



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



La Fórmula Puente y los límites de peso de los vehículos de autotransporte

Manuel de Jesús Fabela Gallegos
Oscar Flores Centeno
Salvador Saavedra Ceballos
Manuel de Jesús Fabela Moreno

Publicación Técnica No. 823
Querétaro, México
2024

ISSN 0188-7297

Esta publicación es el producto final del proyecto de investigación interna El 26/23 “Revisión de la Fórmula Puente y su aplicación en la definición del límite de pesos de vehículos de autotransporte”. El proyecto fue realizado en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos y el M. C. Oscar Flores Centeno, investigadores de Dinámica Vehicular de dicha Coordinación. Participaron también el Ing. Salvador de Jesús Saavedra Ceballos, de Entorno Industrial, SA de CV, y el C. Manuel de Jesús Fabela Moreno, estudiante de la carrera de Ingeniería Mecánica del Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro

Se agradece al M. I. Arturo Velasco Hernández, de la Coordinación de la Normativa para la infraestructura del Transporte, por los comentarios aportados sobre aspectos normativos del diseño de puentes actuales. Así mismo, se agradece al Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural, por sus sugerencias para enriquecer el documento.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan los puntos de vista del Instituto Mexicano del Transporte.

Tabla de Contenido

	Página
Sinopsis.....	v
Abstract.....	vii
Introducción.....	1
1. Antecedentes de regulación del peso	5
1.1 Regulación del peso en el autotransporte.....	5
1.1.1 Ley de Vías Generales de Comunicación.....	5
1.1.2 Reglamento sobre explotación de caminos.....	5
1.1.3 Primer cambio a pesos permisibles	7
1.1.4 Incremento del límite de peso: 1980.....	10
1.1.5 Primer reglamento de pesos y dimensiones.....	12
1.2 La Norma Oficial de pesos y dimensiones	14
1.2.1 Primera versión: NOM-012-SCT-2-1994.....	14
1.2.2 Primera modificación: NOM-012-SCT-2-1995.....	17
1.2.3 Actualización sustancial: NOM-012-SCT-2-2008	20
1.2.4 Atención a la seguridad y tecnología: NOM-012-SCT-2-2014 y NOM-012-SCT-2-2017.....	24
1.3 Objetivo y alcances	29
2. La Fórmula Puente	31
2.1 Límite de peso por deterioro de caminos	31
2.2 Primeras formulaciones sobre límites de peso	32
2.3 Fórmula Puente B	35
3. Análisis dimensional y conversión al SGUM.....	41

3.1	Dimensiones de la fórmula puente	41
3.2	Conversión al SGUM.....	42
3.3	Fórmula puente en la NOM de pesos y dimensiones.....	46
4.	Análisis comparativo.....	49
4.1	Requerimientos para la estimación.....	49
4.2	Estimación de pesos con fórmula puente	51
4.3	Comparación de pesos límite y máximo.....	55
4.4	Discusión	60
	Conclusiones.....	63
	Bibliografía	67

Sinopsis

La Fórmula Puente fue definida a partir de diversos estudios desarrollados en 1950's por la *American Association of State Highway Officials* (AASHO). Se sustenta en el momento flector producido por el peso del vehículo en los puentes y con ésta se determina el peso permisible de los vehículos en función del número de ejes y el espaciamiento entre ellos. Desde 1975 fue adoptada por la *Federal Highway Administration* (FHWA) para regular el peso de los vehículos que circulen en el sistema interestatal de autopistas en Estados Unidos. Una variante de esta expresión es utilizada en la normativa mexicana para establecer límites de peso de algunos vehículos de autotransporte. En este estudio se presentan antecedentes del desarrollo de la fórmula y algunas comparaciones con la versión utilizada en la normativa mexicana. La versión local establece un peso permisible mayor en un 17% respecto a la versión de la FHWA pero, en general para ambos casos, inferiores a los máximos autorizados en carreteras tipo ET y A. Los resultados sugieren la necesidad de un análisis de mayor detalle para la búsqueda y definición de criterios que pudieran aplicarse para el establecimiento de límites de peso en vehículos de carga pesada en México.

Abstract

The Bridge Formula was defined from several studies developed in the 1950's by the American Association of State Highway Officials (AASHO), which is based on the bending moment produced by the weight of the vehicle on the bridge structure, and it determines the permissible weight of vehicles based on the number of axles and the spacing between them. Since 1975 it was adopted by the Federal Highway Administration (FHWA) to regulate the weight of vehicles in the interstate highway system in the United States. A variant of this expression is used in Mexican regulations to establish weight limits for some classes of commercial vehicles. This study presents background information on the development of the formula and some comparisons with the version used in the Mexican regulations. The local version produces a 17% higher permissible weight than the FHWA version, but generally in both cases lower than the maximum authorized vehicle's weight on type ET and A roads. The results suggest the need for a more detailed analysis in order to review or redefine criteria to establish weight limits in heavy-duty vehicles in Mexico.

Introducción

Los vehículos de carretera se han convertido en elementos imprescindibles para satisfacer la necesidad local y regional de desplazar bienes y personas. Para el transporte de grandes volúmenes de carga se utilizan camiones y combinaciones de unidades tractivas y remolcadas con gran capacidad de carga, mientras que para pasajeros se utilizan autobuses con varios asientos y compartimentos para equipaje, todos ellos agrupados como vehículos de autotransporte preparados para largos recorridos.

Debido a su gran capacidad de carga, masa y dimensiones resaltan del resto de los vehículos, cuyo peso les confiere una elevada cantidad de energía en movimiento y, a la vez, una enorme potencialidad de deterioro de la infraestructura y de severidad de daño en caso de siniestros viales. La necesidad de regular esos aspectos ha llevado a las autoridades a emitir diversas leyes, normas y reglamentos para controlar su tránsito y armonizarlo con los diversos elementos del sistema de transporte. Con ello se busca compatibilizar sus condiciones de operación para un correcto uso con base no solamente en las capacidades propias del vehículo, sino de la infraestructura y el entorno por el cual transita, de manera que se minimicen riesgos y daños durante su empleo.

El peso y las dimensiones de los vehículos de autotransporte tienen un efecto relevante en su operación y tránsito por carretera. La imposición de límites de estos parámetros tiene el propósito de atenuar efectos negativos de daño a la infraestructura y establecer condiciones para una mayor seguridad, sin menoscabo de la productividad del transporte. Sin embargo, la definición de los valores límite debe estar sustentada en los criterios de diseño de la infraestructura y los modelos de deterioro, cuyos efectos puedan ser trazables para análisis posteriores que sean requeridos en la evolución de las necesidades de transporte y del desarrollo de los vehículos e infraestructura.

Al respecto, la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017 “Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal”, es la principal norma reguladora de vehículos pesados en México. La norma establece los límites de peso para cada tipo

de configuración vehicular y del tipo de camino por el cual pretenda transitar. La magnitud del peso máximo establecido para cada configuración parte de la distribución de peso por ejes y algunas consideraciones importantes sustentadas en diferentes estudios nacionales e internacionales, muchos de ellos tomados de la evolución del desarrollo carretero en Estados Unidos y sus correspondientes regulaciones.

Para la definición de límites de peso en Estados Unidos destacan las investigaciones que dieron lugar a la denominada “Fórmula Puente” (*Bridge Formula Weights*). Esta fórmula, introducida en 1975 como sustento de sus regulaciones, es la base para determinar el peso máximo que los vehículos pueden transportar en el tránsito interestatal en Estados Unidos. Su aplicación se basó en la reducción del riesgo de daño a los puentes en las autopistas a través del empleo de un mayor número de ejes o de mayor separación entre ellos, para compensar la tendencia que se tenía de incremento del peso en los vehículos.

En México se utiliza una variante de la expresión original de la fórmula puente en la NOM-012-SCT-2-2017 para establecer el límite de peso de las configuraciones doblemente articuladas que circulen en la red federal de carreteras mexicanas. No obstante, no hay evidencia técnica ubicable sobre los criterios que dieron lugar a dicha variante y que, por tanto, permitan extender su aplicabilidad a la definición de límites de pesos para otras configuraciones vehiculares. Por esa razón, con el propósito de identificar las similitudes y diferencias entre la formulación empleada por la *Federal Highway Administration* (FHWA) en Estados Unidos y la empleada en la NOM-012-SCT-2-2017, se realizó un estudio cuyo desarrollo y resultados aquí se describen. Del análisis realizado se presentan diversos elementos de argumento sobre los criterios para el establecimiento de pesos en vehículos de autotransporte en México, que pueden ser considerados como información relevante en el proceso de revisión normativa.

Este documento se organiza de manera que en el capítulo I se presentan los antecedentes sobre la regulación del peso de los vehículos de autotransporte federal en México. El segundo presenta algunos aspectos sobre el origen y los estudios que dieron lugar a la fórmula puente y su aplicación en la regulación en el tránsito interestatal en Estados Unidos. El tercer capítulo muestra el análisis dimensional y su conversión al Sistema General de Unidades de Medida (SGUM), con el propósito de establecer las similitudes y diferencias con la versión de la fórmula puente utilizada en la normativa mexicana. El capítulo cuarto expone un análisis comparativo de la aplicación de ambas versiones, que hace

evidentes sus similitudes y diferencias, así como el alcance en su aplicación en la normativa mexicana. Finalmente, se enuncian las conclusiones sobre el desarrollo del estudio y el análisis de la aplicación comparativa, con lo cual se brindan elementos para extender o limitar su aplicación.

1. Antecedentes de regulación del peso

El peso de los vehículos de carretera es un parámetro físico directamente proporcional a la masa, que afecta distintos aspectos del sistema de transporte. El peso de la carga transportada tiene efecto sobre la operación por el manejo de ésta, sobre la seguridad por la severidad de daño en caso de siniestro, sobre el desempeño mecánico por la cantidad de energía que se requiere para el movimiento y su control, así como por la interacción con la infraestructura. Este último representa un interés especial en la condición de servicio y conservación de la infraestructura, tanto del camino como de los puentes que un vehículo debe cruzar.

1.1 Regulación del peso en el autotransporte

Desde sus inicios, vehículos e infraestructura guardan una relación con efectos y dependencia recíprocos; es decir, el desarrollo y evolución de los vehículos ha sido determinante en el desarrollo y evolución de la infraestructura y viceversa. Entre los principales parámetros que tienen ese efecto se encuentra el peso, parámetro determinante de su interacción física y de afectación en la seguridad de tránsito, en la que la generación de deterioro ha sido un tema constante y relevante en la condición de servicio de puentes y carreteras.

1.1.1 Ley de Vías Generales de Comunicación

Una de las primeras acciones legales de regulación de los vehículos en caminos y puentes federales corresponde a la emisión del decreto de la Ley de Vías Generales de Comunicación en 1940 que, en su Libro Segundo “Comunicaciones terrestres”, Título Segundo “Caminos”, contemplaba la explotación de caminos en su Capítulo II, mientras que en Título Tercero “Puentes” y su Capítulo Único, lo hacía para este tipo de obras civiles, [1]. Posteriormente, en un decreto de 1948, se reformó el Capítulo II de ese título y libro, introduciendo apenas el peso en la consideración del tipo de servicio en su artículo 160, pero sin definir especificación alguna, [2].

1.1.2 Reglamento sobre explotación de caminos

El primer reglamento sobre explotación de caminos se expidió en agosto de 1949, el cual introduce en el Capítulo Undécimo aspectos sobre la

consideración del peso y otras características de los vehículos. El reglamento indica, en el artículo 231, que se requiere de un “permiso de puentes y pavimentos” para los vehículos cuyo peso exceda de 8000 kilogramos, en el cual se deben expresar, además de particularidades de la ruta y otros datos que se le requieran, las características siguientes, [3]:

- Características del motor del vehículo
- Dimensiones
- Pesos
- Carga útil autorizada
- Número y distancia entre ejes
- Concentración de carga en los ejes
- Tamaño y número de llantas

Dicho reglamento establece por primera vez los pesos máximos permisibles, así como las dimensiones máximas de los vehículos de carga. El peso máximo incluía el peso propio y la carga útil, de acuerdo con el vehículo y su número de ejes. Tales pesos, así como la longitud máxima, se indican en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Peso permisible y longitud máxima según reglamento de 1949

Vehículo	Peso, [kg]	Longitud
Camión de dos ejes	13000	9,15 m
Camión de tres ejes	16000	
Tractor de dos ejes con semirremolque de un eje	21000	13,00 m
Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes	24000	
Tractor de tres ejes con semirremolque de un eje	24000	
Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes	27000	
Camión de dos ejes con remolque de dos ejes	29000	15,00 m

Nota: El ancho y altura máxima correspondía a 2,50 m y 4,00 m, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia a partir de SCOP (1949).

Los pesos permisibles indicados en la tabla se establecieron con el fin de cumplir con dos condiciones: la primera, referente a garantizar la conservación de los pavimentos y, la segunda, para garantizar la estabilidad y duración de los puentes. Respecto a la primera, el peso soportado para un eje sencillo no debía exceder de 8165 kg; mientras que para la segunda las concentraciones por eje tándem no debían exceder 11340 kg, además de que las distancias entre ejes debían ser como se indica en la Tabla 1.2, [3].

Aunque el reglamento de ese entonces consideraba algunas tolerancias en la carga por ejes debidas a condiciones especiales, enfatizaba que el peso total no debía superar el peso máximo autorizado. Estas condiciones especiales concernían a vehículos de pasajeros y transporte de ganado, entre los principales, donde se aceptaba un pequeño

incremento en las concentraciones de carga por eje que era de 5% y 10%, respectivamente.

Tabla 1.2 Distancia entre ejes según reglamento de 1949

Vehículo	Distancia mínima entre ejes
Camión de dos ejes	2,60
Camión de tres ejes	Delantero y primero del tándem: 4,50 m Entre ejes del tándem: 1,12 m
Tractor de dos ejes con semirremolque de un eje	Delantero y eje del semirremolque: 9,00 m
Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes	Trasero del tractor y primero del tándem: 5,40 m Entre ejes del tándem: 1,12 m
Tractor de tres ejes con semirremolque de un eje	Delantero del tractor y primero del tándem: 4,50 m Entre ejes del tándem: 1,12 m Segundo del tándem y eje del semirremolque: 5,40 m
Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes	Delantero y primero del tándem del tractor: 4,50 m Entre ejes del tándem del tractor: 1,20 m Segundo del tándem del tractor y primero del tándem del semirremolque: 5,20 m Entre ejes del tándem del semirremolque: 1,12 m
Camión de dos ejes con remolque de dos ejes	Requiere estudio especial*

Nota: * Debido a que intervienen muchos factores en la determinación de las distancias mínimas entre ejes.

Fuente: Elaboración propia a partir de SCOP (1949).

1.1.3 Primer cambio a pesos permisibles

No obstante que se contaba con el reglamento vigente desde 1949, en diciembre de 1960 se emitió un nuevo decreto que reformaba el capítulo undécimo del reglamento que, a su vez, aludía al Capítulo de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación. Esta reforma se fundamentó en varios considerandos, los cuales hacían referencia a lo siguiente, [4]:

- Exceso de peso y el deterioro provocado en caminos y puentes por las características técnicas especiales de los vehículos
- La sustitución de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes
- El cambio de las condiciones técnicas de los vehículos de autotransporte y, en ciertos aspectos, las de los caminos
- Los inconvenientes demostrados por el uso indebido de los “permisos de puentes y pavimentos” sin llenar los requisitos que la ley exigía
- La necesidad de modificar las disposiciones reglamentarias para ajustarlas a la Nueva Ley de Secretarías y Departamentos de Estado y de las condiciones técnicas actuales de los caminos federales y de los vehículos, así como para evitar el uso ilegal de las autorizaciones de peso y dimensiones

Las reformas añadieron una clasificación de los Caminos Nacionales en función del plano respectivo y con base en las curvaturas, el ancho de

carpetas, la resistencia de los pavimentos y estabilidad de los puentes. Así mismo, establecía que las concentraciones máximas de carga por eje y las dimensiones de los vehículos se limitarían por lo permisible para la conservación de los pavimentos y por la estabilidad y duración de los puentes. Así, podría permitir hasta una concentración máxima absoluta de 110 kg por cada centímetro transversal de superficie de rodamiento de las llantas, las cuales debían estar a una presión (de inflado) en frío de 5,7 kg/cm² (81 psi) a 6,33 kg/cm² (90 psi) de presión en caliente, [4]. No obstante, los límites de concentraciones de carga por eje no debían ser excedidos, valores que son indicados en la Tabla 1.3, de acuerdo con la clasificación de caminos.

