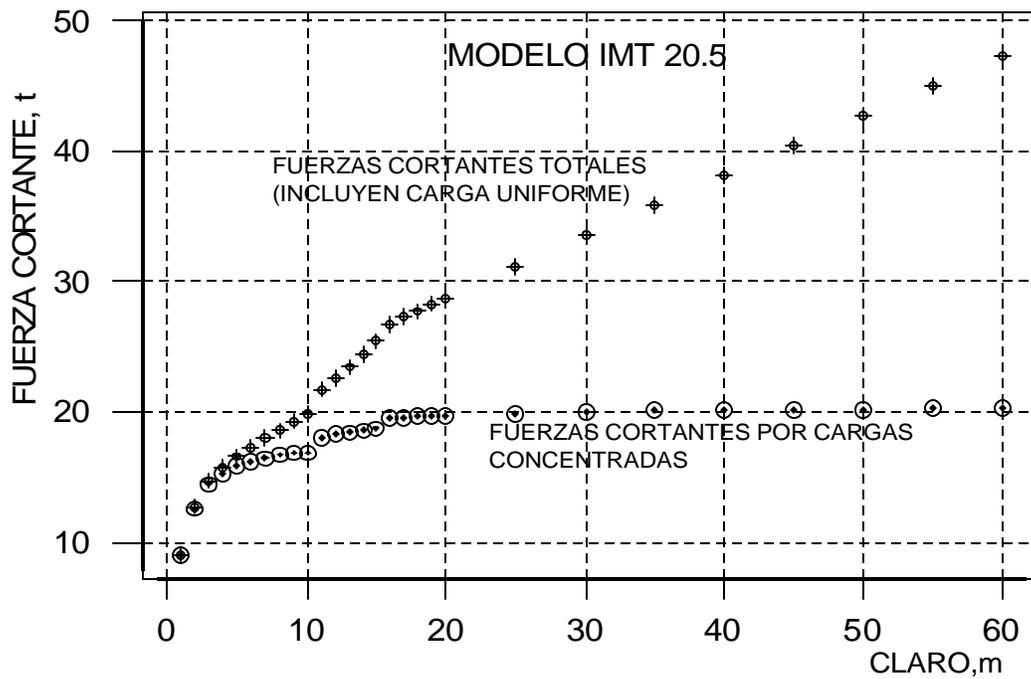
Momentos flexionantes máximos, modelo IMT 66.5



Fuerzas cortantes máximas, modelo IMT 66.5



Momentos flexionantes máximos, modelo IMT 20.5



Fuerzas cortantes máximas, modelo IMT 20.5

1. Antecedentes

Se ha demostrado (referencias 1 y 2) que los sistemas o modelos de cargas vivas vehiculares especificados en los reglamentos de la AASHTO (referencia 3), que usualmente se han empleado en México para el diseño estructural de los puentes carreteros, **establecen cargas inferiores** a las que transportan los grandes vehículos articulados que circulan por las vías principales de la red carretera mexicana y, consecuentemente, **subestiman** los valores de los elementos mecánicos (fuerzas cortantes y momentos flexionantes) máximos para diseño.

Esta demostración, y la cuantificación de las insuficiencias se realizó al comparar los **elementos mecánicos máximos** en puentes simplemente apoyados de diferentes longitudes, que se calcularon utilizando los modelos de la AASHTO, así como aplicando las cargas por eje con las correspondientes separaciones entre los ejes de 20 258 vehículos de carga, tipos T3-S3 de seis ejes y T3-S2-R4 de nueve ejes, contenidas en muestras de pesos y dimensiones que capturó la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (**SCT**), durante 1993, 1994 y 1996, en 26 sitios de aforo en distintas carreteras del país.

Para subsanar esta deficiencia, en la referencia 2 se desarrolló un modelo de cargas vivas que es adecuado para diseñar puentes en carreteras troncales y principales (tipos ET, A, B y C) de México, según clasificación dada en la referencia 4.

Asimismo, en la referencia 5 se generó otro modelo de cargas vehiculares para las vías alimentadoras (tipo D).

En ambos casos se emplearon métodos estadísticos y de confiabilidad probabilística; en el primero se manejaron los datos de las muestras mencionadas; en tanto que en el segundo se recurrió a muestras de pesos y dimensiones de 18 779 camiones de carga tipo C3, recopiladas también por la SCT en los años ya señalados.

El objetivo del presente trabajo, es señalar cómo se adaptaron los dos modelos antes referidos, para integrarse como parte de las nuevas normas de diseño de puentes, que formularon la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

2. Diseño de la norma de carga viva vehicular, IMT 66.5, para carreteras principales

El modelo de cargas vehiculares para diseño estructural de puentes que se ubiquen en carreteras troncales y principales, tiene dos sistemas de fuerzas verticales:

El primero se conforma de 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 3.0 m de ancho. Ambas se aplican simultáneamente en las posiciones que ocasionen los efectos más desfavorables.

Para diseñar cuantitativamente el modelo de cargas vivas para puentes en carreteras tipos ET, A, B y C, se tomó en cuenta que en las referencias 1 y 2 se comprobó que los elementos mecánicos más grandes en dichas construcciones 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 que esos automotores transmiten a la estructura de un puente, se agrupan en los ejes de rodamiento que conforman tándems, trídems y dobles tándems.

Por tanto, como punto de partida para formular y calcular el sistema de cargas concentradas del modelo, **se planteó la hipótesis** de que el **momento flexionante y la fuerza cortante máximos** que cada vehículo 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. En la referencia 2 **se comprobó estadísticamente que esta hipótesis es correcta.**

Considerando esto, el diseño conceptual del **sistema de cargas concentradas** de este modelo, se establece con una topología simple de sólo **tres ejes de aplicación**, creando así un “**vehículo virtual**” (no existe) con un eje delantero, un intermedio y un trasero, según se muestra en la Figura 1; 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 al peso total que baja por el trídem de los T3-S3, y por el doble tándem de los T3-S2-R4.

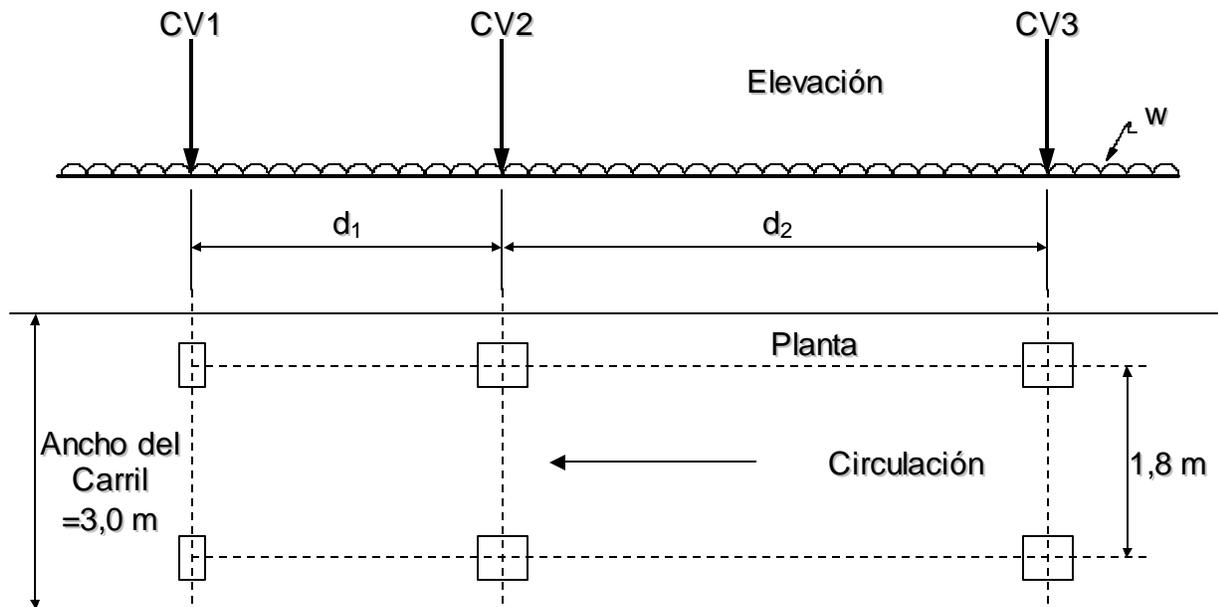


Figura 1. Modelo conceptual de las cargas vehiculares para diseño de puentes en carreteras principales

Las magnitudes de todas las cargas virtuales **CV1**, **CV2** y **CV3** se calculan realizando análisis probabilísticos de confiabilidad, en los que se establece un **riesgo (probabilidad) muy pequeño** de que sean excedidas en el **lapso esperado de vida útil** del puente, de manera que al aplicar las cargas que resultan, para diseño o revisión, se logre un **nivel de seguridad estructural razonablemente alto**. Las separaciones entre las cargas concentradas, **d₁** y **d₂**, se determinan por análisis estadísticos.

2.1. Cálculo del sistema de cargas concentradas

Mediante diversos análisis de bondad del ajuste de algunos modelos teóricos probabilísticos, a las distribuciones empíricas de frecuencias relativas acumuladas que se calcularon con los 20 258 datos de las variables aleatorias **PT1** (peso del tándem) y **PT2** (peso del trídem o del doble tándem), se determinó que la **distribución de Weibull** (referencia 6) resultó la más razonable en ambos casos (referencias 2 y 7). Con **PT1** se calcula **CV2**, y con **PT2** se calcula **CV3** (Figura 2).