Tabla 1.3 Concentración máxima de carga según reglamento de 1960

Descripción	Concentración máxima, [kg]	
	Caminos "A"	Caminos "B"
Eje sencillo con dos llantas	5000	5000
Eje sencillo con cuatro llantas	9000	8650
Eje en tándem con cuatro llantas	7250	6800

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (1960).

Estos valores, sin embargo, no debían sobrepasar el valor del peso resultante de concentración máxima absoluta previamente mencionado ni el peso bruto total permisible para el tránsito sobre los puentes. Para vehículos sencillos o combinaciones de unidad motriz con semirremolque o remolque, el peso bruto total máximo permisible se obtenía de acuerdo con la siguiente expresión, [4]:

$$PB = 1635 \cdot [L + 5,85]$$

Donde:

PB: peso bruto total, [kg]

L: distancia entre ejes extremos, [m].

Además de lo anterior, el peso bruto total no debía exceder de 34000 kg en caminos de clasificación "A" ni de 31000 kg en caminos "B". Menciona también que, en el caso de "combinaciones" se aplicaría la misma expresión, en la que L correspondería a la distancia entre ejes extremos de cada unidad, [4].

Esta consideración de los vehículos de carga al transitar sobre puentes y caminos de jurisdicción federal se complementaba con la definición de las distancias entre ejes. Las distancias límite entre ejes para los vehículos eran en esa época los indicados en la Tabla 1.4. De similar manera respecto a las dimensiones, la longitud máxima permisible, de acuerdo

con el tipo de camino por el que el vehículo transitaría, se presenta en la Tabla 1.5.

Tabla 1.4 Distancias límite entre ejes según reglamento de 1960

Vehículo	Entre ejes	Distancia, [m]	
		Caminos "A"	Caminos "B"
Camión sencillo de dos ejes	1 y 2	No limitada	No limitada
Camión sencillo de tres ejes	1 y 2	No limitada	No limitada
	2 y 3 (tándem), mínimo	1,22	1,12
Tractor de dos ejes con semirremolque de un eje	1 y 2, máximo	5,00	5,00
	2 y 3	No limitada	No limitada
Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes	1 y 2, máximo	5,00	5,00
	2 y 3	No limitada	No limitada
	3 y 4 (tándem), mínima	1,22	1,12
Tractor de tres ejes con semirremolque de un eje	1 y 2, máximo	4,40	4,40
	2 y 3 (tándem)	1,22	1,12
	3 y 4	No limitada	No limitada
Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes	1 y 2, máximo	4,40	No permitido
	2 y 3 (tándem)	1,22	
	3 y 4	No limitada	
	4 y 5 (tándem)	1,22	
Camión de dos ejes con remolque de dos ejes	1 y 2	No limitada	No limitada
	2 y 3, mínimo	4,60	4,60
	3 y 4, mínima	6,00	6,00
Camión de tres ejes con remolque de dos ejes	1 y 2	No limitada	No permitido
	2 y 3	1,22	
	3 y 4, mínima	5,00	
	4 y 5, mínima	6,25	

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (1960).

Tabla 1.5 Longitud máxima permisible según reglamento de 1960

Vehículo	Longitud permisible, [m]	
	Caminos "A"	Caminos "B"
Camiones de dos y tres ejes	11,60	9,15
Tractor y remolque con una articulación:	3 ejes	14,00
	4 ejes	14,50
	5 ejes	15,25
Dos unidades con dos articulaciones:	Camión con remolque 4 ejes	18,30
	Camión con remolque 5 ejes	18,30
		No permitido

Nota: El ancho y altura máxima correspondía a 2,50 m y 4,15 m, respectivamente, para ambos tipos de camino.

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (1960).

Estas limitaciones se mantuvieron prácticamente durante dos décadas. El hito en este periodo fue la aplicación de una expresión para determinar el peso máximo a través de la distancia entre ejes sin exceder los límites de peso máximo ya definidos.

1.1.4 Incremento del límite de peso: 1980

En 1980 se emitió un nuevo decreto de modificación del Capítulo XI del Reglamento referente a la explotación de caminos. Estas modificaciones tuvieron su origen, entre otros, en la adecuación del funcionamiento del autotransporte con las políticas de desarrollo y de las necesidades de transportar mayores cargas en vehículos con mayores dimensiones que las indicadas en la versión previa del capítulo XI de ese reglamento, [5]. Consecuentemente, las modificaciones se orientaron para permitir el tránsito de vehículos con mayores pesos y dimensiones, con una reclasificación de caminos y la consideración de un conjunto mayor de clases de vehículos, apoyados en una serie de apéndices en los que se describían las características aplicables a tales condiciones, [6, 7, 8]. Por otro lado, fue técnicamente notable el hecho de que los cambios dejaron de lado las restricciones de peso para el paso por puentes; por tanto, quedó sin efecto la fórmula enunciada en la versión del Capítulo XI del Reglamento de explotación de caminos de 1960.

Los principales aspectos considerados con los cambios decretados fueron, entre otros, los siguientes, [6, 7, 8, 9]:

- Inclusión de un mayor número de clases de vehículos: automóvil (A), autobús (B), camión (C), tractor (T), semirremolque (S) y remolque (R). Se introduce también la nomenclatura de unidad y número de ejes; por ejemplo, C2 para denotar camión de dos ejes.
- Clasificación de caminos en tres tipos “A”, “B” y “C”, de mayor a menor capacidad.
- Mayores cargas por eje, así como la Introducción de ejes sencillos de dos llantas en tándem y sencillos de cuatro llantas en trídem.
- Autorización para circular en combinaciones denominadas “fulltrailer”, compuestas de tractor, semirremolque y remolque,
- Mayor peso bruto vehicular (PBV), que cambió de 34,0 t a 77,5 t para la configuración más larga.
- Mayor longitud máxima permitida, que pasó de 18,3 m a 22,0 m que correspondía a las combinaciones de tractor, semirremolque y remolque.
- Para vehículos de carga especial se consideró hasta un 20% de peso adicional con la especificación de presión de inflado de llantas en frío, de 6 kg/cm² o de acuerdo con la recomendación del fabricante.

La Tabla 1.6 presenta la concentración máxima de carga por eje, según lo autorizado en el Reglamento de explotación de caminos de 1980. La tabla incluye las nuevas consideraciones de eje sencillo en tándem y de trídem y lo autorizado según el tipo de camino.

Tabla 1.6 Carga máxima por eje según reglamento de 1980

Descripción	Caminos "A"	Caminos "B"	Caminos "C"
Eje sencillo con dos llantas	5500	5000	4000
Eje sencillo con cuatro llantas	10000	9000	8000
Eje sencillo en tándem con dos llantas*	4500	3750	3500
Eje en tándem con cuatro llantas	9000	7500	7000
Eje en trídem con cuatro llantas*	7500	No permitido	No permitido

Nota: * Eje sencillo de dos llantas en tándem y sencillo de cuatro llantas en trídem se introdujeron en esta nueva reglamentación.

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (1980).

En el Apéndice 2 de dicho reglamento se detallaban las principales dimensiones y especificaciones de los vehículos, como ancho, longitud, entrevía, distancias entre ejes, volados delantero y trasero, así como la concentración de carga por eje para cada clase de vehículo. Cabe mencionar que el peso máximo por clase de vehículo con su respectiva combinación de ejes resultaba de la suma de la concentración máxima por cada tipo de eje. El peso bruto vehicular máximo, calculado de esa manera y así descrito en uno de los apéndices de ese decreto del reglamento, se muestra en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7 Peso bruto vehicular máximo según la combinación y el tipo de camino, según reglamento de 1980.

Tipo de vehículo	No. ejes	PBV máx, [t]			Largo máx, [m]
		Camino "A"	Camino "B"	Camino "C"	
B2	2	15,5	15,5	15,5	12,25
B2c*	2	15,5	15,5	15,5	11,00
B3 (8 llantas)	3	20,0	20,0	20,0	12,25
B3 (10 llantas)	3	23,5	23,5	23,5	12,25
B4 (12 llantas)	4	27,0	27,0	27,0	13,25
C2	2	15,5	14,0	12,0	12,20
C3	3	23,5	20,0	18,0	12,20
C4	4	28,0	No permitido	No permitido	12,20
T2-S1	3	25,5	23,0	No permitido	17,00
T2-S2	4	33,5	29,0	No permitido	17,00
T3-S2	5	41,5	35,0	No permitido	17,00
T3-S3	6	46,0	No permitido	No permitido	17,0
C2-R2	4	35,5	No permitido	No permitido	19,00
C3-R2	5	43,5	No permitido	No permitido	19,00
C3-R3	6	51,5	No permitido	No permitido	19,00
T2-S1-R2	5	45,5	No permitido	No permitido	22,00
T3-S1-R2	6	53,5	No permitido	No permitido	22,00
T3-S2-R2	7	61,5	No permitido	No permitido	22,00
T3-S2-R3	8	69,5	No permitido	No permitido	22,00
T3-S2-R4	9	77,5	No permitido	No permitido	22,00

Nota: *Se refiere a autobús convencional, así definido en dicho reglamento.

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (1980).

Como se observa de la tabla, las combinaciones de tractor, semirremolque y remolque recién autorizados solamente podían circular en caminos de clase "A". Según su descripción en el reglamento, este tipo

de camino se fundamentaba en los requerimientos económicos y de comunicación de los espacios geográficos del territorio nacional, pero no mencionaba sus especificaciones técnicas, [6].

1.1.5 Primer reglamento de pesos y dimensiones

La constante evolución del tránsito y de los vehículos, así como el incremento de las necesidades de desplazamiento, el exceso de peso y los accidentes que ocurrían, dieron lugar a la elaboración de un nuevo reglamento para reemplazar el del Capítulo de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación. Ese nuevo reglamento, expedido en enero de 1994, se formuló con base en la de ese entonces recién decretada Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal, publicada en el Diario Oficial el 22 de diciembre de 1993, [10].

El nuevo reglamento tuvo el propósito de regular el peso, dimensiones y capacidad de los vehículos denominados de autotransporte que transitaran en caminos y puentes de jurisdicción federal y que extendía su aplicación, además de vehículos de carga, a los de servicio de pasajeros y de turismo, [11]. Este primer reglamento hacía alusión, como parte de sus criterios de sustento, a la elaboración de normas dedicadas de acuerdo con los lineamientos y el respectivo reglamento de la Ley Federal de Metrología y Normalización, publicada el 01 de julio de 1992 en el Diario Oficial, [12].

En lo referente a pesos y dimensiones, el reglamento indicaba que la presión de inflado de las llantas en frío en ningún caso debía ser superior a 6 kgf/cm² (aprox. 85 lb/in² o 590 kPa). De manera relevante, se establecía que la clasificación de caminos y puentes se basaran en “características geométricas, su construcción y conservación, la estabilidad de los puentes, la relación peso/potencia, el peso y dimensiones de los vehículos que puedan circular por ellos y otras características de los vehículos que se requieran para su tránsito seguro; así como los requerimientos económicos y de comunicación del país”, [11]. Esta nueva clasificación se establecía como se indica en la Tabla 1.8.

Tabla 1.8 Clasificación de carreteras según reglamento de 1994

Tipo de carretera	Nomenclatura
Carretera de cuatro carriles	A4
Carretera de dos carriles	A2
Carretera de cuatro carriles, red primaria	B4
Carretera de dos carriles, red primaria	B2
Carretera de dos carriles, red secundaria	C
Carretera de dos carriles, red alimentadora	D

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (1994).

La aplicación del reglamento respecto al peso máximo autorizado consideró una disminución gradual de tres etapas que se alcanzarían en tres años, de noviembre de 1994 a noviembre de 1996, acordes al tipo de vehículo y de carretera, [11]. Para el caso de los caminos tipo A y B, la Tabla 1.9 ilustra esta gradualidad para cada tipo de vehículo.

Como se indica en la tabla, a partir de noviembre de 1996 el peso bruto vehicular máximo autorizado quedaría en el menor valor. No obstante, las combinaciones de tractocamión con semirremolque y remolque, denominadas popularmente como “fulltrailer”, tenían permitido circular por caminos tipo C.

Tabla 1.9 PBV máximo gradual según reglamento de 1994

Tipo	No. de llantas	PBV máx, [t]		
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
C2	4	17	15	13,5
	6	21	19	17,5
C3	6	22	21	19
	10	30	28	26
C4	8	27	25	22
	14	38	35	31
C2-R2	8	29	24	26,5
	14	41	39	37,5
C3-R2	8	35	34	32
	10	50	48	46
C3-R3	12	44	41	36,5
	22	64	60	54
T2-S1	8	33	29	24
	10	38	33	27,5
T2-S2	10	38	34	28,5
	14	47	42	35,5
T3-S2	18	51	48	44
T3-S3	16	53	47	40
	22	63	57	48,5
T2-S1-R2	12	46	42	37
	18	59	54	47,5
T3-S1-R2	16	49	48	45,5
	22	60	58	56
T3-S2-R2	18	56	54	50
	26	67	64	60,5
T3-S2-R4	22	73	67	59
	34	77	75	65,5

Nota: Etapa 1, del 1 de noviembre de 1994 al 31 de octubre de 1995; Etapa 2, del 1 de noviembre de 1995 al 31 de octubre de 1996; Etapa 3, del 1 de noviembre de 1996 en adelante.

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (1994).

Conforme con lo indicado en dicho reglamento se preparó la norma oficial mexicana con el propósito de definir las especificaciones de pesos y dimensiones de los vehículos de autotransporte. Esto, a cargo de uno de los Comités Consultivos Nacionales de Normalización de Transporte

Terrestre, coordinado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y con base en los lineamientos establecidos en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

1.2 La Norma Oficial de pesos y dimensiones

La Norma Oficial Mexicana sobre el peso y dimensiones máximas de los vehículos de autotransporte establece las especificaciones de peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte federal, sus servicios auxiliares y transporte privado que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal.

1.2.1 Primera versión: NOM-012-SCT-2-1994

La primera versión de la Norma Oficial Mexicana sobre pesos y dimensiones fue la NOM-012-SCT-2-1994 “Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal”. Dicha NOM, publicada en el Diario Oficial a finales de noviembre de 1994, se convertiría en la principal norma reguladora de este tipo, que definía los criterios de pesos y dimensiones máximas autorizadas para cada tipo de vehículo y camino. La elaboración de esta norma tuvo en consideración la necesidad de disminuir los índices de accidentes viales ocasionados por el exceso de peso y de dimensiones, así como el deterioro acelerado de caminos y puentes de jurisdicción federal. Esto, a través de un estricto control de esos parámetros y, de esa forma, proporcionar mayor seguridad a los usuarios del camino y disminuir el desgaste de las carreteras, [13].

Esta primera versión de la NOM incluyó algunos cambios en la clasificación de vehículos ya que, al ser aplicada a los de autotransporte, se eliminó el tipo automóvil (A). Además, adoptó implícitamente el concepto de configuración vehicular en lugar de tipo de vehículo. De esta forma, se definieron en esta norma las clases indicadas en la Tabla 1.10.



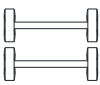


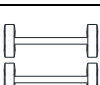
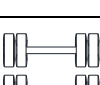
Tabla 1.10 Clases de vehículos según la NOM-012-SCT-2-1994

Clase	Nomenclatura
Autobús	B
Camión unitario	C
Camión remolque	CR
Tractocamión articulado	TS
Tractocamión doblemente articulado	TSR

Fuente: SCT (1994).

Respecto a los tipos de vehículos, esta norma agrupó el autobús convencional de dos ejes (anteriormente B2c) en la misma designación que el autobús integral B2 y no consideró la configuración C4 (camión unitario de cuatro ejes). Así mismo, especifica de manera detallada la concentración de carga por eje, en los que contempla el número de llantas por eje y agrupamiento de ejes en tándem y en trídem, así como la función del eje en el vehículo. Los pesos máximos por eje, de acuerdo con el tipo de camino, se presentan para esta norma en la Tabla 1.11.

Tabla 1.10 Peso máximo por tipo de eje según la NOM-012-SCT-2-1994

Configuración de ejes	No. de llantas	Función	Peso máximo, [t], por tipo de camino			
			A4 y A2	B4 y B2	C	D
	2	Sencillo	6,50	6,50	5,50	5,00
		Motriz sencillo	7,00	7,00	6,00	5,50
	4	Sencillo	10,00	10,00	9,00	8,00
		Motriz sencillo	11,00	11,00	10,00	9,00
	4	Doble o tándem	11,00	11,00	10,00	9,00
		Motriz doble o tándem	12,50	12,50	11,00	10,00
	6	Doble o tándem	14,50	14,50	13,00	11,50
		Motriz doble o tándem	15,50	15,50	14,00	12,50
	8	Doble o tándem	18,00	18,00	16,00	14,00
		Motriz doble o tándem	19,50	19,50	17,50	15,50
	6	Triple o trídem	14,00	14,00	12,50	11,50
		Motriz triple o trídem	15,50	15,50	14,00	12,50
	12	Triple o trídem	22,50	22,50	20,00	18,00
		Motriz triple o trídem	24,50	24,50	22,00	19,50

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (1994).

Cabe notar que, en esta emisión de la norma se autorizó el uso de ejes trídem en caminos de menor clasificación, además de la introducción del tipo motriz para diferenciar su aplicación. Sobre este tipo de eje se aceptó un peso mayor que en su versión tradicional que, por ejemplo, para el conjunto de ejes trídem llegó a 8,17 t para caminos "A" y "B", mientras que en la versión previa lo era de 7,5 t.

Esto también se refleja en el peso bruto vehicular máximo establecido en la norma, cuyos pesos se presentan en la Tabla 1.11. Es de notarse que las configuraciones vehiculares podían contar con ejes equipados con llantas sencillas o en arreglo dual, incluso en las configuraciones de varias unidades, que se pueden identificar en la tabla en función del número de llantas en la configuración, [13]. No obstante, no se hacía referencia a las características de las llantas directamente, sino a través del peso máximo que se autorizaba para cada tipo de vehículo y de ejes bajo esta condición.

Tabla 1.11 PBV máximo según la NOM-012-SCT-2-1994

Configuración	No. de llantas	Peso máximo, [t], por tipo de camino			
		A4 y A2	B4 y B2	C	D
B2	4	13,5	13,5	11,5	10,5
	6	17,5	17,5	15,5	14,0
B3	6	19,0	19,0	16,5	15,5
	8	22,0	22,0	19,5	17,5
	10	26,0	26,0	23,0	20,5
B4	10	26,5	26,5	24,0	21,5
	12	30,5	30,5	27,5	24,5
C2	4	13,5	13,5	11,5	11,0
	6	17,5	17,5	15,5	14,0
C3	6	19,0	19,0	16,5	15,0
	10	26,0	26,0	23,0	20,5
C2-R2	8	26,5	26,5	22,5	-
	14	37,5	37,5	33,5	-
C3-R2	10	32,0	32,0	27,5	-
	18	46,0	46,0	41,0	-
C3-R3	12	36,5	36,5	32,0	-
	22	54,0	54,0	48,0	-
T2-S1	8	24,0	24,0	21,0	-
	10	27,5	27,5	24,5	-
T2-S2	10	28,5	28,5	25,5	-
	14	35,5	35,5	31,5	-
T3-S2	18	44,0	44,0	39,0	-
T3-S3	16	40,0	40,0	35,5	-
	22	48,5	48,5	43,0	-
T2-S1-R2	12	37,0	37,0	32,0	-
	18	47,5	47,5	42,5	-
T3-S1-R2	16	45,5	45,5	39,5	-
	22	56,0	56,0	50,0	-
T3-S2-R2	18	50,0	50,0	44,0	-
	26	60,5	60,5	52,5	-
T3-S2-R4	22	59,0	59,0	53,0	-
	34	66,5*	66,5	58,0	-

Nota: Se consideraba la autorización de un incremento en el PBV máximo hasta un 5% si el vehículo contaba con suspensión neumática o equivalente en sus ejes, excepto en el eje direccional. * El PBV para unidades que trasladaran gases o químicos por caminos "A" podía ser de hasta 72,5 t por un periodo de 5 años a partir de la expedición de esta norma; posteriormente debería ajustarse al valor indicado.

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (1994).

Como se observa de la tabla, las combinaciones articuladas solamente tenían restricción de circulación en caminos tipo “C”, permitiendo su tránsito en las de mayor categoría. Así mismo, la longitud máxima permitida incluía el cambio gradual indicado en el reglamento de pesos y dimensiones, cuyos valores por configuración y tipo de camino se presenta en la Tabla 1.12.

Tabla 1.12 Longitud máxima según la NOM-012-SCT-2-1994

Configuración	No. de llantas	Long. máxima, [m], por tipo de camino			
		A4 y A2	B4 y B2	C	D
B2	4 / 6	14,00	14,00	14,00	12,50
B3	6 / 8 / 10	14,00	14,00	14,00	12,50
B4	10 / 12	14,00	14,00	14,00	12,50
C2	4 / 6	14,00	14,00	14,00	12,50
C3	6 / 10	14,00	14,00	14,00	12,50
C2-R2	8 / 14	**31,00	*28,50	22,50	-
C3-R2	10 / 18	**31,00	*28,50	22,50	-
C3-R3	12 / 22	**31,00	*28,50	22,50	-
T2-S1	8 / 10	20,80	20,80	16,50	-
T2-S2	10 / 14	20,80	20,80	16,50	-
T3-S2	18	20,80	20,80	16,50	-
T3-S3	16 / 22	20,80	20,80	16,50	-
T2-S1-R2	12 / 18	**31,00	*28,50	23,50	-
T3-S1-R2	16 / 22	**31,00	*28,50	23,50	-
T3-S2-R2	18 / 26	**31,00	*28,50	23,50	-
T3-S2-R4	22 / 34	**31,00	*28,50	23,50	-

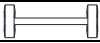
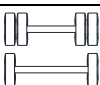
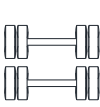
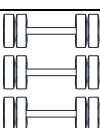
Nota: El ancho máximo autorizado en todos los casos era de 2,60 m; mientras que la altura máxima era de 4,15 m. *Para combinaciones que trasladaran autos sin rodar por caminos “B”, se permitía 1,00 m de carga sobresaliente en la parte posterior del último semirremolque de la combinación. ** Aplicable a partir del 1 de noviembre de 1995; previo a esa fecha solamente estaba autorizada una longitud máxima de 28,50 m por caminos “A”.

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (1994).

1.2.2 Primera modificación: NOM-012-SCT-2-1995

Casi de manera inmediata a la emisión de la norma se presentaron algunas sugerencias de cambio, que se reflejaron en la siguiente versión, la NOM-012-SCT-2-1995, publicada en el Diario Oficial a principios de enero de 1997, [14]. Las modificaciones notables fueron la casi total supresión de los ejes de llantas sencillas, en el que se mantuvieron los aplicados en la posición frontal (direccionales) y una combinación de ejes en tándem, con un eje de dos llantas y el otro de cuatro llantas, así como la supresión de ejes en trídem para aplicaciones motrices. De manera implícita se consideró de manera general el uso de llantas en arreglo dual en ejes de carga y tracción, salvo la excepción del tándem combinado. En este aspecto, los ejes autorizados no tuvieron modificación alguna respecto al valor de la carga máxima por eje o por grupo de ejes. Esto se indica en la Tabla 1.13, que corresponde a un subconjunto de los ejes indicados en la Tabla 1.10 previa.

Tabla 1.13 Peso máximo por tipo de eje según la NOM-012-SCT-2-1995

Configuración de ejes	No. de llantas	Función	Peso máximo, [t], por tipo de camino			
			A4 y A2	B4 y B2	C	D
	2	Sencillo	6,50	6,50	5,50	5,00
	4	Sencillo	10,00	10,00	9,00	8,00
		Motriz sencillo	11,00	11,00	10,00	9,00
	6	Motriz doble o tándem	15,50	15,50	14,00	12,50
	8	Doble o tándem	18,00	18,00	16,00	14,00
		Motriz doble o tándem	19,50	19,50	17,50	15,50
	12	Triple o trídem	22,50	22,50	20,00	18,00

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (1995).

En el caso de las configuraciones vehiculares, se eliminaron las versiones con ejes de llantas sencillas en ejes de carga y tracción, pero se conservaron las de tándem con ejes de llantas sencillas y de llantas en arreglo dual. Estos ejes pudieran estar equipados en vehículos B3, B4 y C3, aunque en esta última configuración se incluyó la versión de 8 llantas (con ejes en tándem de 6 llantas). Así mismo, se introdujeron las configuraciones C2-R3, T3-S2-R3 y la T3-S3-S2, por lo que la autorización de pesos máximos, para cada configuración y tipo de camino, quedó como se indica en la Tabla 1.14, ya con las configuraciones adicionales. Como se puede observar de la tabla, el peso de las configuraciones vehiculares previamente autorizadas se mantuvo sin cambio en el valor de los pesos máximos, que igualmente resultaba de la suma de las cargas máximas por eje o grupo de ejes correspondiente, salvo en la configuración B4, cuyo peso máximo anterior para 12 llantas se autorizó para únicamente 10 llantas en esta versión de norma. De manera particular, se autorizó para todas las configuraciones de carga un peso adicional de 1,5 t por eje motriz y de 1,0 t por eje de carga, bajo la condición de contar con suspensión neumática. Esto llevó a que por un periodo amplio la configuración T3S2R4 alcanzara hasta 81,5 t.

Para las longitudes, cumplidas las fechas de gradualidad para las combinaciones C-R y T-S-R, se actualizaron al valor correspondiente. Aunque en la versión previa se había anotado que las combinaciones C-R podrían circular con un largo de hasta 31,00 m a partir de noviembre de 1995 en caminos tipo "A", en esta versión se restringió a un máximo de 28,50 m, [14], especialmente para vehículos de transporte de autos sin rodar. La lista vigente para ese periodo se presenta en la Tabla 1.15.

Tabla 1.14 PBV máximo según la NOM-012-SCT-2-1995

Configuración	No. de llantas	Peso máximo, [t], por tipo de camino			
		A4 y A2	B4 y B2	C	D
B2	6	17,5	17,5	15,5	14,0
B3	8	22,0	22,0	19,5	17,5
	10	26,0	26,0	23,0	20,5
B4	10	30,5	30,5	27,5	24,5
C2	6	17,5	17,5	15,5	14,0
C3	8	22,0	22,0	19,5	17,5
	10	26,0	26,0	23,0	20,5
C2-R2	14	37,5	37,5	33,5	NA
C3-R2	18	46,0	46,0	41,0	NA
C3-R3	22	54,0	54,0	48,0	NA
C2-R3	18	45,5	45,5	40,5	NA
T2-S1	10	27,5	27,5	24,5	NA
T2-S2	14	35,5	35,5	31,5	NA
T3-S2	18	44,0	44,0	39,0	NA
T3-S3	22	48,5	48,5	43,0	NA
T2-S1-R2	18	47,5	47,5	42,5	NA
T3-S1-R2	22	56,0	56,0	50,0	NA
T3-S2-R2	26	60,5	60,5	52,5	NA
T3-S2-R4	34	66,5*	66,5*	58,0	NA
T3-S2-R3	30	63,0	63,0	55,0	NA
T3-S3-S2	30	60,0	60,0	51,5	NA

Nota: NA, no autorizado. * El PBV para unidades que trasladaran carga seca o fluida por caminos "A" y "B" podía incrementarse a 72,5 t por un periodo de 5 años si cuenta con un sistema auxiliar de frenos, independiente del sistema de balatas; ambas disposiciones se aplicarían a la entrada en vigor de la NOM-012-SCT-2-1995 y posteriormente al plazo de referencia debería ajustarse al valor indicado.

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (1995).

Tabla 1.15 Longitud máxima según la NOM-012-SCT-2-1995

Configuración	No. de llantas	Long. máxima, [m], por tipo de camino			
		A4 y A2	B4 y B2	C	D
B2	6	14,00	14,00	14,00	12,50
B3	8 / 10	14,00	14,00	14,00	12,50
B4	10	14,00	14,00	14,00	12,50
C2	6	14,00	14,00	14,00	12,50
C3	8 / 10	14,00	14,00	14,00	12,50
C2-R2	14	28,50	28,50	22,50	NA
C3-R2	18	28,50	28,50	22,50	NA
C3-R3	22	28,50	28,50	22,50	NA
C2-R3	18	28,50	28,50	22,50	NA
T2-S1	10	20,80	20,80	18,50	NA
T2-S2	14	20,80	20,80	18,50	NA
T3-S2	18	20,80	20,80	18,50	NA
T3-S3	22	20,80	20,80	18,50	NA
T2-S1-R2	18	31,00	28,50	23,50	NA
T3-S1-R2	22	31,00	28,50	23,50	NA
T3-S2-R2	26	31,00	28,50	23,50	NA
T3-S2-R4	34	31,00	28,50	23,50	NA
T3-S2-R3	30	31,00	28,50	23,50	NA
T3-S3-S2	30	25,00	25,00	20,00	NA

Nota: NA, no autorizado.

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (1995).

1.2.3 Actualización sustancial: NOM-012-SCT-2-2008





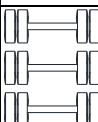
Poco más de una década llevó para que hubiera una nueva actualización de la norma que partió de temas sobre la utilización de carreteras y puentes de jurisdicción federal, en los que se destacaron los riesgos para las personas que los utilizan; el daño a pavimentos y puentes; problemas de tránsito y el uso eficiente de la infraestructura y del transporte. Consecuentemente, la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008 fue aprobada por el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Transporte Terrestre, la cual fue publicada en abril de 2008, [15].

Dicha actualización de la norma fue fuertemente sustentada en la necesidad de mejorar la regulación del autotransporte basada en estándares internacionales debido al rezago de la infraestructura carretera, en la que los vehículos demasiado pesados suponían esfuerzos que aceleraban el deterioro y reducían la vida útil. Así mismo, era menester promover la incorporación de vehículos con tecnologías más avanzadas disponibles en el país y que era necesario definir las características y especificaciones de los vehículos de autotransporte federal que dieran mayor seguridad a los usuarios, entre otros aspectos. Además, de manera particular, era preocupante que la vida útil de los puentes existentes en la red carretera federal se había reducido y, por tanto, era menester realizar acciones e inversiones para mantener sus niveles de seguridad y de operación, [15].