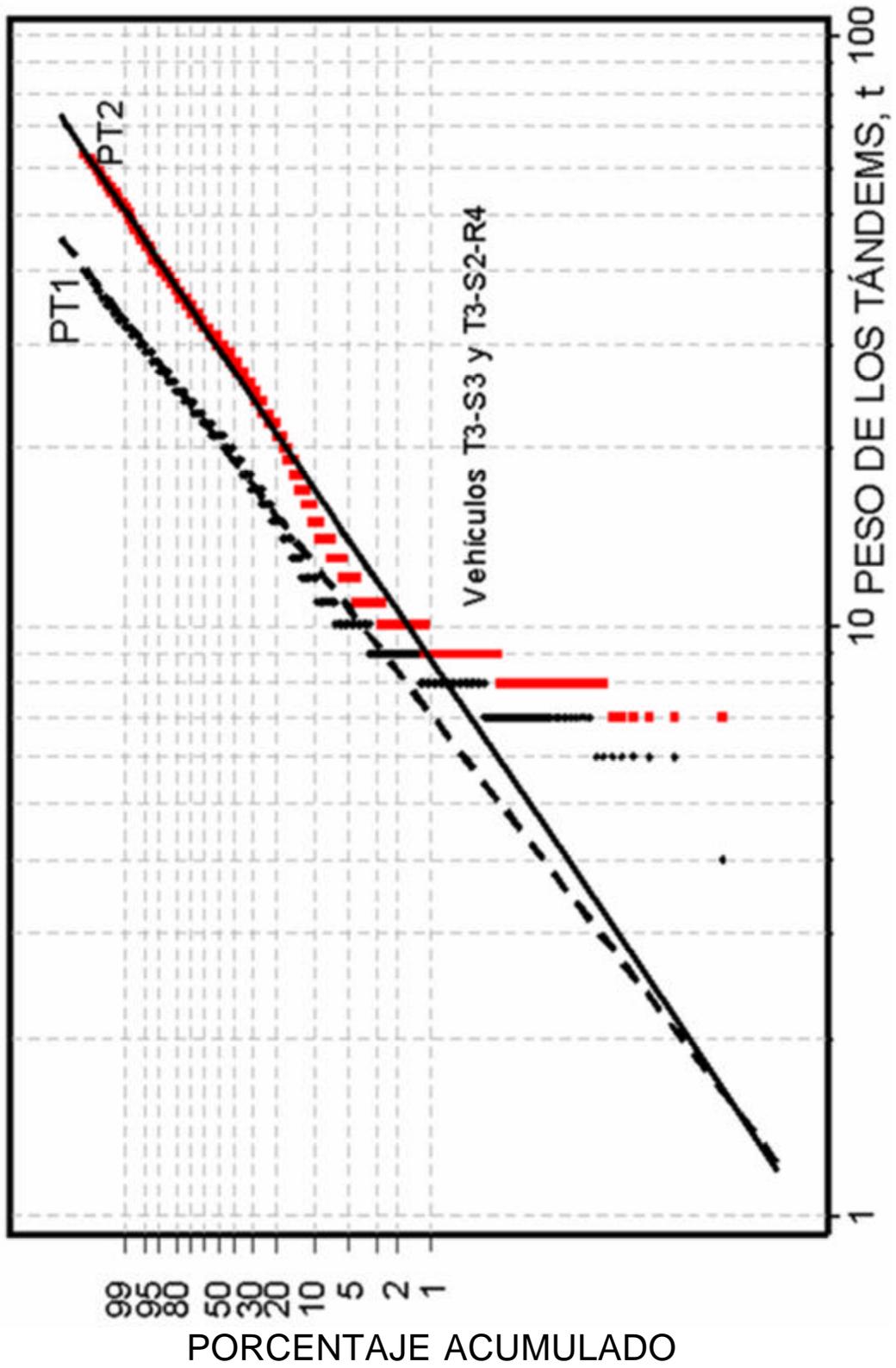


Figura 2. Distribuciones de Weibull para PT1 y PT2

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 las cargas para diseño de los puentes sea de **50 años**, con lo cual se logra un nivel de seguridad razonablemente alto. Lo anterior condujo a una **probabilidad de no excedencia de $2,78 \times 10^{-5}$ por ciento** (referencia 4), a la cual corresponden, con las respectivas leyes de probabilidades, **CV2** = 435,4 kN (44,4 t), **CV3** = 698,2 kN (71,2 t) y **CV1** = 88,3 kN (9,0 t); la suma de éstos es el peso vertical total de 1 222 kN (124,6 t).

Para establecer las distancias, **d₁** y **d₂**, del sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas, se utilizaron los promedios aritméticos que se calcularon con las muestras de las separaciones de los ejes vehiculares involucrados en cada caso; con ellos se determinó, redondeando a las unidades, que **d₁** = 5 m y **d₂** = 9 m.

2.2. Determinación del sistema de cargas concentradas nominales, y de los factores de carga viva

Los valores de las cargas virtuales antes calculados, son los que se utilizarían para el análisis estructural; sin embargo, a fin de 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, y generar así el **sistema de cargas concentradas nominales** del modelo de cargas vivas.

Tomando como valor nominal el peso bruto vehicular máximo que permite el reglamento de pesos y dimensiones (referencia 4), de 652 kN (66,5 t), y considerando que la suma de las cargas virtuales es 1 222 kN (124,6 t), se obtiene que el **factor de carga viva básico** es el cociente del segundo entre el primero, el cual, redondeado a una decimal, es 1,9.

Dividiendo entre 1,9 a las cargas virtuales, redondeando y ajustando a que la suma sea 652 kN (66,5 t), se obtiene que las cargas nominales son **P₁** = 49 kN (5 t), **P₂** = 235 kN (24 t) y **P₃** = 368 kN (37,5 t). Por tanto, el **sistema de cargas concentradas nominales del modelo de cargas vivas** queda con la topología mostrada en la Figura 3.a.

Este sistema de cargas nominales 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 básico de 1,9 el aplicable a la combinación de cargas denominada en el reglamento de la AASHTO como “**Resistencia I**”; a partir de éste se calcularon (referencia 2) los **factores de carga viva para las demás combinaciones de cargas que se involucran en los otros**

estados límite, los cuales se incorporaron en la Tabla 5 formando parte de la norma SCT.

Para las **carreteras tipo C**, el factor de carga viva básico resulta menor en 10 por ciento, dado que en ellas el peso bruto vehicular máximo permitido es menor (58 t).

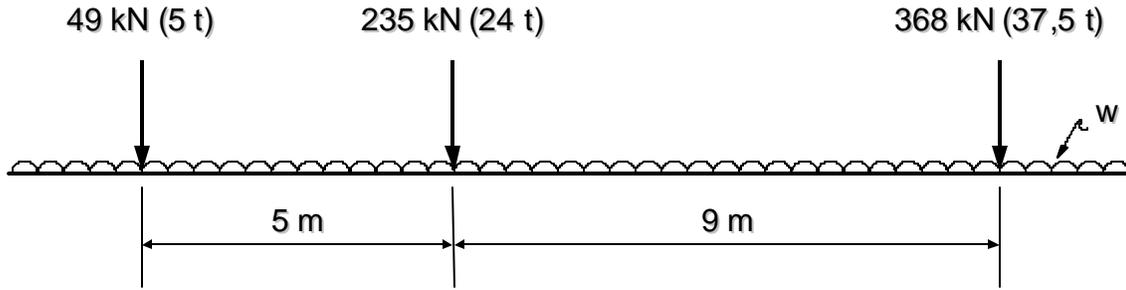
Vale la pena destacar que para la norma SCT, el factor de carga viva básico se cambió ligeramente a 1,95, ya que ahí resulta del producto de otros dos factores, $\gamma = 1,3$ y $\beta_v = 1,5$ (Tabla 5).

Al validar el sistema de cargas concentradas, comparando los elementos mecánicos máximos que éste genera en puentes simplemente apoyados de 15, 30, 45 y 60 m, con los respectivos valores más grandes que produjeron los 20 258 vehículos de la muestra, se determinó que el sistema es adecuado (referencia 2), pero sobrestima los efectos en claros cortos (de 30 m o menos en fuerzas cortantes, y de 15 m o menos en momentos flexionantes máximos). Esto es entendible, toda vez que las fuerzas resultantes **CV2** y **CV3** producen efectos mayores que los que ejercen las individuales (componentes) que bajan por cada eje del tándem o del trídem, que están separados regularmente 1,2 m.

Por tanto, para fines de la norma se consideró conveniente no sobrestimar los efectos en puentes de claro corto al utilizar dichas cargas concentradas, por lo cual se decidió **desglosarlas en cargas por eje**, para claros de 30 m o menores, de la manera que se presenta en la Figura 3.b.

Para puentes con más de 30 m de longitud, se dejaron las cargas originales (Figura 3.a); este valor del claro se escogió en congruencia con el valor más pequeño en que se aplica la ecuación (2), que se presenta más adelante, para calcular la carga uniforme.

3.a) Para claros mayores o iguales que 30 m



$$w = (L - 30) / 6 \text{ kN/m} = (L - 30) / 60 \text{ t/m, si } 30 \text{ m} = L = 90 \text{ m}$$

$$w = 10 \text{ kN/m} = 1 \text{ t/m, si } L > 90 \text{ m}$$

3.b) Para claros menores de 30 m

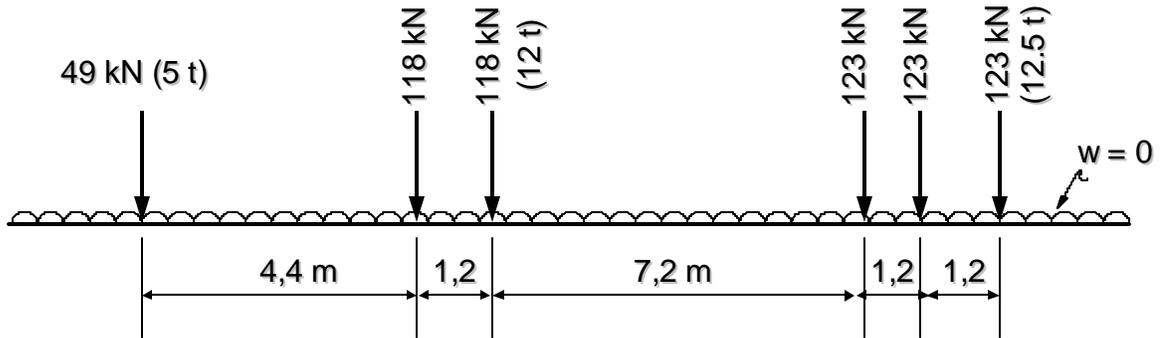


Figura 3. Modelo de cargas vivas IMT 66.5

En la Tabla 1 se valida la eficacia de este **sistema de cargas concentradas nominales**, denominado en la norma como **IMT 66.5**, al verificar que los efectos que éste produce son ligeramente superiores a los valores más grandes de las fuerzas cortantes, **V**, y momentos flexionantes, **M**, **máximos reales** calculados con la muestra de 20 258 pesos y dimensiones de vehículos pesados ya señalados, excepto en la fuerza cortante para **L = 15 m**, en que el déficit es menor al 1 %.