En específico, esta versión de la norma introdujo otras variantes de las configuraciones articuladas, tanto en las de tractocamión articulado T-S como en las de tractocamión doblemente articulado T-S-R y T-S-S. Así, para las primeras se incluyeron las configuraciones T2-S3 y T3-S1, mientras que en las segundas fueron T2-S1-R3, T2-S2-R2 y T3-S1-R3 y, para las últimas, las configuraciones T2-S2-S2 y T3-S2-S2. Así mismo, con base en una reclasificación de carreteras por especificaciones técnicas, características geométricas y estructurales, se definieron los denominados ejes de transporte (ET), que ampliaron el grupo de clasificación de carreteras federales, [15].

Por otro lado, los pesos máximos autorizados por eje o grupo de ejes se modificaron hacia una disminución en todos los casos y para todos los caminos, excepto en el grupo de ejes trídem que se autorizó el incremento de 1,00 t para los caminos ET y A y se prohibió su uso en caminos D. Así mismo, se aceptaba en el eje delantero de autobuses hasta una carga de 7,5 t, [15]. Estos pesos, tal cual como fueron autorizados, se presentan en la Tabla 1.16. De manera correspondiente, los pesos máximos autorizados para las configuraciones vehiculares, de acuerdo con el tipo de camino, se presentan en la Tabla 1.17.

Tabla 1.16 Peso máximo por tipo de eje según la NOM-012-SCT-2-2008

Configuración de ejes	No. de llantas	Función	Peso máximo, [t], por tipo de camino			
			ET y A	B	C	D
	2	Sencillo	6,50	6,00	5,50	5,00
	4	Sencillo	10,00	9,50	8,00	7,00
		Motriz sencillo	11,00	10,50	9,00	8,00
	6	Motriz doble o tándem	15,00	13,00	11,50	11,00
	8	Doble o tándem	17,00	15,00	13,50	12,00
		Motriz doble o tándem	18,00	17,00	14,50	13,50
	12	Triple o tridem	23,50	22,50	20,00	No Autorizado

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (2008).

Tabla 1.17 PBV máximo según la NOM-012-SCT-2-2008

Configuración	No. de llantas	Peso máximo, [t], por tipo de camino			
		ET y A	B	C	D
B2	6	17,5	16,5	14,5	13,0
B3	8	21,5	19,0	17,0	16,0
	10	24,5	23,0	20,0	18,5
B4	10	27,0	25,0	22,5	21,0
C2	6	17,5	16,5	14,5	13,0
C3	8	21,5	19,0	17,0	16,0
	10	24,5	23,0	20,0	18,5
C2-R2	14	37,5	35,5	NA	NA
C3-R2	18	44,5	42,0	NA	NA
C3-R3	22	51,5	47,5	NA	NA
C2-R3	18	44,5	41,0	NA	NA
T2-S1	10	27,5	26,0	22,5	NA
T2-S2	14	34,5	31,5	28,0	NA
T3-S2	18	41,5	38,0	33,5	NA
T3-S3	22	48,0	45,5	40,0	NA
T2-S3	18	41,0	39,0	34,5	NA
T3-S1	14	34,5	32,5	28,0	NA
T2-S1-R2	18	47,5	45,0	NA	NA
T2-S1-R3	22	54,5	50,5	NA	NA
T2-S2-R2	22	54,5	50,5	NA	NA
T3-S1-R2	22	54,5	51,5	NA	NA
T3-S1-R3	26	60,5	57,5	NA	NA
T3-S2-R2	26	60,5	57,5	NA	NA
T3-S2-R4	34	66,5	66,0	NA	NA
T3-S2-R3	30	63,0	62,5	NA	NA
T3-S3-S2	30	60,0	60,0	NA	NA
T2-S2-S2	22	51,5	46,5	NA	NA
T3-S2-S2	26	58,5	53,0	NA	NA

Nota: NA, no autorizado.

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (2008).

Cabe mencionar que el peso máximo autorizado consideraba la suma de pesos por eje para todas las configuraciones excepto para la de tractocamión doblemente articulado, que se regía principalmente por la denominada fórmula puente, expresada en dicha norma como sigue, [15]:

$$PBV = 870 \cdot \left[\frac{DE \cdot N}{N - 1} + (3,66 \cdot N) + 11 \right]$$

Donde:

PBV: Peso bruto vehicular, [kg]

DE: Distancia entre ejes extremos (medida del centro del eje delantero al centro del último eje del vehículo o configuración vehicular)

N: Número de ejes

Como su nombre lo indica, esta fórmula tuvo su aplicación para delimitar el peso de los vehículos de manera que atenuara el daño a la integridad de los puentes en los caminos de jurisdicción federal. El peso máximo podría, además, ser incrementado en 1,5 t en cada eje motriz y 1,0 t en cada eje de carga para circular exclusivamente por caminos "ET" y "A", pero únicamente si los vehículos cumplieran con una serie de especificaciones técnicas, disposiciones de seguridad y de control que se especificaba para cada tipo de vehículo, [15]. Entre las especificaciones se mencionan las siguientes:

Para autobús (B):

- Contar con dictamen de condiciones mecánicas y de bajas emisiones de contaminantes vigentes
- Motor electrónico
- Freno auxiliar de escape, motor o retardador o freno libre de fricción
- Sistema antibloqueo para frenos
- Suspensión de aire, excepto (excepto eje direccional delantero)

Para camión (C) y camión-remolque (C-R):

- Contar con dictamen de condiciones mecánicas y de bajas emisiones de contaminantes vigentes
- Motor electrónico con potencia mínima en el intervalo de 195 hp a 260 hp, dependiente de la configuración
- Freno auxiliar de escape, motor o retardador o freno libre de fricción en el camión

- Convertidor equipado con doble cadena de seguridad
- Sistema antibloqueo para frenos en camión y remolque
- Suspensión de aire en camión y remolque (excepto eje direccional delantero)

Para tractocamión-semirremolque (T-S), tractocamión-semirremolque-remolque (T-S-R) y tractocamión-semirremolque-semirremolque (T-S-S):

- Contar con dictamen de condiciones mecánicas y de bajas emisiones de contaminantes vigentes
- Motor electrónico con potencia mínima en el intervalo de 260 hp a 350 hp, de acuerdo con la configuración T-S, así como de 350 hp a 430 hp, dependiente de la configuración T-S-R o T-S-S
- Torque (par) mínimo en el intervalo de 660 lb·pie a 1050 lb·pie, de acuerdo con la configuración T-S, así como de 1250 lb·pie a 1650 lb·pie, dependiente de la configuración T-S-R o T-S-S
- Capacidad mínima de ejes de tracción, de acuerdo con el tipo de configuración T-S-R o T-S-S, en el intervalo de 30000 lb a 46000 lb
- Freno auxiliar de motor o retardador o freno libre de fricción en el tractocamión
- Convertidor equipado con doble cadena de seguridad
- Sistema antibloqueo para frenos en tractocamión, semirremolque y remolque
- Suspensión de aire en tractocamión, semirremolque y remolque (excepto eje direccional delantero)

En el argot del transporte, los vehículos que cumplían con estos requerimientos se les denominaba como “vehículos diferenciados” para distinguirlos de los vehículos tradicionales convencionales que no estaban equipados como la norma lo indicaba y, por tanto, no podían incrementar su peso como se describió anteriormente. En ese sentido, el incremento pretendía incentivar el uso de tecnologías de seguridad para compensar la inversión de los transportistas para el equipamiento de sus unidades con los dispositivos avanzados de seguridad.

Otro aspecto importante en esta actualización es la longitud máxima permitida para las configuraciones C-R, T-S y T-S-S, que se incrementaron respecto a la versión previa. Esto, también afectado por la reclasificación de los caminos y el nuevo tipo “ET”. La lista de los valores de longitud máxima correspondientes a cada configuración y tipo de camino se presenta en la Tabla 1.18. Así mismo, las dimensiones complementarias eran un ancho máximo de 2,60 m (sin incluir espejos retrovisores, elementos de sujeción y demás aditamentos para el aseguramiento de la carga); mientras que la altura máxima era de 4,25 m, [15].

Tabla 1.18 Longitud máxima según la NOM-012-SCT-2-2008

Configuración	No. de llantas	Long. máxima, [m], por tipo de camino			
		ET y A	B	C	D
B2	6	14,0	14,0	14,0	12,5
B3	8	14,0	14,0	14,0	12,5
	10	14,0	14,0	14,0	12,5
B4	10	14,0	14,0	14,0	12,5
C2	6	14,0	14,0	14,0	12,5
C3	8	14,0	14,0	14,0	12,5
	10	14,0	14,0	14,0	12,5
C2-R2	14	31,0	28,5	NA	NA
C3-R2	18	31,0	28,5	NA	NA
C3-R3	22	31,0	28,5	NA	NA
C2-R3	18	31,0	28,5	NA	NA
T2-S1	10	23,0	20,8	18,5	NA
T2-S2	14	23,0	20,8	18,5	NA
T3-S2	18	23,0	20,8	18,5	NA
T3-S3	22	23,0	20,8	18,5	NA
T2-S3	18	23,0	20,0	18,0	NA
T3-S1	14	23,0	20,0	18,0	NA
T2-S1-R2	18	31,0	28,5	NA	NA
T2-S1-R3	22	31,0	28,5	NA	NA
T2-S2-R2	22	31,0	28,5	NA	NA
T3-S1-R2	22	31,0	28,5	NA	NA
T3-S1-R3	26	31,0	28,5	NA	NA
T3-S2-R2	26	31,0	28,5	NA	NA
T3-S2-R4	34	31,0	28,5	NA	NA
T3-S2-R3	30	31,0	28,5	NA	NA
T3-S3-S2	30	25,0	25,0	NA	NA
T2-S2-S2	22	31,0	28,5	NA	NA
T3-S2-S2	26	31,0	28,5	NA	NA

Nota: NA, no autorizado.

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (2008).

1.2.4 Atención a la seguridad y tecnología: NOM-012-SCT-2-2014 y NOM-012-SCT-2-2017

Poco más de un quinquenio pasó para aplicar una nueva actualización a la norma. La preocupación por el incremento de accidentes viales y su severidad con vehículos de autotransporte, la necesidad de abonar a la seguridad nacional, a la conservación de la infraestructura de caminos y puentes, a la preservación de medio ambiente y a la promoción de la competitividad, así como a diversas recomendaciones por un panel de expertos, condujeron a una serie de modificaciones a la norma de pesos y dimensiones. Así, en noviembre de 2014 se expidió la NOM-012-SCT-2-2014, [16].

De manera similar, de la información presentada en el Foro “Pesos y dimensiones de las configuraciones vehiculares que transitan en las vías Federales de comunicación” en octubre de 2016, se promovieron

acciones para mejorar la seguridad vial en las carreteras federales. Esas acciones hicieron necesaria la inclusión de mayores estándares de seguridad en la operación y en los componentes mecánicos de los vehículos y, con la intención de abonar en la seguridad de la operación, se propuso la utilización de dispositivos mecánicos y electrónicos de alta tecnología en los vehículos. Dispositivos como frenos antibloqueo, sistemas de ajuste automáticos de frenos, cámaras de frenado de doble acción, información de velocidad y localización a través de sistemas GPS se introdujeron en la versión expedida en diciembre de 2017, la NOM-012-SCT-2-2017 que, al momento, sigue vigente, [17]. Cabe mencionar que los sistemas GPS ya habían sido contemplados en la versión 2014, pero no se mencionaba el propósito explícito de dicho dispositivo.

Ambas versiones, la de 2014 y la de 2017, mantuvieron la nomenclatura de la clase de vehículo o configuración, salvo que la versión de 2017 introdujo el reconocimiento del “convertidor” como unidad vehicular denominada como “D” que, aunque no se refleja en la designación de la configuración, es parte de la conformación de un remolque. Así mismo, la última versión también reconoce como unidad independiente la de tractocamión (T), aunque implícitamente se había manejado en las versiones previas como parte de las combinaciones T-S, T-S-R y T-S-S, [17].

Respecto al peso máximo autorizado por eje o grupo de ejes, ambas versiones introdujeron la separación de lo aplicado en vehículos de pasajeros (autobús, B) del resto de las configuraciones. De esta manera, se especificó el peso en ejes para este tipo de unidades, como se muestra en la Tabla 1.19a, valores especificados en función del daño a pavimentos, [16, 17]. Como se observa, los valores de carga máxima aplicados en caminos tipo “ET” y “A” fueron, en general, más altos respecto a los indicados en la versión previa de la norma.

Tabla 1.19a Peso máximo por tipo de eje en autobuses, según la NOM-012-SCT-2-2014 y la NOM-012-SCT-2-2017

Configuración de ejes	No. de llantas	Función	Peso máximo, [t], por tipo de camino			
			ET y A	B	C	D
	2	Sencillo	6,50	6,00	5,50	5,00
	4	Motriz sencillo	12,50	10,50	9,00	8,00
	6	Motriz doble o tándem	17,50	13,00	11,50	11,00
	8	Motriz doble o tándem	21,00	17,00	14,50	13,50

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (2014) y de SCT (2017).

De manera similar, los pesos máximos autorizados por eje o grupo de ejes en las unidades de carga se mantuvieron, pero con mayor especificidad para el tipo de configuración vehicular. Ambas versiones son coincidentes en estos pesos, como se indica en la Tabla 1.19b y, similar a la situación en la tabla anterior, los pesos máximos en general se incrementaron respecto a la versión 2008 para las configuraciones C y T-S, pero se mantuvieron para los ejes en las configuraciones C-R y T-S-R, [16, 17].

Tabla 1.19b Peso máximo por tipo de eje en vehículos de carga, según la NOM-012-SCT-2-2014 y la NOM-012-SCT-2-2017

Configuración de ejes		Configuración vehicular	Tipo de camino			
			A4 y A2	B4 y B2	C	D
	Sencillo, dos llantas	C y T-S	6,5	6,0	5,5	5,0
		C-R y T-S-R	6,5			
	Sencillo, cuatro llantas	C y T-S	11,0	9,5	8,0	7,0
		C-R y T-S-R	10,0			
	Motriz sencillo, cuatro llantas	C y T-S	12,5	10,5	9,0	8,0
		C-R y T-S-R	11,0			
	Motriz doble o tándem, seis llantas	C y T-S	17,5	13,0	11,5	11,0
		C-R y T-S-R	15,0			
	Doble o tándem, ocho llantas	C y T-S	19,0	15,0	13,5	12,0
		C-R y T-S-R	17,0			
	Motriz doble o tándem, ocho llantas	C y T-S	21,0	17,0	14,5	13,5
		C-R y T-S-R	18,0			
	Triple o trídem, doce llantas	C y T-S	26,5	22,5	20,0	NA
		C-R y T-S-R	23,5			

Notas: Pesos expresados en toneladas (t). NA, No autorizado.

Fuente: Adaptado de SCT (2017).

En el caso del peso bruto vehicular máximo, la Tabla 1.20 presenta los valores para autobuses y vehículos de carga. Similar a la versión 2008, se menciona que la determinación de tales pesos toma en cuenta la suma de pesos por eje y la descrita fórmula puente, [15, 16, 17]. No obstante, en ninguna de estas versiones se especifica qué distancia entre ejes extremos considera para determinar tal peso ni tampoco su empleo para grupos de ejes, por lo que pareciera que se aplica únicamente para la configuración más larga autorizada.

Tabla 1.20 PBV máximo para vehículos de autotransporte según la NOM-012-SCT-2-2014 y la NOM-012-SCT-2-2017

Configuración	No. de llantas	Peso máximo, [t], por tipo de camino			
		ET y A	B	C	D
B2	6	19,0	16,5	14,5	13,0
B3	8	24,0	19,0	17,0	16,0
	10	27,5	23,0	20,0	18,5
B4	10	30,5	25,0	22,5	21,0
C2	6	19,0	16,5	14,5	13,0
C3	8	24,0	19,0	17,0	16,0
	10	27,5	23,0	20,0	18,5
C2-R2	14	37,5	35,5	NA	NA
C3-R2	18	44,5	42,0	NA	NA
C3-R3	22	51,5	47,5	NA	NA
C2-R3	18	44,5	41,0	NA	NA
T2-S1	10	30,0	26,0	22,5	NA
T2-S2	14	38,0	31,5	28,0	NA
T3-S2	18	46,5	38,0	33,5	NA
T3-S3	22	54,0	45,5	40,0	NA
T2-S3	18	45,5	39,0	34,5	NA
T3-S1	14	38,5	32,5	28,0	NA
T2-S1-R2	18	47,5	NA	NA	NA
T2-S1-R3	22	54,5	NA	NA	NA
T2-S2-R2	22	54,5	NA	NA	NA
T3-S1-R2	22	54,5	NA	NA	NA
T3-S1-R3	26	60,5	NA	NA	NA
T3-S2-R2	26	60,5	NA	NA	NA
T3-S2-R4	34	66,5	NA	NA	NA
T3-S2-R3	30	63,0	NA	NA	NA
T3-S3-S2	30	60,0	NA	NA	NA
T2-S2-S2	22	51,5	NA	NA	NA
T3-S2-S2	26	58,5	NA	NA	NA

Nota: NA, no autorizado.

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (2014) y de SCT (2017).

Consecuente con los cambios en los pesos autorizados por ejes para los caminos “ET” y “A”, el peso máximo se incrementó para las configuraciones de autobús (B), de camión unitario y configuraciones articuladas T-S. Así mismo, se mantuvo la aceptación previa de que el eje delantero podría tener una carga máxima de 7,5 t para una mejor distribución del peso en la unidad, [16, 17]. Por otro lado, las configuraciones C-R, las T-S-R y las T-S-S se mantuvieron en su valor para esos dos tipos de camino (“ET” y “A”), aunque las configuraciones T-S-R y T-S-S quedaron prohibidas para circular, además de los caminos tipo “C” y “D”, también en los caminos tipo “B”.

Aunque las configuraciones de tractocamión doblemente articulado tenían esa nueva restricción de circular únicamente por caminos “ET” y “A”, en este tipo de configuraciones se mantuvieron los incrementos autorizados de peso de 1,5 t en cada eje motriz y de 1,0 t en cada eje de

carga, pero no de la misma manera en las otras configuraciones. Como en la versión de 2008, tales configuraciones T-S-R y T-S-S debían cumplir con el conjunto de especificaciones listado para este tipo de configuraciones que, para este caso, se reproduce como sigue, [16, 17]:

- Contar con dictamen de condiciones mecánicas y de bajas emisiones de contaminantes vigentes
- Motor electrónico con potencia mínima en el intervalo de 350 hp a 430 hp
- Torque (par) mínimo en el intervalo de 1250 lb·pie a 1650 lb·pie
- Capacidad mínima de ejes de tracción en el intervalo de 30000 lb a 46000 lb
- Freno auxiliar de motor o retardador o freno libre de fricción en el tractocamión
- Convertidor equipado con doble cadena de seguridad
- Sistema antibloqueo para frenos en tractocamión, semirremolque y remolque
- Suspensión de aire en tractocamión, semirremolque y remolque (excepto eje direccional delantero)
- Cámaras de frenado de doble acción (estacionamiento y servicio), excepto en el eje direccional (añadido en versión 2014)
- Dispositivo regulador de velocidad (añadido en versión 2017)
- Cintas reflejantes de conformidad con la NOM-035-SCT-2 y NOM-068-SCT-2 vigentes o las que la sustituya (añadido en versión 2017)

Las dimensiones máximas autorizadas para el largo total, ancho y altura se mantuvieron en los valores indicados en la versión 2008 de la norma. Sin embargo, con la introducción cada vez mayor de las unidades tractocamión de cabina sobre motor (*cabover*), en la versión 2017 se especificó que estas unidades podrían tener un ancho que no rebasara 3,00 m, con espejos incluidos, [17]. Todo esto, con la consideración de la prohibición de las configuraciones de tractocamión doblemente articulado para circular en caminos diferentes a los “ET” y “A”.

Es de notar que posterior a 1980, con el reglamento del Capítulo de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación, ya no hubo mención explícita sobre la distancia entre ejes de los vehículos de carga. Ni el nuevo reglamento, aplicable a partir de 1994, ni la Norma Oficial Mexicana sobre pesos y dimensiones (NOM-012-SCT-2) mencionan la distancia entre ejes, sino que se acotan a la longitud o largo máximo de las distintas configuraciones de vehículos de carga.

1.3 Objetivo y alcances

La NOM-012-SCT-2-2017 (vigente) es la principal norma que regula a los vehículos de autotransporte para circular en caminos y puentes de jurisdicción federal, a través del establecimiento de los límites de pesos y dimensiones. No obstante, no se dispone de información documental sobre el desarrollo de los criterios para establecer esos límites, aunque hay evidencia de que parten de resultados de diferentes estudios nacionales e internacionales, muchos de ellos tomados de la evolución del desarrollo carretero en Estados Unidos y sus correspondientes regulaciones. Tal es el caso de la denominada “Fórmula Puente” que se utiliza en la NOM-012-SCT-2-2017 para establecer el límite de peso de las configuraciones doblemente articuladas, la cual es una variante de la utilizada por la *Federal Highway Administration* (FHWA) como base para determinar el peso máximo que los vehículos pueden transportar en el tránsito interestatal en Estados Unidos.

Este estudio se realizó con el propósito de identificar las similitudes y diferencias entre esas formulaciones (FHWA y NOM-012-SCT-2-2017) y brindar elementos sobre los criterios para el establecimiento de pesos en vehículos de autotransporte en México, que pueden ser considerados como información relevante en el proceso de revisión normativa. Por tanto, se propuso revisar las diferentes expresiones de la fórmula puente, así como sus antecedentes, que permitieran identificar criterios utilizados en la definición de los límites de pesos en vehículos de autotransporte y elaborar un análisis comparativo de los pesos resultantes de algunas configuraciones vehiculares comunes en México.

Con esa intención, se hizo una revisión documental técnica de los antecedentes que dieron lugar a la formulación de la fórmula puente, así como al análisis dimensional para identificar la congruencia de los diferentes términos en las diferentes versiones y sistemas de unidades, incluida la versión utilizada en la normativa mexicana. Se pretende que el análisis proporcione elementos que pudieran ser considerados en la definición de los límites de peso, tanto por eje, por grupo de ejes o peso total en una configuración vehicular de carga, como parte de los análisis de revisión de la normativa mexicana, en especial de la NOM-012-SCT-2.

2. La Fórmula Puente

El daño que producen los vehículos a carreteras y puentes ha sido una constante preocupación en prácticamente todo el mundo, cuyos orígenes son tan tempranos como la invención de los vehículos y los primeros caminos. Por la naturaleza de su aplicación física, las diferencias en el ritmo del desarrollo tecnológico de unos y otros han conducido a una evolución asíncrona entre vehículos e infraestructura. Además, el crecimiento de la sociedad ha traído también una mayor demanda de transporte de cada vez más grandes volúmenes, tanto de bienes como de personas. Esa preocupación por lograr una mayor vida útil y mantener el nivel de servicio de las obras ha dado lugar, desde la legislación gubernamental, a buscar distintas estrategias que puedan ser aplicadas al transporte. Una de ellas es la limitación de pesos (y dimensiones) de los vehículos de carga pesada, cuyo sustento ha requerido de diversos estudios, como es el caso del desarrollo de la fórmula puente.

2.1 Límite de peso por deterioro de caminos

Las primeras acciones sobre la limitación de los pesos de los vehículos en los Estados Unidos se llevaron a cabo a partir del daño causado por las ruedas de acero y de hule sólido de los primeros vehículos de carga. En 1913, el peso bruto estaba limitado a no más de 18000 lb (8165 kg) en el estado de Maine, mientras que el límite era de 28000 lb (12700 kg) en Massachusetts. Sin embargo, para 1933 todos los estados tenían alguna forma de regular el peso, [18].

Uno de los problemas que prevalece a lo largo de los años es sobre cuál debe ser el tipo y la justificación de la carga de diseño que deben considerarse en los proyectos de construcción de caminos y puentes, de manera que la carga transmitida por los vehículos no represente riesgos significativos al transitar por ellos. Por tanto, los ingenieros de caminos y puentes han tratado de establecer un vehículo de referencia o un modelo de carga apropiado para el diseño de puentes, intentos cuyo inicio se remonta a la década de los 1920's, con trabajos a cargo del Comité de Puentes y Estructuras de la AASHO (*American Association of State Highway Officials*), [19].

En esa década muchos consideraban adecuado un camión de 10 tons de peso (denominado H10), aunque en la siguiente década se acordó que

fuera un camión de 15 tons (H15). Sin embargo, en 1944 se acordó que el vehículo apropiado para las condiciones de la época era el HS20-44 (*Heavy Semi*) de 20 tons; es decir, 40 klb. Así, esa carga fue usada como referencia para el diseño de puentes que formarían parte del Sistema Interestatal de Carreteras de los Estados Unidos, que sería una tendencia hacia el uso de cargas más pesadas para el diseño de puentes en los sistemas de autopistas, [19].

La primera legislación del peso de los vehículos tuvo su origen con la promulgación de la Ley Federal de Carreteras de 1956 (*Federal-Aid Highway Act of 1956*), que establecía la primera regulación del peso de camiones para la construcción del Sistema Interestatal de Autopistas (*Interstate Highway System*), [20]. Esencialmente enunciaba que no se proveerían fondos para el sistema interestatal que permitieran el tránsito de vehículos con un peso mayor de 18000 lb (8165 kg) en eje sencillo, de 32000 lb (14515 kg) en un eje tándem y de 73280 lb (33240 kg) de peso bruto total, [21].

Con base en las necesidades de construcción de carreteras, acorde con dicha ley se estableció el desarrollo de un estudio y una serie de pruebas conocidas como “AASHO Road Test” para determinar los pesos y dimensiones de los vehículos que operaran sobre el sistema federal de carreteras. Este estudio consideró la construcción de 836 secciones de prueba que iniciarían en el verano 1956 y concluirían en otoño de 1958, para tener un periodo de pruebas con tráfico programada para los siguientes dos años, [22]. Estas pruebas fueron el inicio de la búsqueda de un criterio de mayor aplicación a nivel nacional para determinar los límites de pesos y dimensiones de los vehículos de carga, que establecieran una relación entre el daño producido por el paso de vehículos en función de su número de ejes y la distancia entre ellos.

2.2 Primeras formulaciones sobre límites de peso

Las cargas de diseño utilizadas por la AASHO (ahora AASHTO, *American Association of State Highway and Transportation Officials*) han ido cambiando a través del tiempo, lo cual también ha conducido a cambios en las políticas y regulaciones estatales como en la regulación federal en Estados Unidos, [23]. Así, en 1932 se enunció por esta asociación la primera política, la cual recomendaba un límite de peso de 16000 lb (7257 kg) para un eje simple, mientras que el límite de peso para un eje tándem se obtenía a través de la fórmula “*Gemeny*”, [19]:

$$W = C \cdot [L + 40]$$

Donde:

W: peso bruto total, en lb, sobre cualesquiera dos o más ejes consecutivos

C: coeficiente a ser determinado individualmente por los Estados

L: distancia, en ft, entre el primero y el último eje del grupo de ejes bajo consideración

Bajo esa consideración, se propusieron diversos valores de “C” en función del tipo de puente, aunque un valor mínimo de 700 se recomendaba como aplicación general. Con mayor especificidad se recomendaba 670 para puentes H10, 1000 para puentes H15 y, para puentes H20, el valor recomendado era de 1300, [19].

En esa tendencia, en 1946 se presentó una nueva política de la AASHO en el que el peso en un eje simple se incrementaba a 18000 lb (8165 kg), el peso en un arreglo tándem, con un espaciamiento de 8 ft (2,44 m), era de 32000 lb (14515 kg), pero el peso bruto en cualquier grupo interior de ejes no debía exceder de lo indicado por la fórmula siguiente, [19, 23]:

$$W = 1025 \cdot [L + 24] - 3 \cdot L^2$$

Donde:

W: peso bruto total, en lb

L: distancia, en ft, entre ejes extremos del conjunto de ejes bajo consideración

Así mismo, el peso bruto vehicular máximo se establecía en 73280 lb (33240 kg), y una longitud *L* de 57 ft (17,37 m), [19, 23]. Estos límites de peso fueron un argumento importante para la primera legislación sobre el peso, en la que se fundamentó el acuerdo para el presupuesto destinado para la construcción del Sistema Interestatal de Autopistas, [20].

Aunque en los 1950's se ejecutaron distintas pruebas tendientes a determinar el efecto del peso en los pavimentos, algunas pocas se orientaron al efecto en los puentes y determinar la inducción de la falla gradual. En este tema, el *Texas Engineering Experiment Station of Texas A&M* concluyó una investigación sobre un método para convertir las cargas de los vehículos automotores en cargas de diseño equivalentes basadas en los máximos momentos flexionantes, patrocinado por el Bureau of Public Roads, [19]. En julio de 1962, años más tarde, el *Texas Transportation Institute of Texas A&M* terminó un estudio sobre las

tendencias del peso de camiones y las estructuras de las autopistas, con el propósito de desarrollar una fórmula de aplicación más general, por lo que propusieron la siguiente, [19]:

$$W = A \cdot [f(NL) + BN + C]$$

Donde:

W: carga máxima, en lb, soportada por cualquier grupo de ejes de dos o más ejes consecutivos

L: distancia, en ft, entre ejes extremos de cualquier grupo de ejes de dos o más ejes consecutivos

N: Número de ejes en grupo bajo consideración

A, *B* y *C*: constantes dependientes de la calidad de las autopistas y puentes y del nivel deseado de circulación de vehículos pesados

f: alguna función que involucre a “*N*” y “*L*”

Con base en ese modelo y la aplicación del método de máximos momentos flexionantes en puentes, así como los resultados de la serie de pruebas de la AASHO (AASHO Road Test), en 1962 se recomendó una “Fórmula Puente A” (Bridge Formula A), que parecía ser la más adecuada para regular el peso permisible de los vehículos. La expresión correspondiente fue la siguiente, [19, 23, 24]:

$$W = 500 \cdot \left[\frac{N \cdot L}{N - 1} + 12N + 32 \right]$$

No obstante, la política de AASHO de 1963 recomendó un peso permisible en eje sencillo de 20000 lb (9072 kg), pero mantuvo el peso en ejes tándem en 32000 lb (14515 kg). Así, el peso bruto de un grupo de ejes se determinaba con esa expresión, lo cual fue adoptado rápidamente por el Sistema Interestatal de Autopistas, [23].

De acuerdo con un reporte presentado en 1964 sobre las máximas dimensiones y pesos deseables de los vehículos basado en estudios dirigidos por el BPR (Bureau of Public Roads), predecesor de la FHWA (Federal Highway Administration), se recomendaba que se permitiera la circulación de vehículos más largos en carreteras federales, [19, 22]. Así mismo, se recomendaba que el ancho límite de los vehículos se incrementara a 102 in (2,59 m) y que el peso en ejes tándem se elevara a 34000 lb (15422 kg), así como que el peso bruto de los vehículos se determinara en función de la denominada “Fórmula Puente B” (Bridge Formula B), [19, 21, 23]. Así, pocos años después, en 1967, la Fórmula B

reemplazó formalmente a su predecesora, la Fórmula A, [23]. Esta variante B es como sigue, [19, 21, 23]:

$$W = 500 \cdot \left[\frac{N \cdot L}{N - 1} + 12N + 36 \right]$$

Aunque hubo otros estudios posteriores que proponían otras expresiones con variantes para determinar pesos permisibles, la fórmula puente B se mantuvo en uso. En esos estudios, los principales ajustes consideraban las características dimensionales y de peso de una mayor variedad de vehículos, de acuerdo con su evolución, [21, 23].