Tabla 1. Comparación de efectos. Modelo IMT 66.5

L, m	Efectos máximos, vehículo virtual IMT 66.5		Valores máximos esperados		Valores máximos reales	
	M, t-m	V, t	M, t-m	V, t	M, t-m	V, t
15	126	42,2	126	41,0	119	42,6
30	362	56,5	345	49,7	351	49,2
45	606	59,6	575	53,9	602	55,4

Asimismo, también son superiores a los elementos mecánicos **máximos esperados**, los cuales se obtuvieron con métodos probabilísticos en la referencia 2, para una vida de diseño de los puentes de 50 años, a la cual, como ya se señaló, corresponde una probabilidad de excedencia de $2,78 \times 10^{-5}$ por ciento.

Los valores reales y estimados se calcularon en la referencia 2 para puentes simplemente apoyados con claros, L , de 15, 30 y 45 m, y en la Tabla 1 se presentan divididos entre el factor de carga viva básico de 1,95 para que sean comparables.

2.3. Cálculo del sistema de carga uniforme

La **carga uniforme del modelo** es un complemento a las cargas concentradas que se coloca en el claro del puente, de manera que la suma de los efectos (momentos flexionantes y fuerzas cortantes máximos) que cada sistema de cargas produce, totalice el efecto máximo que ocasiona una secuencia de vehículos pesados de carga circulando, uno tras otro, sobre un puente dado.

Estos últimos efectos fueron calculados en la referencia 2, realizando un proceso de simulación estocástica de secuencias de tres vehículos articulados, que fueron seleccionados al azar, de entre los 300 más pesados tipos T3-S3 y T3-S2-R4, de la muestra mencionada.

Para cada secuencia, se calcularon los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos que los vehículos ocasionaban a puentes simplemente apoyados desde 15 hasta 90 m de claro; mediante criterios de inferencia estadística, para una probabilidad de excedencia de $2,78 \times 10^{-5}$ por ciento, se determinaron los valores de diseño y, para ellos, se calcularon las respectivas magnitudes de la carga uniforme.

De esta manera, el valor de la **carga uniforme nominal** asociada al factor de carga viva de 1,95, resultó ser $w = 0$ para claros menores de 30 m, $w = 0,5$ t/m para $L = 60$ m, y $w = 1,0$ t/m para $L = 90$ m. Para fines de la norma SCT se decidió asignar a w las siguientes ecuaciones (Figura 3):

$$w = 0, \text{ si } L \leq 30 \text{ m} \quad (1)$$

$$w = (L - 30) / 6 \text{ kN/m} = (L - 30) / 60 \text{ t/m}, \text{ si } 30 \text{ m} = L = 90 \text{ m} \quad (2)$$

$$w = 10 \text{ kN/m} = 1 \text{ t/m}, \text{ si } L > 90 \text{ m} \quad (3)$$

2.4. Comparación del modelo IMT 66.5 con el modelo original

En las Figuras 4 y 5 se comparan los valores de los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximas, que resultan de aplicar los modelos original e IMT 66.5, normalizados a los de éste último.

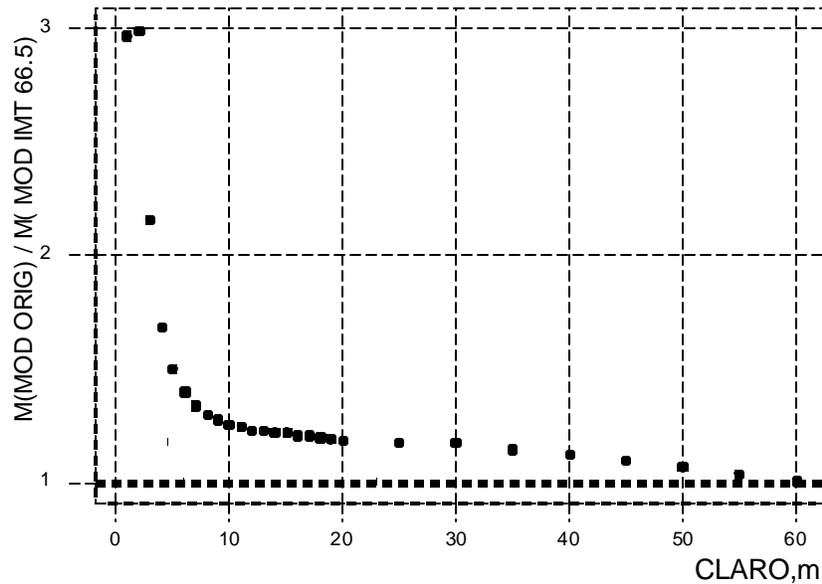


Figura 4. Relación de momentos flexionantes máximos

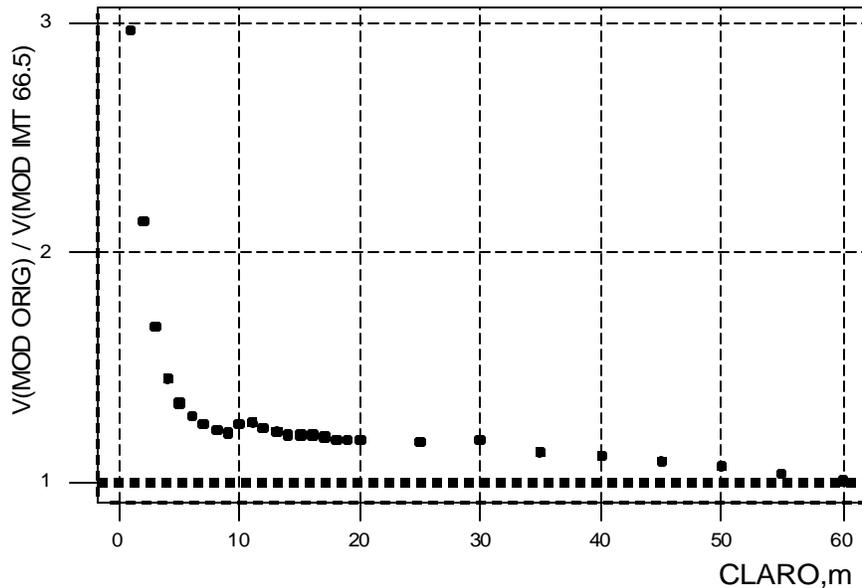


Figura 5. Relación de fuerzas cortantes máximas

En ambas figuras se aprecia que con el nuevo modelo se lograron los efectos deseados, ya que la reducción es muy drástica en puentes con claros de 1 a 5 m (en

que realmente se trata de alcantarillas), lo cual es lógico toda vez que la aplicación de la fuerza concentrada de 37,5 t ocasiona en ellos, elementos mecánicos mucho mayores que los que producen sus tres componentes de 12,5 t cada una, separadas 1,2 m.

En ambas figuras se aprecia que la diferencia se desvanece gradualmente hasta que en $L = 60$ m las relaciones valen 1, ya que a partir de ahí los dos modelos son idénticos.

Con el fin de proporcionar **ayudas de diseño** para puentes simplemente apoyados, en la Figura 6 se presentan las gráficas de los momentos flexionantes máximos totales que produce el **modelo IMT 66.5** (cargas concentradas más carga uniforme **nominal aplicado a un carril de circulación**), y los que produce el sistema de cargas concentradas solamente, **sin incorporar, en ambos casos, el factor de carga viva**.

La Figura 7 ilustra las gráficas correspondientes a las fuerzas cortantes máximas.