Tal ha sido la aceptación y uso de la fórmula puente en su última versión que en 1975 el Congreso de los Estados Unidos promulgó la legislación que permitía a los estados incrementar los límites de peso en el Sistema Interestatal a los valores determinados por esta Fórmula B, a la vez que se impuso un peso bruto vehicular máximo de 80000 lb (36288 kg) independientemente de la fórmula, aunque los estados mantuvieron la libertad de establecer sus propios límites, [23]. Así, los resultados de esta fórmula son considerados en las regulaciones de peso por la *Federal Highway Administration* (FHWA) y contenidos en el *Code of Federal Regulations* (CFR), específicamente en el apartado 23 C.F.R. 658.17 (*Title 23 - Highways, Part 658 - Truck size and weight, route designations-length, width and weight limitations, section 17 - Weight*), [25].

2.3 Fórmula Puente B

La Fórmula Puente (*Federal Bridge Gross Weight Formula*), también conocida como “Fórmula Puente B” es parte de las regulaciones de pesos y dimensiones de vehículos pesados con la cual se determina el peso máximo que estos vehículos pueden transportar en el tránsito interestatal en Estados Unidos. Como se ha mencionado, fue introducida en enero de 1975 para reducir el riesgo de daño a los puentes en las autopistas a través del empleo de un mayor número de ejes o de mayor separación entre ellos, para compensar la tendencia que se tenía de incremento del peso en los vehículos, [26].

La consideración conceptual de dicha fórmula parte del efecto que generan los momentos flexionantes en un puente cuya magnitud se asocia con la distribución de las cargas aplicadas sobre su estructura. Así, la aplicación de cargas de acción vertical sobre una sección de un puente puede generar momentos y esfuerzos significativos que afecten su desempeño y/o promuevan su deterioro. Esto es, en el caso de los vehículos que transitan sobre ellos, la diferencia de la concentración del peso de un vehículo con distancias entre ejes pequeña y una más amplia

tiene distintas implicaciones en la integridad de los puentes, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.1. Así, dos vehículos con un mismo peso producen una distribución de peso distinta, según la distancia entre sus grupos de ejes.

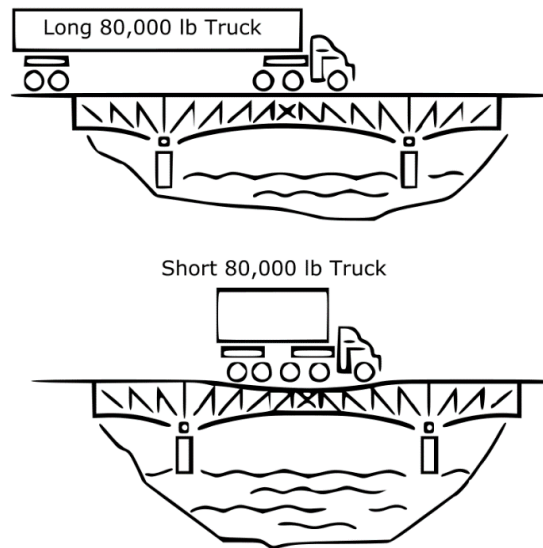


Figura 2.1 Esquema de concentración del peso del vehículo en función de la separación en sus ejes.

Fuente: FHWA (2019).

Con base en su efecto, el peso del vehículo que puede transitar se estima con respecto al número de ejes y la separación de éstos en un grupo o en la configuración vehicular. La expresión vigente de la fórmula puente, como se ha descrito con anterioridad, es:

$$W = 500 \cdot \left[\frac{N \cdot L}{N - 1} + 12N + 36 \right]$$

Donde:

W: Peso bruto global, en lb, en cualquier grupo de dos o más ejes consecutivos con valor redondeado a las 500 lb

L: Distancia, en ft, entre los ejes extremos de cualquier grupo de dos o más ejes consecutivos

N: Número de ejes en el grupo bajo consideración

Adicional a la determinación del peso límite del vehículo con esta fórmula, la regulación en Estados Unidos establece el límite del peso de un eje sencillo con cuatro llantas en 20000 lb (9072 kg), mientras que en

ejes tándem con ocho llantas lo establece en 34000 lb (15422 kg). Así mismo, el límite del peso bruto de combinaciones vehiculares de **5 o más ejes** se fija en 80000 lb (36288 kg), a menos que la fórmula puente resulte en un peso menor, [25, 26, 27].

Conforme con la expresión de la Fórmula Puente, las consideraciones anteriores y algunas condiciones de casos específicos, la Tabla 2.1 muestra los pesos permisibles que se aplican para vehículos en operación regular. La intención de los valores es indicar la carga bruta que puede ser soportada por cualquier grupo de dos o más ejes consecutivos en un vehículo, en el que el límite federal se mantiene en 80000 lb, salvo que apliquen condiciones especiales. Incluso, debido a derechos heredados antes del establecimiento de los límites de peso adoptados en 1956 y enmendados en 1975, algunos estados permiten un peso mayor que el definido a nivel federal, [26].

El límite de peso permisible considera algunas condiciones especiales. Estas consideraciones especiales parten de que el peso de un eje sencillo corresponde al peso total soportado por uno o más ejes que no están separados por más de 40 in (1,02 m), en cuyo caso el límite federal en el Sistema Interestatal de Autopistas es de 20000 lb; mientras que el peso para un eje tándem se refiere al peso total soportado por dos o más ejes consecutivos espaciados más de 40 in (1,02m) pero menos de 96 in (8 ft ; 2,44 m), en el que el límite en el Sistema Interestatal es de 34000 lb, [26].

Esto último se ejemplifica en la Figura 2.2, con dos grupos de ejes en el semirremolque, cuyos ejes extremos presentan el mismo espaciamiento de 97 in (8 ft y 1 in). En el primer caso, el grupo se compone de dos ejes, mientras que, en el segundo, consta de tres. Por tanto, de acuerdo con la Tabla 2.1, para el espaciamiento “>8 ft y <9 ft” corresponden las cargas permisibles respectivas a su número de ejes, que son de 38000 lb y de 42000 lb.

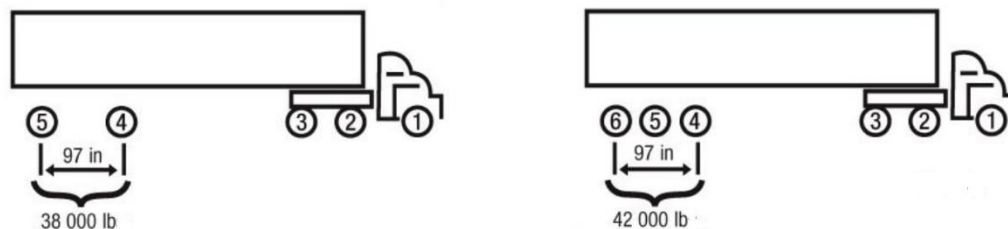


Figura 2.2 Ejemplo de carga permisible en tándem según la fórmula puente.

Fuente: Adaptado de FHWA (2019).

Tabla 2.1 Pesos permisibles según Fórmula Puente

L, ft	Peso máximo, lb							
	2 ejes	3 ejes	4 ejes	5 ejes	6 ejes	7 ejes	8 ejes	9 ejes
4	34000							
5	34000							
6	34000							
7	34000							
8	34000	34000						
>8 y <9	38000	42000						
9	39000	42500						
10	40000	43500						
11		44000						
12		45000	50000					
13		45500	50500					
14		46500	51500					
15		47000	52000					
16		48000	52500	58000				
17		48500	53500	58500				
18		49500	54000	59000				
19		50000	54500	60000				
20		51000	55500	60500	66000			
21		51500	56000	61000	66500			
22		52500	56500	61500	67000			
23		53000	57500	62500	68000			
24		54000	58000	63000	68500	74000		
25		54500	58500	63500	69000	74500		
26		55500	59500	64000	69500	75000		
27		56000	60000	65000	70000	75500		
28		57000	60500	65500	71000	76500	82000	
29		57500	61500	66000	71500	77000	82500	
30		58500	62000	66500	72000	77500	83000	
31		59000	62500	67500	72500	78000	83500	
32		60000	63500	68000	73000	78500	84500	90000
33			64000	68500	74000	79000	85000	90500
34			64500	69000	74500	80000	85500	91000
35			65500	70000	75000	80500	86000	91500
36			66000	70500	75500	81000	86500	92000
37			66500	71000	76000	81500	87000	93000
38			67500	71500	77000	82000	87500	93500
39			68000	72500	77500	82500	88500	94000
40			68500	73000	78000	83500	89000	94500
41			69500	73500	78500	84000	89500	95000
42			70000	74000	79000	84500	90000	95500
43			70500	75000	80000	85000	90500	96000
44			71500	75500	80500	85500	91000	96500
45			72000	76000	81000	86000	91500	97500
46			72500	76500	81500	87000	92500	98000
47			73500	77500	82000	87500	93000	98500
48			74000	78000	83000	88000	93500	99000
49			74500	78500	83500	88500	94000	99500
50			75500	79000	84000	89000	94500	100000
51			76000	80000	84500	89500	95000	100500
52			76500	80500	85000	90500	95500	101000
53			77500	81000	86000	91000	96500	102000
54			78000	81500	86500	91500	97000	102500
55			78500	82500	87000	92000	97500	103000
56			79500	83000	87500	92500	98000	103500
57			80000	83500	88000	93000	98500	104000
58				84000	89000	94000	99000	104500
59				85000	89500	94500	99500	105000
60				85500	90000	95000	100500	105500

Nota: La línea indica el peso máximo autorizado a nivel federal, de 80000 lb (36288 kg).

Fuente: Adaptado de FHWA (2019).

La verificación de si un vehículo cumple con los límites de peso requiere de la revisión de la distribución de éste en los diversos agrupamientos de ejes. Por tanto, la FHWA recomienda el ejercicio de revisión del peso y compararlo con el resultado de la Fórmula Puentes, para lo cual ilustra su aplicación con un ejemplo que se expone en la Figura 2.3.

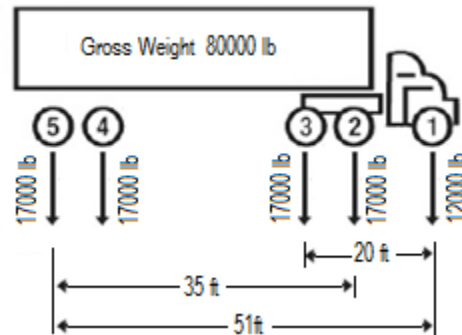


Figura 2.3 Ejemplo de estimación de peso en grupos de ejes.

Fuente: Adaptado de FHWA (2019).

La figura esquematiza a un tractocamión-semirremolque con 5 ejes, con las distancias de separación y cargas como se indica. La secuencia de revisión, para este caso, se aplica como sigue:

1. Peso bruto total, que debe ser no mayor a 80000 lb para combinaciones vehiculares de 5 o más ejes
2. Peso en el eje sencillo, cuatro llantas, que debe ser no mayor a 20000 lb
3. Peso en ejes tándem, que debe ser no mayor a 34000 lb
4. Peso en el tractocamión, considerando ejes 1 a 3
5. Peso en el agrupamiento de todos los ejes, del 1 al 5
6. Peso en el agrupamiento de ejes del 2 al 5

Los primeros tres requerimientos se cumplen, ya que, de acuerdo con los valores de peso indicados, el peso bruto total es de 80000 lb, justo el peso máximo total autorizado para el vehículo. En el eje sencillo el peso de 12000 lb no aplica, ya que el direccional se supondría solamente de dos llantas, no de cuatro. Si existiera un eje de cuatro llantas, el límite sería de 20000 lb. Por otro lado, ambos ejes tándem 2-3 y 4-5 cumplen con el requerimiento respectivo, con cargas de 34000 lb en cada caso.

Respecto al cuarto punto, el peso en el grupo de ejes del tractocamión es de 46000 lb. La fórmula puentes indica lo siguiente:

$$W_{1-3} = 500 \left[\frac{(20)(3)}{3-1} + (12 * 3) + 36 \right] = 51000 \text{ lb}$$

Por tanto, el peso actual es inferior al peso de 51000 lb indicado por la fórmula. En este sentido, la distribución en los ejes 1 a 3, es legal.

El quinto punto es verificar el peso en el agrupamiento de todos los ejes; es decir, del 1 al 5, cuyo peso corresponde al total de 80000 lb. En este caso, la aplicación de la fórmula puente resulta:

$$W_{1-5} = 500 \left[\frac{(51)(5)}{5-1} + (12 * 5) + 36 \right] = 79875 \text{ lb} \approx 80000 \text{ lb}$$

Aunque el peso resultante es de 79875 lb, el redondeo a las 500 lb produce 80000 lb, lo cual corresponde al límite para ese número de ejes y el espaciamiento de los ejes extremos.

Finalmente, el peso en el agrupamiento de ejes 2 a 5 es de 68000 lb. Al aplicar la fórmula puente, el resultado es:

$$W_{2-5} = 500 \left[\frac{(35)(4)}{4-1} + (12 * 4) + 36 \right] = 65333 \text{ lb} \approx 65500 \text{ lb}$$

Como se puede observar, el peso permisible obtenido por la fórmula puente es de 65500 lb (redondeado), lo que es inferior al peso de 68000 lb en esos ejes. El peso actual sobrepasa el peso permisible con esa distribución de peso y espaciamiento de ejes y el vehículo infringe los límites de peso. Por tanto, para tener una configuración de carga legal se debe disminuir la carga o incrementar la separación entre los grupos de ejes entre el tractocamión y el semirremolque, [26].

3. Análisis dimensional y conversión al SGUM

En formulaciones derivadas de fenómenos o situaciones físicas, la igualdad implica que las dimensiones y las unidades de las magnitudes físicas deben ser las mismas en cada miembro de la expresión de la que formen parte. Esto implica que los términos que compongan una suma o diferencia deben ser congruentes y tener las mismas dimensiones y unidades. La identificación de las dimensiones permite convertir de un sistema de unidades a otro, de acuerdo con las necesidades locales.

3.1 Dimensiones de la fórmula puente

Como referencia para el análisis, se transcribe la expresión original vigente de la Fórmula Puente, la cual es:

$$W = 500 \cdot \left[\frac{N \cdot L}{N - 1} + 12N + 36 \right]$$

La anterior, con el significado respectivo de cada término descrito con anterioridad. Al respecto, el miembro izquierdo de la expresión, el peso W , se expresa en lb, lo que implica que la unidad representa la dimensión de fuerza. Por tanto, el resultado del miembro derecho, al cual iguala, debe ser de la misma dimensión; esto es:

$$[D_F] = [D_F]$$

Donde $[D_F]$ representa la dimensión de fuerza.

En el miembro del lado derecho se tiene el factor de "500", del cual no se indican las dimensiones y, consecuentemente, se deben determinar a partir del análisis. El factor complementario, representado entre corchetes, se compone de tres términos que deben cumplir con la condición de congruencia dimensional y, de esa manera, cada término debe tener las mismas dimensiones. Lo dicho anteriormente se puede representar como sigue:

$$500 = [X]$$

$$\frac{L \cdot N}{N - 1} = \left[\frac{D_L \cdot A}{A} \right] = [D_L]$$

$$12 \cdot N = [Y \cdot A]$$

$$36 = [Z]$$

En las expresiones anteriores $[X]$, $[Y]$ y $[Z]$ representan las dimensiones desconocidas para el factor respectivo. $[A]$ denota una variable sin unidades debido a que la variable N representa únicamente un número (número de ejes), es decir, la variable es adimensional; mientras que $[D_L]$ denota la dimensión de longitud.

Como se observa, la dimensión del primer término del miembro derecho es de longitud. Por tanto, el resto de los términos dentro del corchete del miembro del lado derecho deben tener la misma dimensión. Esto conduce a lo siguiente:

$$[Y] = [Z] = [D_L]$$

Por tanto, las dimensiones resultantes de $[X]$ son:

$$[X] = \left[\frac{D_F}{D_L} \right]$$

Puesto que en la expresión de referencia el peso se expresa en lb y la longitud en ft, la expresión de la fórmula puente que incluye las unidades es:

$$W (lb) = 500 \frac{lb}{ft} \cdot \left[\frac{L (ft) \cdot N}{N - 1} + 12 (ft) \cdot N + 36 (ft) \right]$$

Así, la única variable implícita en la expresión matemática que debe absorber las dimensiones es “ L ”, la distancia de separación entre ejes. Esto es importante para la conversión de la expresión a otro sistema de unidades.

3.2 Conversión al SGUM

Conforme con el análisis dimensional, es posible establecer la versión de la fórmula puente en unidades del Sistema General de Unidades de Medida (SGUM), sistema adoptado por México. Vale la pena aclarar que la expresión de peso en vehículos es normalmente expresada como masa, es decir, en kilogramos (kg) y en magnitudes de múltiplos como la tonelada (t), y no en unidades de fuerza, que serían Newtons (N). Para ello, es conveniente considerar las equivalencias de unidades del SGUM

con el sistema absoluto en esas dimensiones; es decir, una libra (1 lb) equivale a 0,4536 kg y un pie (1 ft) corresponde a 0,3048 m. Con esta condición se toma la última expresión y se incluyen las equivalencias, lo que da lugar a que el lado derecho sea el siguiente:

$$500 \frac{\text{lb} (0,4536 \text{ kg})}{\text{ft} (1 \text{ lb})} \frac{(1 \text{ ft})}{(0,3048 \text{ m})} \cdot \left[\frac{L (\text{ft}) \cdot N}{N - 1} \cdot \frac{(0,3048 \text{ m})}{(1 \text{ ft})} + 12 (\text{ft}) \cdot \frac{(0,3048 \text{ m})}{(1 \text{ ft})} \cdot N + 36 (\text{ft}) \cdot \frac{(0,3048 \text{ m})}{(1 \text{ ft})} \right]$$

Una vez que se ajustan las unidades, así como el hecho de que la variable "L" debe absorber la conversión de unidades, la expresión total que resulta, en unidades de metros para la distancia y kilogramos para el peso, es:

$$W (\text{kg}) = 744,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot \left[\frac{L (\text{m}) \cdot N}{N - 1} + 3,6576 (\text{m}) \cdot N + 10,9728 (\text{m}) \right]$$

Esta expresión puede ajustarse para un mejor manejo práctico por medio del redondeo de los coeficientes y del término independiente, aunque no exento de un ligero error. La expresión redondeada puede ser como sigue:

$$W (\text{kg}) = 744 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot \left[\frac{L (\text{m}) \cdot N}{N - 1} + 3,66 (\text{m}) \cdot N + 11 (\text{m}) \right]$$

Con el propósito de verificar la equivalencia, se toma de referencia el ejemplo de aplicación de la fórmula puente del capítulo anterior, con la información indicada en la Figura 2.3. Para este caso, los valores de peso y distancia correspondientes en el SGUM son como se muestra en la Figura 3.1

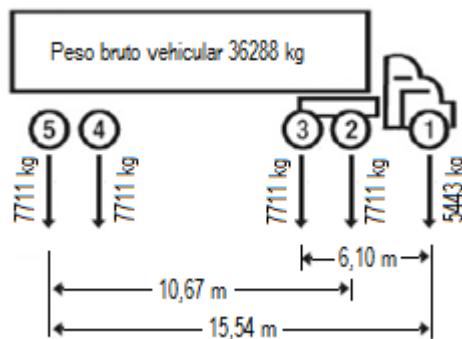


Figura 3.1 Esquema para el ejemplo de verificación de unidades.

Fuente: Adaptado de FHWA (2019).

Con base en la información del esquema, los límites de peso (en kg) correspondientes a los conjuntos de ejes 1 a 3, 1 a 5 y 2 a 5, se obtienen de

acuerdo con la expresión en unidades del SGUM en su versión redondeada, como sigue:

$$W_{1-3} = 744 \cdot \left[\frac{(6,1)(3)}{3-1} + (3,66 \cdot 3) + 11 \right] = 23161 \text{ kg}$$

$$W_{1-5} = 744 \cdot \left[\frac{(15,54)(5)}{5-1} + (3,66 \cdot 5) + 11 \right] = 36256 \text{ kg}$$

$$W_{2-5} = 744 \cdot \left[\frac{(10,67)(4)}{4-1} + (3,66 \cdot 4) + 11 \right] = 29661 \text{ kg}$$

Como puede verificarse, 23161 kg equivalen a 51060 lb, 36256 kg a 79929 lb y 29661 kg a 65390 lb que, comparados con los valores obtenidos con la fórmula original, tienen una diferencia respectiva de 0,12%; 0,07% y 0,09%. Cabe mencionar que el redondeo a las 500 lb que se aplica en la fórmula original es aproximadamente 227 kg y los múltiplos de ese valor no son prácticos de aplicar de manera inmediata.

Por otro lado, la Tabla 3.1 muestra los valores en unidades del SGUM equivalentes a los indicados en la Tabla 2.1; es decir, el espaciamiento L entre ejes expresado en metros y el peso máximo permisible expresado en kilogramos. La tabla muestra el mismo intervalo de valores de acuerdo con los indicados en la tabla original.

Tabla 3.1 Pesos permisibles según Fórmula puente en unidades del SGUM

L, m	Peso máximo, kg							
	2 ejes	3 ejes	4 ejes	5 ejes	6 ejes	7 ejes	8 ejes	9 ejes
1.22	15422							
1.52	15422							
1.83	15422							
2.13	15422							
2.44	15422	15422						
>2.44 y <2.74	17237	19051						
2.74	17690	19278						
3.05	18144	19732						
3.35		19958						
3.66		20412	22680					
3.96		20639	22907					
4.27		21092	23360					
4.57		21319	23587					
4.88		21773	23814	26309				
5.18		22000	24268	26536				
5.49		22453	24494	26762				
5.79		22680	24721	27216				
6.10		23134	25175	27443	29938			
6.40		23360	25402	27670	30164			
6.71		23814	25628	27896	30391			
7.01		24041	26082	28350	30845			
7.32		24494	26309	28577	31072	33566		
7.62		24721	26536	28804	31298	33793		
7.92		25175	26989	29030	31525	34020		
8.23		25402	27216	29484	31752	34247		
8.53		25855	27443	29711	32206	34700	37195	
8.84		26082	27896	29938	32432	34927	37422	
9.14		26536	28123	30164	32659	35154	37649	
9.45		26762	28350	30618	32886	35381	37876	
9.75		27216	28804	30845	33113	35608	38329	40824
10.06			29030	31072	33566	35834	38556	41051
10.36			29257	31298	33793	36288	38783	41278
10.67			29711	31752	34020	36515	39010	41504
10.97			29938	31979	34247	36742	39236	41731
11.28			30164	32206	34474	36968	39463	42185
11.58			30618	32432	34927	37195	39690	42412
11.89			30845	32886	35154	37422	40144	42638
12.19			31072	33113	35381	37876	40370	42865
12.50			31525	33340	35608	38102	40597	43092
12.80			31752	33566	35834	38329	40824	43319
13.11			31979	34020	36288	38556	41051	43546
13.41			32432	34247	36515	38783	41278	43772
13.72			32659	34474	36742	39010	41504	44226
14.02			32886	34700	36968	39463	41958	44453
14.33			33340	35154	37195	39690	42185	44680
14.63			33566	35381	37649	39917	42412	44906
14.94			33793	35608	37876	40144	42638	45133
15.24			34247	35834	38102	40370	42865	45360
15.54			34474	36288	38329	40597	43092	45587
15.85			34700	36515	38556	41051	43319	45814
16.15			35154	36742	39010	41278	43772	46267
16.46			35381	36968	39236	41504	43999	46494
16.76			35608	37422	39463	41731	44226	46721
17.07			36061	37649	39690	41958	44453	46948
17.37			36288	37876	39917	42185	44680	47174
17.68				38102	40370	42638	44906	47401
17.98				38556	40597	42865	45133	47628
18.29				38783	40824	43092	45587	47855

Nota: La línea indica el peso máximo autorizado a nivel federal, de 36288 kg (80000 lb).

Fuente: Elaborado con base en FHWA (2019).

3.3 Fórmula puente en la NOM de pesos y dimensiones

Como ya se ha descrito, la Norma Oficial Mexicana sobre pesos y dimensiones de vehículos de autotransporte hace alusión al uso de una “Fórmula Puente” que, en combinación con la suma de pesos por eje, es considerada para determinar el peso bruto vehicular máximo para las diferentes configuraciones vehiculares. Esta versión, para propósitos de este estudio, se denomina como “fórmula puente local” para diferenciarla de la fórmula original.

El punto 6.1.2.1 de la NOM-012-SCT-2-2017, norma vigente, expresa dicha fórmula local como sigue, [17]:

$$PBV = 870 \cdot \left[\frac{DE \cdot N}{N - 1} + (3,66 \cdot N) + 11 \right]$$

Donde:

PBV: Peso bruto vehicular, [kg]

DE: Distancia entre ejes extremos (medida del centro del eje delantero al centro del último eje del vehículo o configuración vehicular)

N: Número de ejes

Cabe mencionar el antecedente de que esta expresión fue primeramente incluida en la versión de 2008 de la norma de pesos y dimensiones y se mantiene en la versión vigente publicada en 2017. Además, como se indica en la definición de “*DE*”, se aplica únicamente para los ejes extremos en la configuración vehicular, [15, 17].

Es de observar la gran semejanza entre esta expresión local y la versión de la Fórmula Puente expresada en unidades del SGUM. Esto, en referencia a la correspondencia con las variables físicas designadas; es decir, el peso *PBV* corresponde al peso *W* (kg), así como la distancia entre ejes extremos *DE* con el espaciamiento *L* y que *N* representa en ambas versiones el número de ejes. Bajo esa perspectiva, la única diferencia entre la local y la original corresponden al factor “870” y “744” presentes respectivamente en una y otra versión.

Como puede apreciarse, la diferencia entre una y otra se puede expresar a través de la relación matemática entre ellas. Para ello, se define R_{fp} como la relación de la fórmula local entre la versión original, ambas versiones en unidades métricas:

$$R_{fp} = \frac{PBV}{W_{kg}}$$

Dicha relación resulta en lo siguiente:

$$R_{fp} = \frac{870 \left[\frac{DE \cdot N}{N-1} + (3,66 \cdot N) + 11 \right]}{744 \left[\frac{L \cdot N}{N-1} + 3,66 \cdot N + 11 \right]} = 1,169$$

Por tanto, la determinación de peso al utilizar la versión local indicada en la norma de pesos y dimensiones da como resultado un valor superior en 16,9% respecto a la versión original. Esto, bajo la consideración de que la versión en la NOM solamente se especifica para la obtención del peso en el vehículo con todos los ejes involucrados.

4. Análisis comparativo

El establecimiento de límites de peso de los vehículos para transitar por caminos y puentes tiene el propósito de mejorar la seguridad y producir el menor deterioro posible en la infraestructura de la red carretera. Como se ha descrito, uno de los criterios para definir algunos límites corresponde al uso de la fórmula puente. Sin embargo, el origen de la versión utilizada en la normativa mexicana no es claro ni tampoco hay evidencia de algún estudio formal que sustenten el formato que se utiliza actualmente ni a qué configuraciones se aplica. Por tanto, para ilustrar su aplicación se consideran diversas configuraciones y se compara contra sus pesos máximos indicados en la normatividad.

4.1 Requerimientos para la estimación

Las variables involucradas en la expresión de la fórmula puente son, para cada clase de vehículo, el número de ejes y la distancia entre ellos. Del total de ejes se identifican los posibles agrupamientos de ejes consecutivos que puedan conformarse. Para el caso de la expresión original, una combinación vehicular puede discretizarse en varios grupos de ejes, que van desde un par (o en tándem) hasta la totalidad de los ejes en la combinación. Por otro lado, la versión local define únicamente la distancia entre ejes extremos, aunque implícitamente existan agrupamientos de ejes en la unidad vehicular o en la configuración.

Con base en la norma vigente sobre pesos y dimensiones, 23 diferentes configuraciones de carga tienen autorización para circular por la red carretera federal. Estas configuraciones comprenden las cuatro distintas clases de vehículos enunciadas en la NOM-012-SCT-2-2017, que son: camión unitario, camión-remolque, tractocamión articulado y tractocamión doblemente articulado, [17].

La nomenclatura aplicada para cada configuración se establece en función de la clase y el número de ejes y, con ello, para cada configuración éste se identifica con facilidad. Además del número de ejes, la otra variable imprescindible es la separación entre ellos. La norma vigente define las dimensiones globales máximas de la configuración vehicular de alto, ancho y largo, pero no incluye especificación alguna del espaciamiento entre ejes ni recomendación o sugerencia alusiva a ese parámetro. Esto, dada la gran variedad de aplicaciones que una clase de

vehículo de carga puede atender, por lo que sus diseños y fabricación se ajustan a las características dimensionales de acuerdo con la aplicación específica que tendrán.

Como ejemplo práctico, bajo la suposición de que algunas configuraciones vehiculares son frecuentes en carretera, considérense representativas para este propósito las esquematizadas en la Figura 4.1. Dicha figura ilustra la C2, camión unitario de dos ejes; C3, camión unitario de tres ejes; T3S2 y T3S3 compuestas por un tractocamión de tres ejes y un semirremolque de dos y tres ejes, respectivamente, así como la configuración T3S2R4 que se compone de un tractocamión de tres ejes, un semirremolque de dos y un remolque de cuatro.

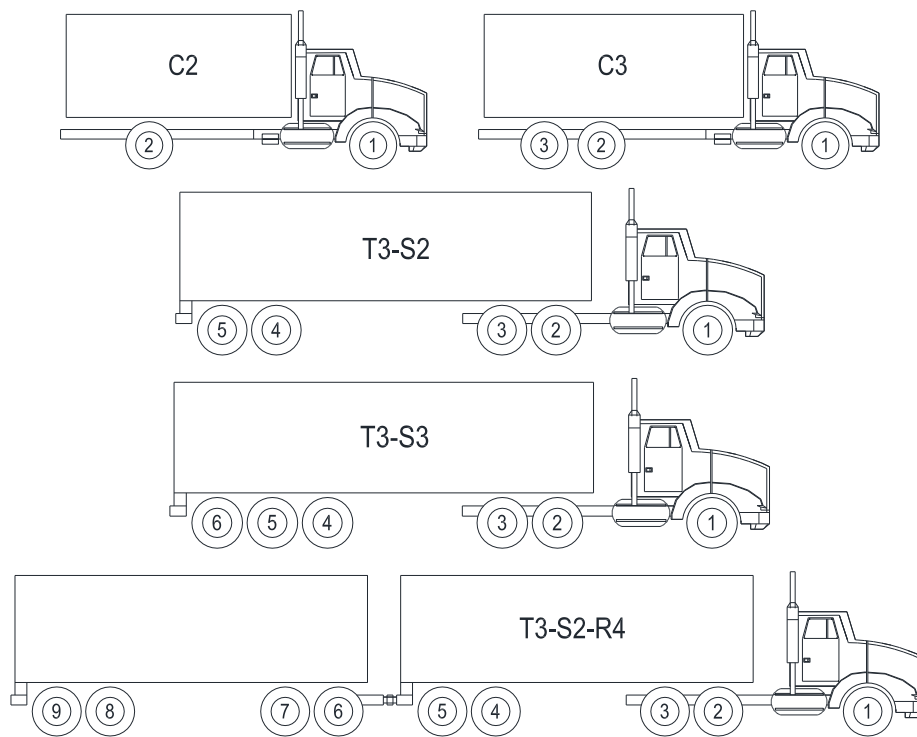


Figura 4.1 Esquemas de configuraciones vehiculares frecuentes y número de ejes.