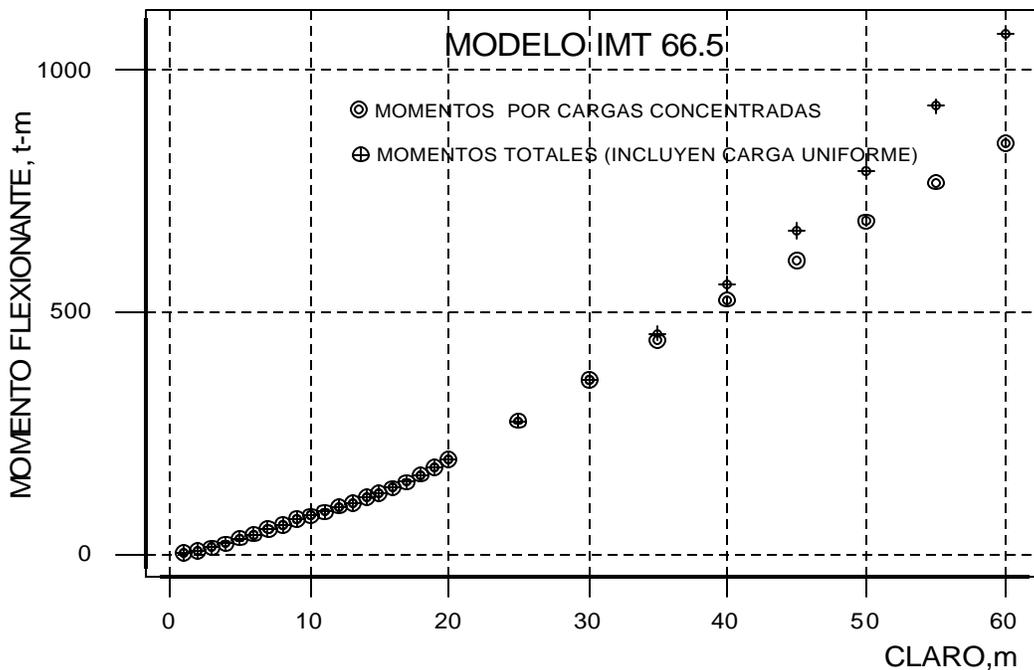


Figura 6. Momentos flexionantes máximos

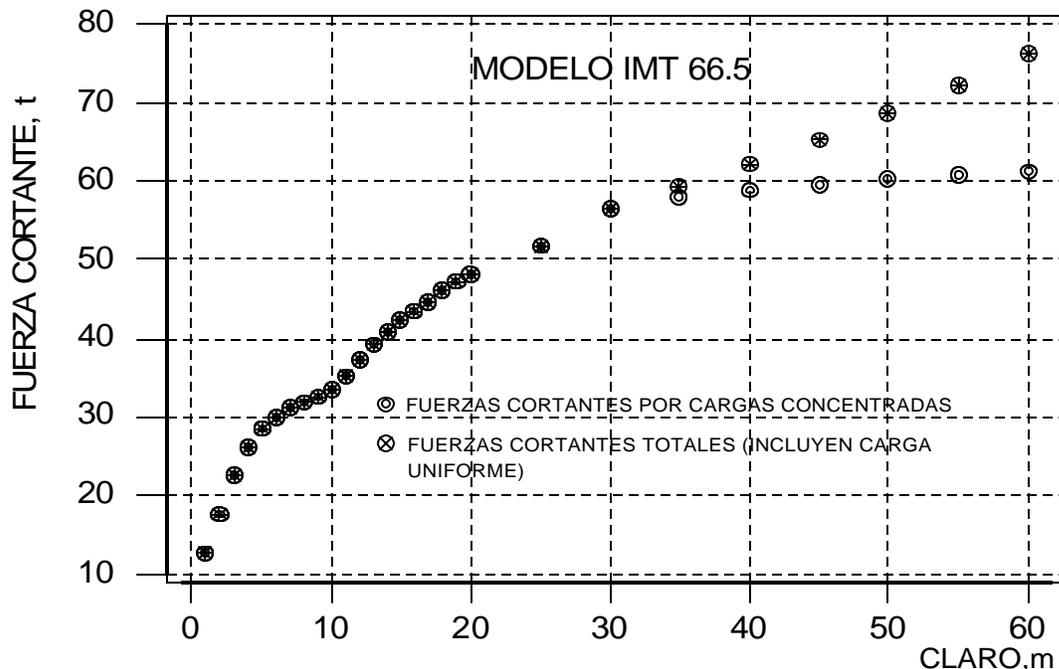


Figura 7. Fuerzas cortantes máximas

2.5. Presencia simultánea de cargas vivas en varios carriles

En los diversos reglamentos que existen para el diseño estructural de puentes, es aceptable multiplicar por factores iguales o menores de uno a los sistemas de carga viva, cuando éstos se aplican a más de un carril simultáneamente, para tomar en cuenta la bajísima probabilidad de que en más de uno se presenten simultáneamente vehículos con las cargas de diseño.

En virtud de que las magnitudes de las cargas que se calcularon aquí para el modelo de cargas vivas, corresponden a una probabilidad de excedencia considerada como aceptable en una sola línea de tránsito, en la norma SCT se propone utilizar los factores de presencia múltiple, **R**, señalados en la Tabla 2, los cuales se adoptaron del reglamento canadiense ODBC (referencia 9), por corresponder a probabilidades de excedencia razonablemente pequeñas, según se demostró en la referencia 2.

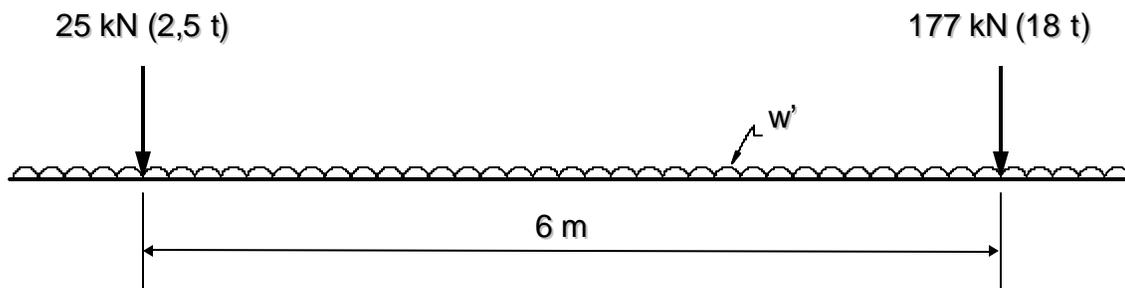
Tabla 2. Factores de presencia múltiple

Número de líneas cargadas	Factor de presencia múltiple, "R"
1	1,00
2	0,90
3	0,80
4	0,70
5	0,60
6 o más	0,55

3. Diseño de la norma de carga viva vehicular, IMT 20.5, para carreteras alimentadoras

El modelo de cargas vivas vehiculares para **carreteras alimentadoras**, o **tipo D**, mostrado en la Figura 8, se desarrolló en la referencia 5 siguiendo el procedimiento señalado en los capítulos anteriores (una versión resumida se publicó en la referencia 7).

8.a) Sistema de cargas concentradas nominales



8.b) Carga uniforme nominal, w'

$$w' = 0, \text{ si } L = 30 \text{ m}$$

$$w' = 0,13 \text{ t/m, si } L > 30 \text{ m}$$

Figura 8. Modelo original de cargas vehiculares para puentes en carreteras alimentadoras

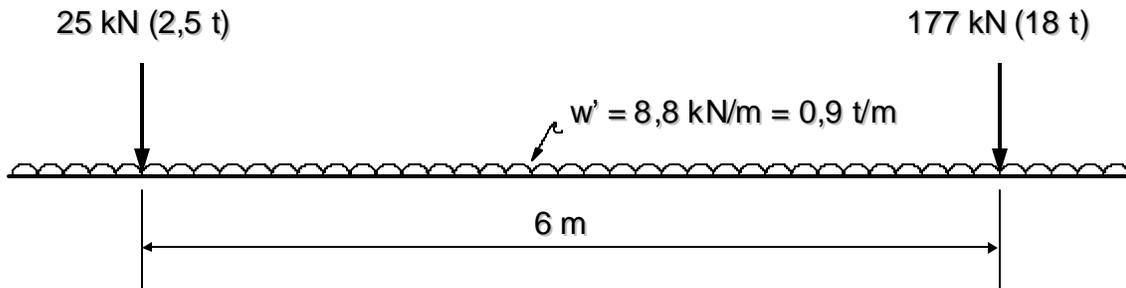
Los sistemas de cargas concentradas y uniforme son los nominales, por lo cual éstas, o sus efectos, **deben multiplicarse por los factores de carga señalados en la norma SCT**, que corresponden a los distintos grupos de fuerzas que se combinan para diseño o para revisión; el **factor de carga viva básico**, también aquí es 1,95 (Tabla 5).

El modelo se desarrolló en virtud de que, al aplicar el IMT 66.5, o el especificado en el nuevo reglamento AASHTO, se obtienen momentos flexionantes y fuerzas cortantes máximos demasiado grandes, ya que en este tipo de caminos el vehículo más pesado que se permite en el reglamento vigente de pesos y dimensiones de la SCT es el de configuración C3, con un peso bruto permitido de 20,5 t, en contraste con el T3-S2-R4 que circula por las carreteras principales, que tiene autorizado bruto hasta de 66,5 t.

En este caso, por **simplicidad para el análisis estructural**, el sistema de cargas concentradas nominales, que corresponde al vehículo virtual, se estableció en la referencia 5, con sólo dos cargas; sin embargo, para fines de la norma SCT en

puentes **menores de 15 m**, se decidió **desglosar la carga de 18 t**, que corresponde a la fuerza resultante en el tándem del vehículo C3, en dos cargas de 9 t, para evitar la sobrestimación de los elementos mecánicos en puentes muy cortos; para longitudes mayores, se utiliza la carga original. Este modelo se denomina **IMT 20.5** en la nueva normativa SCT (Figura 9).

9.a) Para claros mayores o iguales a 15 m



9.b) Para claros menores de 15 m

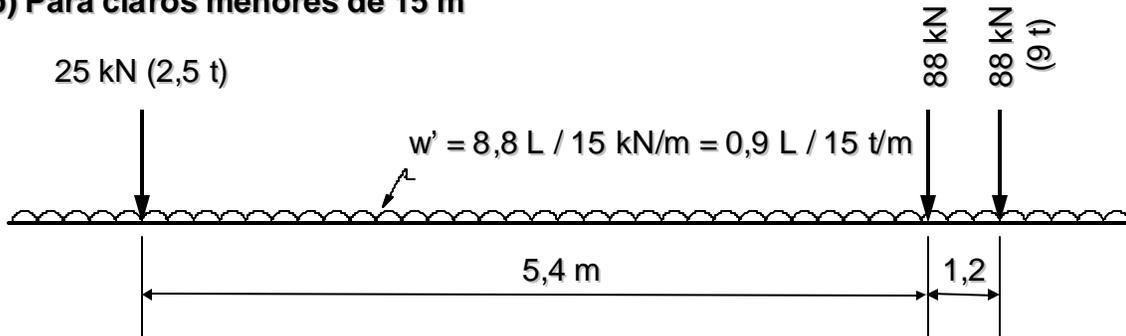


Figura 9. Modelo de cargas vivas IMT 20.5

En la Tabla 3 se valida la eficacia de este nuevo sistema de cargas concentradas, al comprobar que los efectos que éste genera, multiplicados por el factor de carga viva de 1,95, son ligeramente mayores que los respectivos momentos flexionantes y fuerzas cortantes máximos reales, en puentes simplemente apoyados de longitud, **L**, calculados con una muestra de pesos y dimensiones de 18 779 vehículos tipo C3.

Tabla 3. Comparación de efectos. Modelo IMT 20.5

L, m	Efectos máximos, vehículo virtual IMT 20.5		Efectos máximos reales	
	M, t-m	V, t	M, t-m	V, t
15	126,3	36,4	121,5	35,2
30	285,3	39,0	268,0	37,0
45	435,2	39,3	414,0	37,8

Por otra parte, la **carga uniforme nominal** se calculó en la referencia 5, mediante un proceso de simulación estocástica para representar a una secuencia (convoy) de dos camiones cargados tipo C3, circulando uno tras otro en un mismo carril, obteniéndose $w'=0,13$ t/m.

Sin embargo, para el diseño de la norma se consideró que el actual reglamento mexicano de pesos y dimensiones vehiculares autoriza que en las carreteras tipo D puedan circular vehículos articulados con configuraciones y pesos superiores al camión C3, en tramos hasta de 150 km.

Con el fin de incorporar en la norma para diseño de puentes en carreteras tipo D, esta posibilidad no contemplada en el modelo original que se desarrolló en la referencia 5, se decidió **incrementar la magnitud de la carga uniforme**.

Para calcular la nueva magnitud de la carga uniforme nominal, se consideró adecuado suponer que los efectos que ésta produce, más los que ocasiona el sistema de cargas concentradas nominales, se asemejen razonablemente a los que produce un vehículo T3-S3 con pesos reglamentarios (el peso bruto máximo permitido es 48,5 t), y con separaciones entre ejes representados por los promedios aritméticos que se estimaron con la muestra de este tipo de automotores.

Al hacer esto, se determinó que la carga uniforme nominal debe crecer linealmente de cero, en claros de cero metros, a 8,8 kN/m (0,9 t/m) en claros de 15 m, y permanecer constante con ese valor para claros mayores.

Para verificar la efectividad del modelo IMT 20.5, en relación con lo indicado en el párrafo anterior, en la Figura 10 se comparan los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes máximos que se calcularon con las cargas nominales del modelo IMT 20.5 y con el vehículo T3-S3 con los pesos por eje máximos establecidos en el reglamento de pesos y dimensiones vigente. Los valores correspondientes a este último vehículo están divididos entre los que da el modelo IMT 20.5, para tener valores relativos a éste.

En la Figura 10 se aprecia que los momentos flexionantes que genera el modelo IMT 20.5 cubren casi en su totalidad a los del vehículo T3-S3 reglamentario, con déficits menores al 9 %, en claros menores de 10 m. También se observa que las fuerzas cortantes que produce el modelo IMT 20.5 son inferiores para claros entre 1 y 45 m, pero los déficits son menores de 15 %. Sin embargo, es de señalarse que estos déficits no son objetables, ya que quedan cubiertos al multiplicarse los efectos del modelo IMT 20.5 por el factor de carga viva de 1,95.

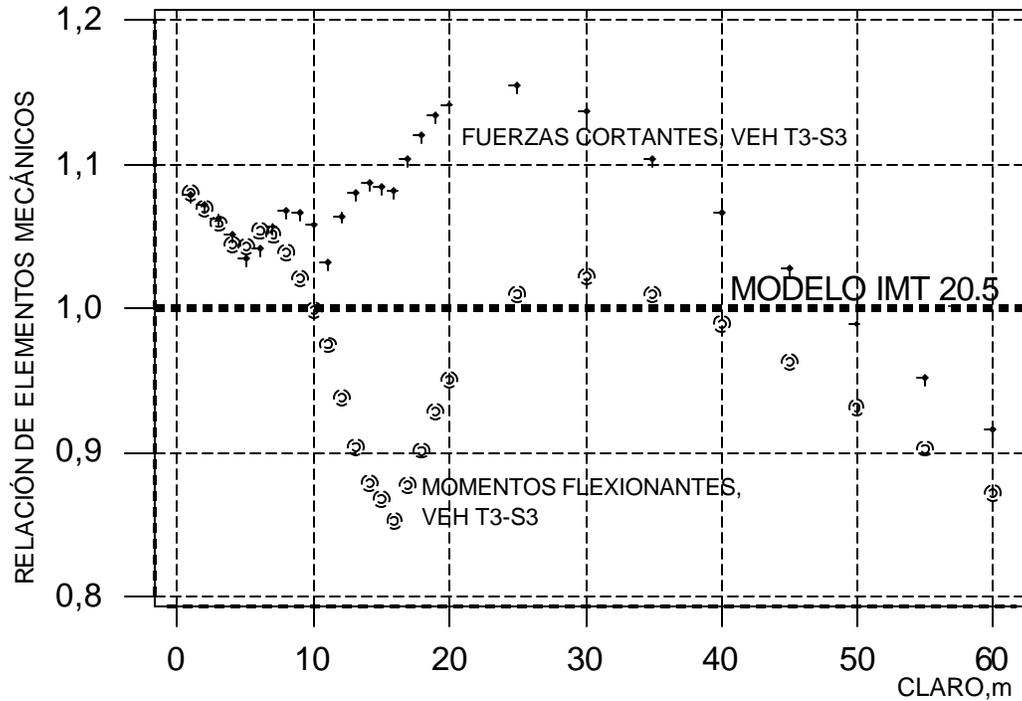
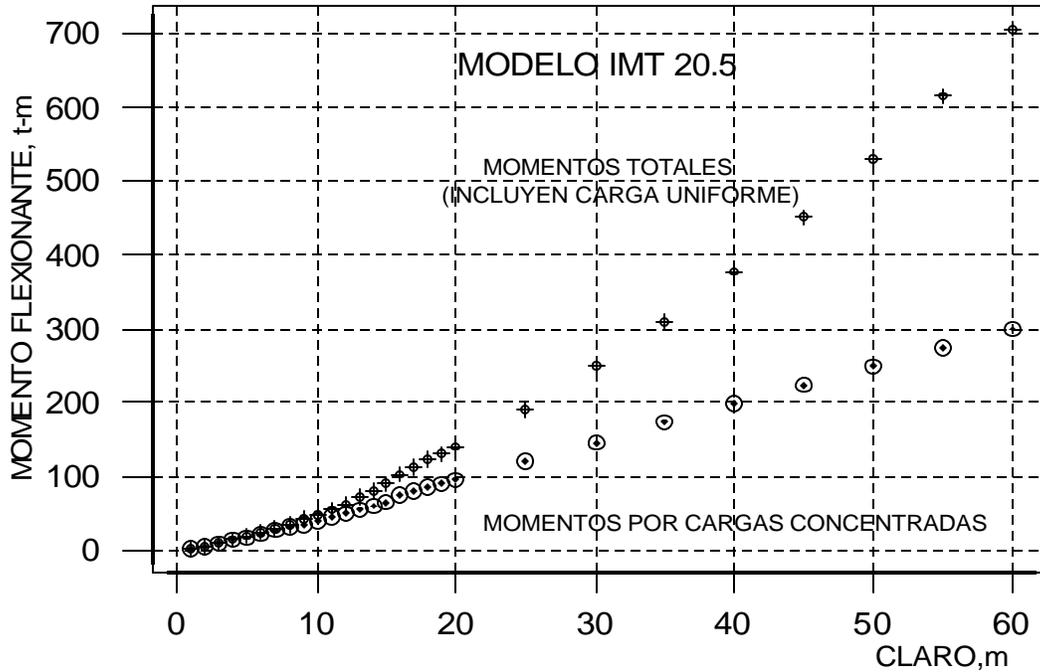
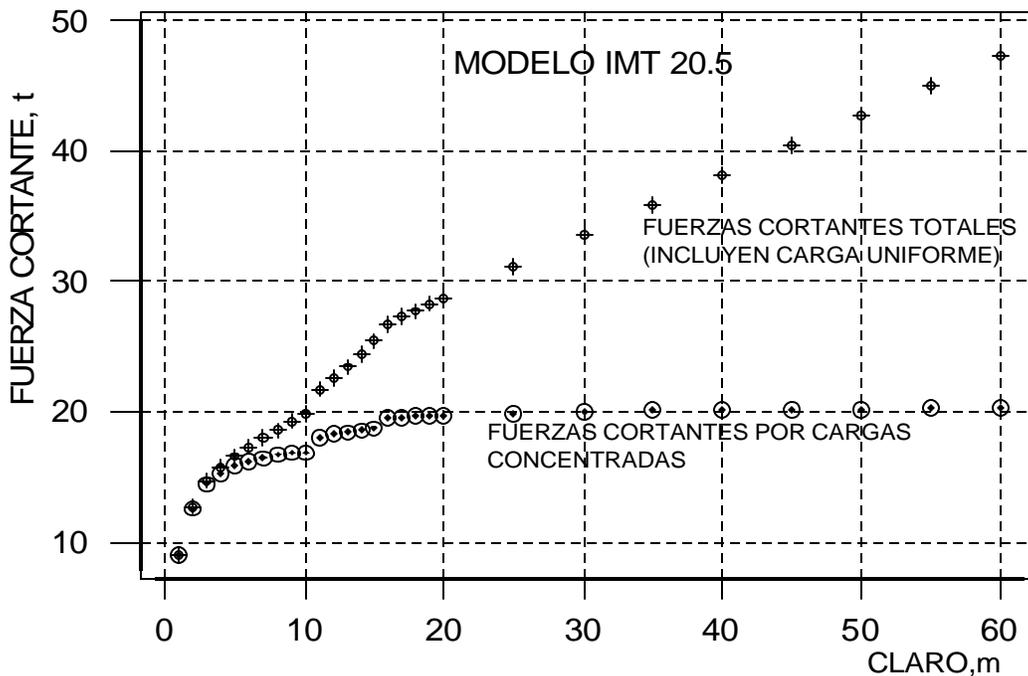


Figura 10. Comparación de efectos, T3-S3 e IMT 20.5

Con el fin de proporcionar **ayudas de diseño** para puentes simplemente apoyados, localizados en carreteras alimentadoras, o tipo D, en las Figuras 11 y 12 se presentan las gráficas de los momentos flexionantes y fuerzas cortantes máximos que produce el modelo IMT 20.5 completo, y el sistema de cargas concentradas del mismo, sin incluir el factor de carga viva.



Momentos flexionantes máximos



Fuerzas cortantes máximas

4. Nueva normativa SCT de cargas vivas vehiculares

Las nuevas normas (referencia 8) pueden consultarse en la página de Internet del Instituto Mexicano del Transporte, www.imt.mx. Los modelos IMT 66.5 e IMT 20.5, se ubican en la parte: 6. Proyecto de Puentes y Estructuras, del tema: Carreteras, en el libro: Proyecto. En esta sección se transcriben sólo algunas secciones de los capítulos 003. Cargas y acciones, y 006. Combinaciones de cargas.

4.1. Cargas y acciones

4.1.1. Definición y clasificación

Las cargas y acciones sobre las estructuras viales se definen y clasifican como sigue:

4.1.1.1. Cargas permanentes

Las cargas permanentes son las que tienen una variación despreciable durante la vida de la estructura, y son:

- Cargas muertas
- Empujes de tierras
- Empujes hidrostáticos

4.1.1.2. Cargas variables

Las cargas variables son las que tienen una variación importante durante la vida de la estructura, con una alta frecuencia de ocurrencia y son:

- Carga viva
- Impacto
- Fuerza centrífuga

4.1.1.3. Cargas eventuales

Las cargas eventuales son las producidas por acciones que ocurren ocasionalmente durante la vida de la estructura, como:

- Viento
- Sismo
- Frenaje
- Fricción

- Variación de temperatura
- Empuje dinámico del agua
- Subpresión
- Contracción por fraguado
- Acortamiento de arcos
- Flujo plástico
- Asentamientos diferenciales
- Oleaje

4.1.1.4. Clasificación de cargas con fines de diseño

4.1.1.4.1. Cargas de servicio

Se denominan cargas de servicio a las que se considera que, con su valor real, actúan sobre la estructura, y que se emplean en el diseño estructural por el método de cargas de trabajo, según lo indicado en las Normas de los Títulos PRY-CAR-6-03, *Diseño de Estructuras de Concreto* y PRY-CAR-6-04, *Diseño de Estructuras de Acero*.

4.1.1.4.2. Cargas últimas

Se denominan cargas últimas a las que tienen un valor igual al de la carga de servicio multiplicado por un factor de carga, y que se emplean en el diseño estructural por el método de factores de carga, según lo indicado en las Normas de los Títulos PRY-CAR-6-03, *Diseño de Estructuras de Concreto* y PRY-CAR-6-04, *Diseño de Estructuras de Acero*.