Fuente: Elaboración propia.

Esas configuraciones incluyen desde la más corta, con el menor número de ejes, hasta una de las más largas con el mayor número de ejes autorizadas para circular en la red federal de carreteras que, a su vez, incluyen la de menor y mayor peso de las configuraciones vehiculares de carga. Los detalles de longitud y peso máximo para estas configuraciones con los que pueden circular en cada tipo de camino de la red de acuerdo con la NOM-012-SCT-2-2017, se presentan en la Tabla 4.1. Cabe mencionar que dicha norma incrementa el peso de la configuración de tractocamión doblemente articulado hasta en 9,0 t, [17].

Tabla 4.1 Peso y longitud máximas por tipo de camino para las configuraciones vehiculares de referencia.

Configuración de referencia	No. de ejes	Peso máximo, [t]				Longitud máxima, [m]			
		ET y A	B	C	D	ET y A	B	C	D
C2	2	19,0	16,5	14,5	13,0	14,0	14,0	14,0	12,5
C3	3	27,5	23,0	20,0	18,5	14,0	14,0	14,0	12,5
T3S2	4	46,5	38,0	33,5	NA	23,0	20,8	18,5	NA
T3S3	6	54,0	45,5	40,0	NA	23,0	20,8	18,5	NA
T3S2R4	9	66,5*	NA	NA	NA	31,0	NA	NA	NA

Nota: NA, no autorizado. *La tabla correspondiente en la norma así lo indica, pero al incluir el incremento autorizado el peso máximo es de 75,5 t.

Fuente: Elaboración propia a partir de SCT (2017).

A partir de la longitud máxima se puede estimar un intervalo aproximado de la posible distancia entre ejes extremos en cada una de esas configuraciones vehiculares. De esa manera, si se toman de base los valores correspondientes a caminos ET y A, y se le restan dos metros en el entendido que tanto el primero como el último eje pueden estar a un metro de los extremos del vehículo, es decir, en su largo total, con ese criterio de estimación se podría definir el valor superior de ese intervalo. El valor inferior puede elegirse de acuerdo con el tamaño esperado de una configuración compacta. Para fines de este ejemplo se eligen los intervalos indicados en la Tabla 4.2, en la que la distancia entre ejes extremos se representa como d_{ee} .

Tabla 4.2 Espaciamento estimado entre ejes.

Configuración de referencia	No. de ejes	d_{ee} , [m]	
		mín	máx
C2	2	4,0	12,0
C3	3	6,0	12,0
T3S2	4	10,0	21,0
T3S3	6	10,0	21,0
T3S2R4	9	15,0	29,0

Fuente: Elaboración propia.

Además de estos datos, que pudieran extenderse para el resto de las configuraciones vehiculares contempladas en la normativa mexicana, se puede utilizar información de mediciones en vehículos reales. Mientras que utilizar el intervalo facilita definir tendencias, los datos prácticos permiten visualizar hechos realistas de la aplicación de la Fórmula Puente.

4.2 Estimación de pesos con fórmula puente

Una primera aproximación sobre las tendencias del peso permisible a partir de la Fórmula Puente en su versión original (Wkg) y local (PBV) se presenta en la Figura 4.2. Las tendencias se ilustran bajo la suposición de

que pudiera alcanzarse un espaciamiento entre ejes en el vehículo en el intervalo contemplado que, en algunos casos, puede no ser práctico.

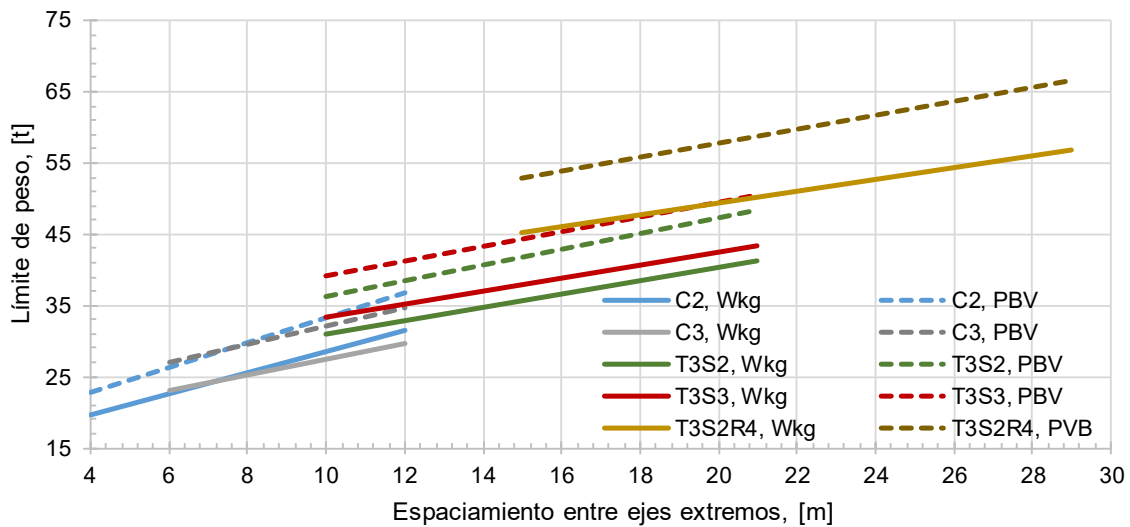


Figura 4.2 Tendencias de límites de peso según versiones de la Fórmula Puente.

Fuente: Elaboración propia.

De la gráfica es posible identificar las diferencias de peso para cada configuración de referencia. Dada la linealidad de la expresión para la distancia de espaciamiento, el paralelismo de las gráficas muestra, para cada configuración con un mismo espaciamiento, la diferencia superior de aproximadamente el 17% de la versión local respecto a la original. Del comportamiento entre configuraciones se aprecia que tiene mayor efecto de incremento del peso permisible un menor número de ejes para los intervalos de distancia en una misma configuración.

Para mayor realismo de las diferencias, de diversos conjuntos de datos disponibles de proyectos realizados en el área de Dinámica Vehicular del Instituto Mexicano del Transporte se tomó una muestra que incluye las configuraciones vehiculares de referencia. Los datos de separación entre ejes para ese tipo de configuraciones, según los registros disponibles, se indican en la Tabla 4.3, ordenados respecto a la ubicación del primer eje.

Como puede apreciarse, algunas presentan espaciamientos diferentes para un mismo tipo de configuración vehicular, lo cual es usualmente encontrado en vehículos en operación práctica. También se observa que los espaciamientos entre el primero y el último eje pueden ser amplios para las configuraciones unitarias (C2 y C3) y simplemente articuladas (T3S2 y T3S3), con base en su proporción aprovechable del largo máximo autorizado. Así mismo, en la configuración doblemente articulada (T3S2R4) la separación en los ejes presenta una mayor uniformidad,

aunque puede haber otras distancias que resulten de la combinación de unidades más cortas en esa misma configuración y, por tanto, mayor cercanía entre los ejes.

Tabla 4.3 Espaciamiento entre ejes de las configuraciones de referencia

Tipo de Configuración	Distancia entre ejes, [m]							
	1 y 2	1 y 3	1 y 4	1 y 5	1 y 6	1 y 7	1 y 8	1 y 9
C2	3,80							
	4,30							
	4,50							
	5,36							
	5,70							
	5,70							
	5,90							
	5,90							
C3	4,40	5,78						
	4,53	5,75						
	4,91	6,21						
	4,91	6,21						
	5,34	6,64						
	5,71	7,04						
	7,74	9,08						
T3S2	3,60	4,90	15,10	16,40				
	3,90	5,20	12,85	14,15				
	4,23	5,53	15,73	17,03				
	4,57	5,90	13,55	14,80				
	4,89	6,27	13,92	15,24				
	4,89	6,27	16,29	17,49				
	5,08	6,43	14,08	15,38				
	5,08	6,43	14,08	15,38				
	5,19	6,51	10,24	11,45				
T3S3	4,23	5,53	15,73	16,97	18,22			
	5,33	6,64	10,87	12,11	13,31			
	5,40	6,69	10,95	12,21	13,43			
	4,90	6,22	10,42	11,73	13,04			
	4,79	6,15	10,19	11,45	12,72			
T3S2R4	4,89	6,27	13,92	15,12	18,16	19,41	27,06	28,26
	4,31	5,69	12,77	14,00	16,79	18,19	26,16	27,39
	4,50	5,80	13,45	14,65	17,69	18,94	26,59	27,79
	4,66	5,94	14,03	15,28	17,91	19,24	27,59	28,82
	4,43	5,82	13,89	15,12	18,04	19,38	27,51	28,77

Fuente: Elaboración propia.

Con los valores de la distancia entre ejes extremos de las configuraciones anteriores se determina el peso límite que resulta de la aplicación de las expresiones original y local de la fórmula puente. Los resultados se presentan en la Tabla 4.4, en el que se incluye el valor de d_{ee} utilizado en cada caso para cada vehículo y configuración; es decir, entre ejes 1 y 2 para el C2, 1 y 3 para el C3, 1 y 5 para el T3S2, 1 y 6 para el T3S3 y 1 y 9 para la configuración T3S2R4.

Tabla 4.4 Límites de peso estimados según distancia entre ejes extremos

Configuración	No. ejes	d _{ee} , [m]	W _{kg} , [t]	PBV, [t]
C2	2	3,80	19,28	22,55
		4,30	20,03	23,42
		4,50	20,33	23,77
		5,36	21,61	25,26
		5,70	22,11	25,86
		5,90	22,41	26,20
C3	3	5,75	22,77	26,63
		5,78	22,80	26,67
		6,21	23,28	27,23
		6,64	23,76	27,79
		7,04	24,21	28,31
T3S2	5	9,08	26,49	30,97
		11,45	32,45	37,94
		14,15	34,96	40,88
		14,80	35,56	41,59
		15,24	35,97	42,06
		15,38	36,10	42,22
		16,40	37,05	43,33
		17,03	37,64	44,01
T3S3	6	17,49	38,06	44,51
		12,72	35,88	41,95
		13,04	36,16	42,29
		13,31	36,41	42,57
		13,43	36,51	42,70
T3S2R4	9	18,22	40,79	47,70
		27,39	55,62	65,04
		27,79	55,95	65,43
		28,26	56,34	65,89
		28,77	56,77	66,39
		28,82	56,81	66,44

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de peso límite estimados con ambas versiones de la Fórmula Puente representarían, en cada caso, el máximo peso que el vehículo debería tener para no afectar la integridad estructural de los puentes de las carreteras; es decir, conforme con los parámetros de diseño del puente, mantener el peso cuando mucho a ese valor estaría dentro de lo esperado para mantener la vida útil proyectada. Las variantes referentes a la separación entre ejes para una misma configuración pueden reunir las condiciones para exceder o no ese límite en la operación práctica, por lo que se debe ser cuidadoso para definir la condición de carga de acuerdo con el intervalo de espaciamiento que pudiera tener un mismo vehículo y cumplir con ese criterio de peso permisible.

4.3 Comparación de pesos límite y máximo

El peso máximo autorizado por la regulación mexicana es único para cada clase y configuración vehicular y puede ser distinto al peso límite estimado por una u otra versión de la fórmula puente. Si el peso máximo autorizado según la NOM-012-SCT-2-2017 es mayor respecto al criterio de esta estimación, entonces se promovería una condición que impactaría en la integridad del puente y en su vida útil; mientras que, si es menor, el peso máximo autorizado correspondería a un valor conservador que no tendría efecto negativo en el nivel de servicio esperado conforme con ese criterio. Por tanto, con el propósito de comparar esa posible condición, se estima la diferencia en términos de lo siguiente:

$$Dif_{\%} = \frac{(P_{FP} - PBV_{nom})}{PBV_{nom}}$$

Donde:

$Dif_{\%}$: Porcentaje de diferencia

P_{FP} : Peso límite obtenido por la Fórmula Puente en cada versión; W_{fp} para la versión original y PBV_{fp} para la versión local

PBV_{nom} : Peso máximo autorizado, según la NOM-012-SCT-2-2017

En ese sentido, una diferencia positiva sería indicador de que el peso máximo autorizado está por debajo del obtenido de la aplicación de la Fórmula Puente y, consecuentemente, no impactaría la vida útil de diseño del puente. Por el contrario, si la diferencia es negativa, entonces el peso máximo autorizado podría impactar la vida útil del puente. Con ese supuesto, se aplica la expresión anterior a los pesos obtenidos por la fórmula puente que, para el caso del camión unitario C2, resulta en la Figura 4.3 con referencia en el mayor y menor peso máximo autorizados, que corresponden a 19,0 t para caminos ET y A y a 13,0 t para caminos D.

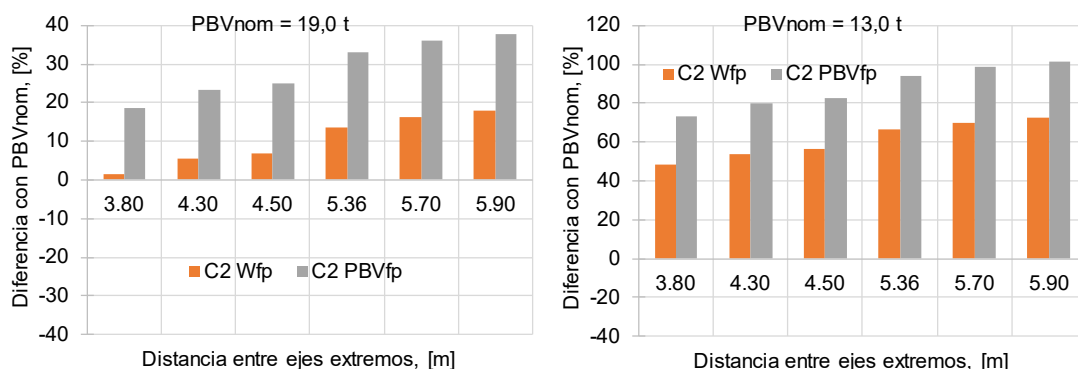


Figura 4.3 Comparación de diferencia para el camión unitario C2.

Fuente: Elaboración propia.

La comparación con ambos pesos muestra que, aún con el mayor peso máximo autorizado, en el intervalo de distancias entre ejes extremos considerado las diferencias son positivas del 1% al 18% respecto al obtenido con la versión original, y de 19% al 38% respecto a la versión local de la Fórmula Puente. Para el menor peso, que correspondería al autorizado para caminos tipo D, las diferencias son mucho mayores, que van de 48% al 72% y del 74% al 102%, respectivamente. En ese sentido, el valor impuesto normativamente para esta configuración, en el intervalo de distancias de espaciamiento de ejes utilizado, corresponde a un peso conservador (menor) desde el criterio de la Fórmula Puente en la promoción del daño.

Para el caso de los espaciamientos y cargas para el camión C3, los resultados gráficos se presentan en la Figura 4.4. Para este vehículo se considera