4.1.2. Cargas variables

4.1.2.1. Cargas vivas

Las cargas vivas son las debidas al peso de las cargas móviles aplicadas que corresponden a camiones, autobuses, automóviles, equipos para construcción y trabajos agrícolas, ciclistas, peatones, ganado y, en pasos inferiores de ferrocarril (PIF), al tren. En casos especiales, la Secretaría podrá ordenar que la estructura se diseñe para cargas vivas diferentes a las mencionadas, por ejemplo, para los casos de puentes ubicados en los accesos a instalaciones militares o industriales. En la determinación de las cargas vivas se toma en cuenta lo siguiente:

4.1.2.1.1. Ubicación de las cargas vivas vehiculares en los carriles de circulación

4.1.2.1.1.1. El número de carriles a considerar en el diseño de la estructura, se determina dividiendo el ancho de calzada a que se refiere la Cláusula E. de la Norma N-PRY-CAR-6-01-002, *Características Generales de Proyecto*, entre tres coma cinco (3,5) metros, redondeado el resultado a la unidad inferior. No se utilizan en el diseño fracciones de carril. Cuando se trate de la revisión estructural por carga viva de estructuras existentes, se consideran dos carriles cuando el ancho de calzada sea mayor de cinco coma cinco (5,5) metros y menor de diez coma cinco (10,5) metros.

4.1.2.1.1.2. Las cargas móviles, concentradas y uniformemente distribuidas, se colocan dentro del carril, en la posición más desfavorable para producir solicitaciones máximas en el elemento que se esté diseñando. No se toma en cuenta la posibilidad de que invadan los carriles adyacentes al que les corresponde.

4.1.2.1.1.3. Se considera que el eje de las ruedas derechas de los vehículos, se acerca a la cara de la guarnición o al límite del carril correspondiente, treinta (30) centímetros como mínimo para el diseño de los voladizos de la losa de calzada, o sesenta (60) centímetros como mínimo para el diseño de otros elementos de la superestructura.

4.1.2.1.1.4. En el caso de banquetas que no estén separadas de la calzada por un parapeto vehicular, se considera como condición extraordinaria, la posibilidad de que una rueda sobre la banqueta se acerque treinta (30) centímetros a la cara de la guarnición.

4.1.2.1.2. Modelos de cargas vivas vehiculares

Para los análisis longitudinal y transversal o tridimensional de la superestructura, se consideran los modelos de cargas vivas debidas a los vehículos, que se indican a continuación:

- Modelos IMT 66.5

Aplicables a estructuras que se proyecten para carreteras de los tipos ET, A, B y C, según la clasificación establecida en el *Reglamento sobre el Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Auto-transporte que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal*, así como para las autopistas, que son carreteras de los tipos ET y A, con accesos controlados.

- Modelos IMT 20.5

Aplicables a estructuras que se proyecten para carreteras de Tipo D, según la clasificación establecida en el *Reglamento sobre el Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Autotransporte que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal*, así como para caminos rurales.

Estos modelos de cargas son virtuales, únicamente con fines de análisis estructural y no representan un vehículo real.

4.1.2.1.2.1. Modelos de cargas vivas vehiculares para el análisis longitudinal

a) Modelo IMT 66.5

Este modelo de cargas vivas para el análisis longitudinal de claros iguales o mayores de treinta (30) metros, consiste en tres cargas concentradas (P_1 , P_2 , P_3) y una carga uniformemente distribuida (w), con los valores que enseguida se indican y distribuidas como se muestra en la Figura 13 de esta Norma. Para carreteras de Tipo C, según la clasificación establecida en el *Reglamento sobre el Peso, Dimensiones y Capacidad de los Vehículos de Autotransporte que Transitan en los Caminos y Puentes de Jurisdicción Federal*, esas cargas deben multiplicarse por un factor de reducción de nueve décimos (0,9).

$$P_1 = 49 \text{ kN} \quad (5,0 \text{ t})$$

$$P_2 = 235 \text{ kN} \quad (24,0 \text{ t})$$

$$P_3 = 368 \text{ kN} \quad (37,5 \text{ t})$$

Para claros iguales o mayores de noventa (90) metros.

$$w = 10 \text{ kN/m} \quad (1 \text{ t/m})$$

Para claros entre treinta (30) y noventa (90) metros.

$$w = 10(L - 30)/60 \text{ (kN/m)}$$

Donde:

W = Carga uniformemente distribuida, (kN/m)

L = Longitud del claro, (m)

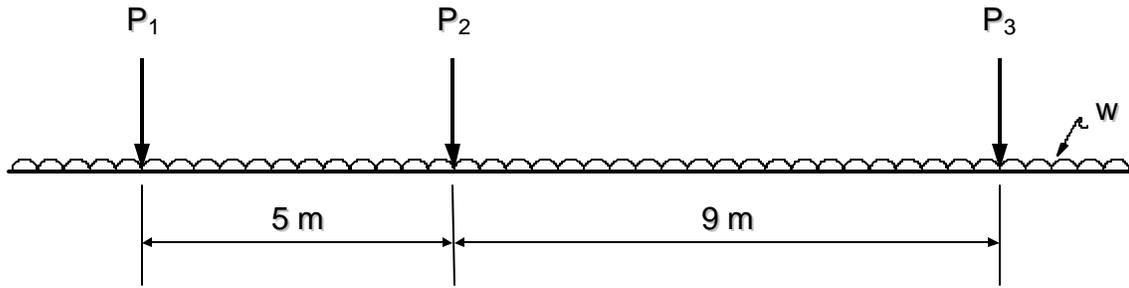


Figura 13. Modelo de cargas vivas vehiculares IMT 66.5, para el análisis longitudinal de puentes y estructuras similares, con claros iguales o mayores de 30 m

Para claros menores de treinta (30) metros, $w = 0$ y P_2 , se divide en dos (2) cargas iguales de ciento dieciocho (118) kilonewtons (12 t) y P_3 , se divide en tres cargas iguales de ciento veintitrés (123) kilonewtons (12,5 t), en ambos casos, espaciadas uno coma dos (1,2) metros, como se muestra en la Figura 14 de esta Norma.

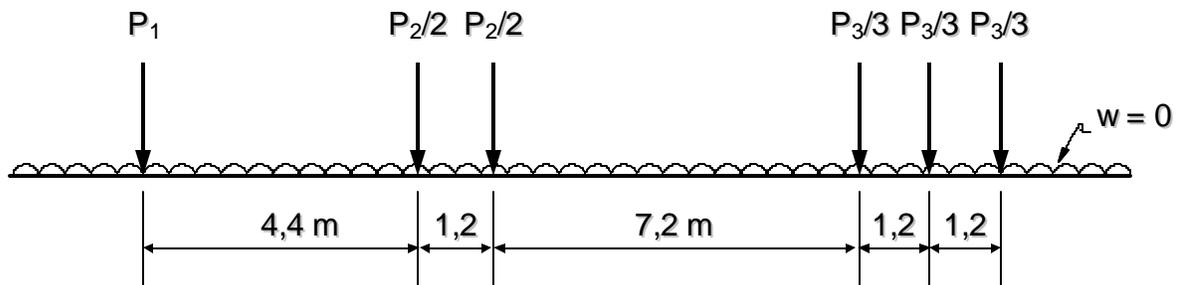


Figura 14. Modelo de cargas vivas vehiculares IMT 66.5, para el análisis longitudinal de puentes y estructuras similares, con claros menores de 30m

b) Modelo IMT 20.5

Este modelo de cargas vivas para el análisis longitudinal de claros iguales o mayores de quince (15) metros, consiste en dos cargas concentradas (P_4 , P_5), y una carga uniformemente distribuida (w'), con los valores que enseguida se indican, y distribuidas como se muestra en la Figura 15 de esta Norma:

$$P_4 = 25 \text{ kN (2,5 t)}$$

$$P_5 = 177 \text{ kN (18 t)}$$

$$w' = 8,8 \text{ kN/m (0,9 t/m)}$$

Si el claro es menor de quince (15) metros, P_5 se divide en dos cargas iguales de ochenta y ocho (88) kilonewtons (9 t), espaciadas uno coma dos (1,2) metros, como se muestra en la Figura 16 de esta Norma, y la carga uniformemente distribuida w' se toma como:

$$w' = \frac{8,8}{15} L$$

Donde:

w' = Carga uniformemente distribuida, (kN/m)

L = Longitud del claro, (m)

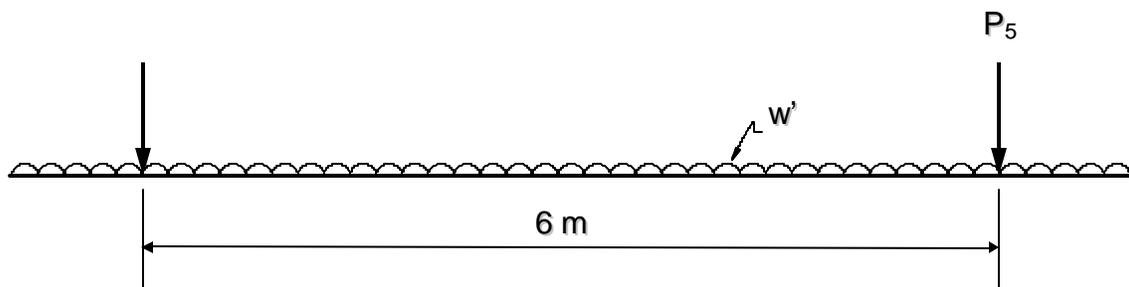


Figura 15. Modelo de cargas vivas vehiculares IMT 20.5, para el análisis longitudinal de puentes y estructuras similares, con claros iguales o mayores de 15 m

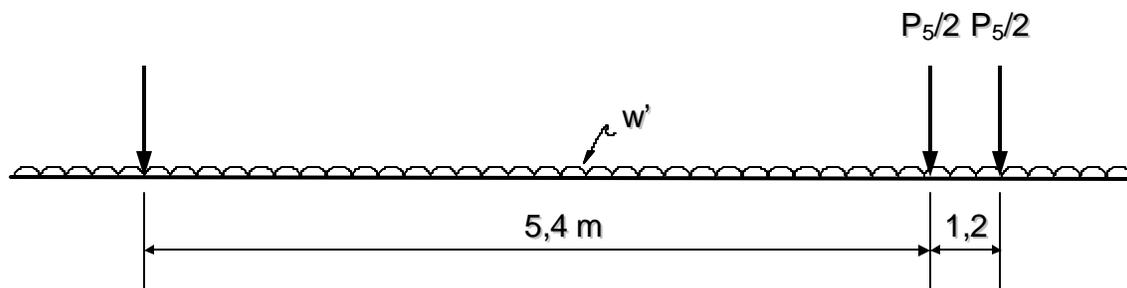


Figura 16. Modelo de cargas vivas vehiculares IMT 20.5, para el análisis longitudinal de puentes y estructuras similares, con claros menores de 15 m

Cuando, por crecimiento esperado del volumen de tránsito, se prevea una futura mejora de las características físicas y geométricas de la carretera Tipo D o del camino rural, cambiando su clasificación, la Secretaría puede ordenar que el análisis longitudinal de la superestructura se ejecute como si se tratara de una estructura sujeta a tránsito pesado, utilizando el modelo descrito en el Punto a) de este párrafo.

4.1.2.1.2.2. Modelos de cargas vivas vehiculares para el análisis transversal o tridimensional

Cuando sea aplicable la carga uniformemente distribuida w o w' , según se indica en los Puntos a) y b) del Párrafo 4.1.2.1.2.1. de esta Norma, respectivamente, en los modelos de cargas vivas vehiculares IMT 66.5 e IMT 20.5, para el análisis transversal o tridimensional de la superestructura, dicha carga se distribuye en un ancho de tres (3) metros. Para vigas de claros continuos, se aplica únicamente en aquellos claros en que produce efectos desfavorables en el elemento que se calcule.

Estos modelos comprenden las cargas concentradas aplicadas sobre la superficie de rodamiento, cuyas magnitudes y distribuciones en planta se muestran en las Figuras 17 y 18 de esta Norma, según se trate de estructuras sujetas a tránsito pesado o ligero, conforme a lo señalado en el Párrafo antes mencionado, respectivamente. Las cargas se pueden considerar concentradas en los centros de las áreas sombreadas que se indican en dichas figuras o repartidas en esas áreas. En ningún caso se consideran porciones de las cargas concentradas, a menos que físicamente algunas de ellas se salgan de la estructura.

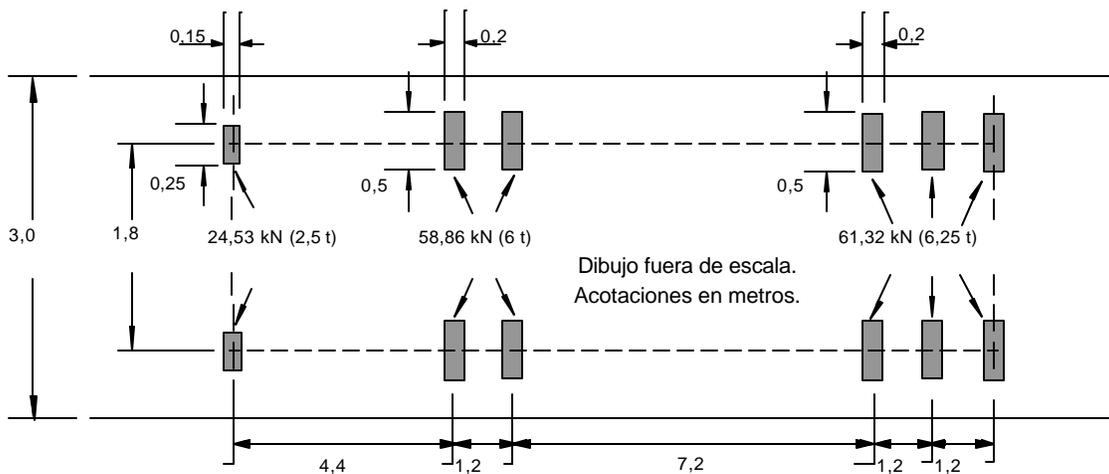


Figura 17. Modelo de cargas vivas vehiculares IMT 66.5, para el análisis transversal o tridimensional de puentes y estructuras similares

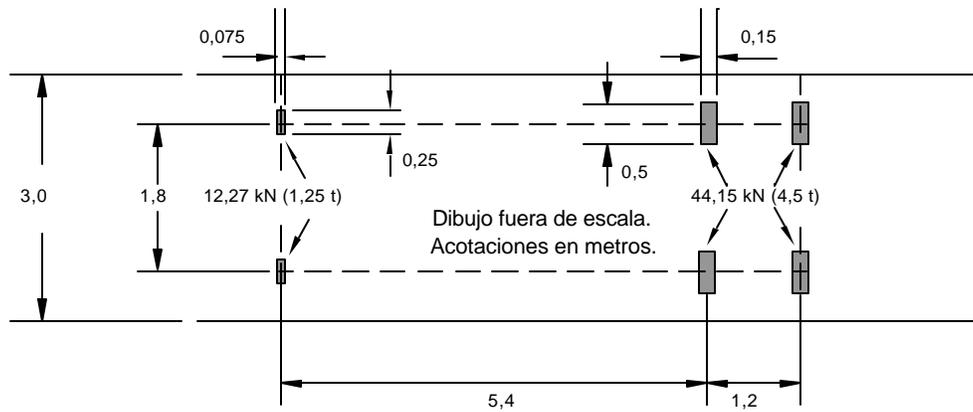


Figura 18. Modelo de cargas vivas vehiculares IMT 20.5, para el análisis transversal o tridimensional de puentes y estructuras similares

4.1.2.1.2.3. Factores de reducción en carriles múltiples

Cuando la máxima sollicitación por carga viva vehicular en un elemento ocurra por la presencia simultánea del modelo de carga en varios carriles, para tomar en cuenta la baja probabilidad de la coincidencia de posición para producir el máximo efecto, se aplican los factores de reducción que se indican en la Tabla 4 de esta Norma.

Tabla 4. Factores de reducción en carriles múltiples

Número de carriles cargados:	Factor de reducción por presencia múltiple
1	1,00
2	0,90
3	0,80
4	0,70
5	0,60
6 o más	0,55

4.1.3. Impacto

Se denomina “impacto” a un incremento en porcentaje que se aplica a las cargas vivas vehiculares sobre la calzada, para tomar en cuenta los efectos de la vibración de la estructura, que es causada por su respuesta dinámica como un conjunto, a la excitación producida por las ruedas, la suspensión de los vehículos y el golpeteo de las primeras al pasar sobre irregularidades en la superficie de rodamiento, tales como juntas de dilatación, grietas, pequeños baches o despostillamientos. Pueden existir efectos resonantes cuando el periodo del sistema vehicular es similar a la fre-

cuencia propia del puente. El incremento por impacto no se aplica a las cargas sobre la banqueta.

Los elementos estructurales en los que se considera el efecto del impacto, son:

- Superestructuras incluyendo columnas o muros de marcos rígidos.
- Pilas con o sin dispositivos de apoyo (independientemente del tipo de apoyos), excluyendo las zapatas u otros tipos de cimentación y las porciones de las pilas por debajo del nivel del terreno.
- Las porciones de los pilotes de acero o de concreto que sobresalgan del nivel del terreno y que soporten directamente la superestructura.

En los estribos, muros de retención, pilotes que no sean de acero o concreto y estructuras de madera, no se considera el efecto del impacto.

Los elementos mecánicos por carga viva se incrementan por efecto del impacto en los porcentajes siguientes:

- Setenta y cinco (75) por ciento para los elementos que integren una junta de dilatación en la calzada
- Cuarenta (40) por ciento cuando el elemento mecánico es producido por un sólo eje (desglosado) del modelo IMT 66.5 o del modelo IMT 20.5
- Treinta (30) por ciento si el elemento mecánico es producido por dos (2) o tres (3) ejes desglosados de los modelos IMT 66.5 o IMT 20.5
- Veinticinco (25) por ciento si el elemento mecánico es producido por más de tres (3) ejes (desglosados del modelo IMT 66.5)

A las cargas w y w' de los modelos IMT 66.5 e IMT 20.5 respectivamente, se les aplicará el mismo porcentaje por concepto de impacto que corresponda al número de ejes con el que se define el elemento mecánico por carga viva.

Cuando la carga viva produzca reacción negativa en un dispositivo de apoyo, para el diseño de los elementos de anclaje se duplica el porcentaje de impacto definido según los párrafos anteriores.

4.2. Combinaciones de cargas

4.2.1. Definición

Las combinaciones de cargas para diseño, son el conjunto de cargas permanentes, variables y eventuales, determinadas conforme a lo indicado en las Normas N-PRY-CAR-6-01-003, *Cargas y Acciones*, N-PRY-CAR-6-01-004, *Viento*, y N-PRY-CAR-6-01-005, *Sismo*, y que se agrupan dependiendo de la probabilidad de su ocurrencia simultánea en cada elemento de la estructura. Para cada caso específico y dependiendo de sus circunstancias particulares, se seleccionan los grupos de cargas aplicables para diseñar cada elemento, según la condición más desfavorable, considerando un incremento en los esfuerzos admisibles básicos para cada grupo cuando se utiliza el método de diseño por esfuerzos de trabajo o, si se emplea el método de factores de carga, estableciendo en cada grupo los factores para obtener las cargas o acciones últimas a partir de los valores de servicio en función de la probabilidad de su ocurrencia simultánea.

4.2.2. Grupos de cargas

Los elementos de la estructura o de la cimentación sobre la que se apoye, se diseñan para resistir, en condiciones de seguridad, todos los grupos de carga que sean aplicables al tipo de estructura y a las condiciones particulares del sitio en donde ésta se ubique, considerando lo siguiente:

- 4.2.2.1.** Cada grupo de cargas se integra por las combinaciones de cargas permanentes, variables y eventuales que sean aplicables, es decir:

Para el grupo **N**: $CP_N + CV_N + CE_N$

Donde:

N	=	Número del grupo a considerar
CP_N	=	Combinación de cargas permanentes para el grupo N
CV_N	=	Combinación de cargas variables para el grupo N
CE_N	=	Combinación de cargas eventuales para el grupo N

Dichas combinaciones comprenden las acciones sobre la estructura debidas a las siguientes cargas:

- Combinación de cargas permanentes (CP_N): $\beta_{CM}CM + \beta_{ET}ET$

- Combinación de cargas variables (**CV_N**): $\beta_V (V + I) + \beta_{FC} FC$
- Combinación de cargas eventuales (**CE_N**):

$$\beta_{VE} VE + \beta_{VCV} VCV + \beta_S S + \beta_{FL} FL + \beta_{ACT} (A + C + T) + \beta_{PL} PL + \beta_{SP} SP$$

Donde:

CM	=	Carga muerta	S	=	Sismo
ET	=	Empuje de tierra	FL	=	Frenaje
V	=	Carga viva	A	=	Acortamiento de arcos
I	=	Impacto	C	=	Efecto de la contracción por fraguado
FC	=	Fuerza centrífuga	T	=	Efecto de temperatura
VE	=	Viento sobre la estructura	PL	=	Empuje dinámico del agua
VCV	=	Viento sobre la carga viva	SP	=	Subpresión

β_{CM} , β_{ET} , β_V , β_{FC} , β_{VE} , β_{VCV} , β_S , β_{FL} , β_{ACT} , β_{PL} y β_{SP} son coeficientes que se aplican a cada una de las cargas y acciones, que consideran la probabilidad de su ocurrencia simultánea, y cuyos valores se obtienen de la Tabla 5 de esta Norma, según el grupo de carga que se considere.

4.2.2.2. Cuando el diseño se realice por el método de cargas de trabajo, tomando en cuenta lo establecido en las Normas de los Títulos PRY-CAR-6-03, *Diseño de Estructuras de Concreto* y PRY-CAR-6-04, *Diseño de Estructuras de Acero*, se atenderá lo siguiente:

4.2.2.2.1. Los esfuerzos admisibles de los elementos por diseñar, se multiplican por el factor de incremento de esfuerzos admisibles (F_{EA}) que se muestra en la Tabla 5 de esta Norma, según el grupo de cargas considerado, salvo en los casos de los grupos *II* y *III*, en los que interviene el viento, cuando se trate de elementos estructurales o conexiones en que los elementos mecánicos de diseño sean causados exclusivamente por la acción del viento, en cuyo caso no se incrementan los esfuerzos admisibles.

4.2.2.2.2. En el grupo *I*, cuando se revise el diseño de la losa de la calzada bajo el supuesto de que una carga de rueda actúa sobre la banqueta a una distancia de treinta (30) centímetros de la cara del parapeto o de la guarnición del lado de la calzada, los esfuerzos admisibles se incrementan multiplicándolos por un factor de incremento de esfuerzos admisibles F_{EA} de uno coma cinco (1,5).

- 4.2.2.2.3.** El valor del coeficiente β_{ET} es en general igual que uno (1), excepto para marcos rígidos, en los que se aplica con un valor de cero coma cinco (0,5), para aquellos elementos en que el empuje de tierras sea favorable.
- 4.2.2.3.** Cuando el diseño se realice por el método de factores de carga, tomando en cuenta lo establecido en las Normas de los Títulos PRY-CAR-6-03, *Diseño de Estructuras de Concreto* y PRY-CAR-6-04, *Diseño de Estructuras de Acero*, se atenderá lo siguiente:
- 4.2.2.3.1.** Cada carga y acción de las combinaciones indicadas en la Fracción 4.2.2.2., se multiplica además por el factor de carga (γ) que se muestra en la Tabla 5 de esta Norma, según el grupo de cargas considerado.
- 4.2.2.3.2.** En el grupo *I*, para el diseño de las vigas exteriores de una calzada, se revisan dos posibles combinaciones de carga viva: la carga viva vehicular incluyendo la carga por impacto, con un factor de carga (γ) de uno coma cincuenta (1,50), o la combinación de los efectos de la carga viva sobre la banqueteta más la carga viva vehicular, incluyendo la carga por impacto, con un factor de carga (γ) de uno coma veinticinco (1,25), tomando el valor más desfavorable.

Tabla 5. Coeficientes y factores para cada grupo de cargas

Grupo	Coeficiente b para cargas:											Factor de carga <i>g</i>	Factor de incremento de esfuerzos <i>F_{EA}</i>	
	Permanentes		Variables		Eventuales									
	<i>b_{CM}</i>	<i>b_{ET}</i>	<i>b_V</i>	<i>b_{FC}</i>	<i>b_{VE}</i>	<i>b_{VCV}</i>	<i>b_S</i>	<i>b_{FL}</i>	<i>b_{ACT}</i>	<i>b_{PL}</i>	<i>b_{SP}</i>			
Cargas de trabajo	<i>I</i>	1	[1]	1	1	0	0	0	0	0	1	1	-	1 ^[2]
	<i>II</i>	0	1	0	0	1,0	0	0	0	0	1	1	-	1,25
	<i>III</i>	1	[1]	1	1	0,3	1	0	1	0	1	1	-	1,25
	<i>IV</i>	1	[1]	1	1	0	0	0	0	1 ^[6]	1	1	-	1,25
	<i>V</i>	1	1	0	0	1,0	0	0	0	1 ^[6]	1	1	-	1,40
	<i>VI</i>	1	[1]	1	1	0,3	1	0	1	1 ^[6]	1	1	-	1,40
	<i>VII</i>	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	-	1,33
Factores de carga	<i>I</i>	[3]	[1]	1,5 ^[4]	1	0	0	0	0	0	1	1	1,3 ^[5]	-
	<i>II</i>	[3]	[1]	0	0	1,0	0	0	0	0	1	1	1,30	-
	<i>III</i>	[3]	[1]	1,2	1	0,3	1	0	1	0	1	1	1,30	-
	<i>IV</i>	[3]	[1]	1,2	1	0	0	0	0	1 ^[6]	1	1	1,25	-
	<i>V</i>	[3]	[1]	0	0	1,0	0	0	0	1 ^[6]	1	1	1,25	-
	<i>VI</i>	[3]	[1]	1,2	1	0,3	1	0	1	1 ^[6]	1	1	1,25	-
	<i>VII</i>	[3]	[1]	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1,30	-

[1] Para estos grupos de cargas, el valor de *b_{ET}* se determina conforme a lo indicado en los Incisos 4.2.2.2.3., 4.2.2.3.5. de esta Norma

[2] Véase el Inciso 4.2.2.2.2. de esta Norma

[3] Para estos grupos de cargas, el valor de *b_{CM}* se determina conforme a lo indicado en el Inciso 4.2.2.3.4. de esta Norma

[4] Véase el Inciso 4.2.2.3.3. de esta Norma

[5] Véase el Inciso 4.2.2.3.2. de esta Norma

[6] El factor *b_{ACT}* incluye los efectos de variación de la temperatura ambiental y los del gradiente térmico en el seno de la superestructura

- 4.2.2.3.3** En el grupo *I*, cuando se diseñe la losa de la calzada bajo el supuesto de que una carga de rueda actúa sobre la banqueteta a una distancia de treinta (30) centímetros de la cara del parapeto o de la guarnición del lado de la calzada, para la carga viva incluyendo la carga por impacto se aplica un coeficiente β_V de uno (1), en lugar del indicado en la Tabla 4 de esta Norma.
- 4.2.2.3.4.** El coeficiente β_{CM} es de uno (1) para miembros a flexión y tensión. Para columnas sujetas a flexocompresión se analizan dos alternativas: con un coeficiente β_{CM} igual que uno (1) al verificar la columna para la condición de máxima carga axial y mínimo momento, y con uno de cero coma setenta y cinco (0,75) para verificar la columna en la condición de mínima carga axial y máximo momento.
- 4.2.2.3.5.** Para los empujes laterales en muros de contención y en marcos rígidos, con la exclusión de alcantarillas rígidas, se toma un coeficiente β_{ET} de uno coma tres (1,3), para empujes laterales de tierra en reposo, de uno coma quince (1,15); para empujes verticales de tierra y para alcantarillas rígidas de uno (1); y para alcantarillas flexibles, de uno coma cinco (1,5).

5. Conclusiones

Los modelos de cargas vivas vehiculares desarrollados en las referencias 2 y 5, fueron analizados y adaptados con el fin de generar la nueva norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para el diseño estructural de los nuevos puentes que se construyan, así como de los ya existentes que se revisen para verificar su seguridad y, en su caso, diseñar su reestructuración.

Así, los modelos de cargas vivas incorporados en esta nueva norma, denominados IMT 66.5 e IMT 20.5, son los primeros desarrollados de manera original en México para tal fin, ya que sustituyen a los de la AASHTO que se habían usado siempre y reflejan adecuadamente las condiciones reales de los pesos y dimensiones de los grandes vehículos de carga que circulan por las carreteras mexicanas, por lo que garantizan un alto grado de confiabilidad en la seguridad estructural de los puentes ante este tipo de cargas.

Por tanto, se recomienda ampliamente utilizar la nueva norma SCT con los respectivos modelos de cargas vivas vehiculares IMT 66.5 e IMT 20.5, en vez de otros que no son congruentes con los tipos y características de los vehículos de carga que transitan por las carreteras de México.

6. 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. Rascón, O A. **Modelo de cargas vivas vehiculares para diseño estructural de puentes en México**, Publicación Técnica No. 118, Instituto Mexicano del Transporte, IMT (1999).
3. **LRFD, Bridge Design Specifications**. AASHTO, EUA, 1ª Ed, (1994).
4. **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 sept de 1995.
5. Rascón, O A, **Sistema de cargas vivas vehiculares para diseño de puentes en carreteras alimentadoras**, Publicación Técnica No. 130, Instituto Mexicano del Transporte, IMT (1999).
6. Miller, I y Freund, J E, **Probability and Statistics for Engineers**. Ed. Prentice Hall.
7. Rascón, O A, **Desarrollo de un modelo de cargas vivas para diseño de puentes en México**, Revista Ingeniería Civil, No. 366, oct 1999, Colegio de Ingenieros Civiles de México.
8. SCT, **Normativa para la infraestructura del transporte**, Secretaría de Comunicaciones y Transportes e Instituto Mexicano del Transporte, (2001).
9. **Ontario Highway Bridge Design Code, Ministry of Transportation**. Ontario, Canada (1991).



‡ **Certificación ISO 9001:2000 según documento No 03-007-MX, vigente hasta el 24 de octubre de 2006 (www.imt.mx)**

§ **Laboratorios acreditados por EMA para los ensayos descritos en los documentos MM-054-010/03 y C-045-003/03, vigentes hasta el 9 de abril de 2007 (www.imt.mx)**

CIUDAD DE MÉXICO

Av Patriotismo 683
Col San Juan Mixcoac
03730, México, D F
tel (55) 5598-5610
fax (55) 5598-6457

SANFANDILA

km 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro
tel (442) 216-9777
fax (442) 216-9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx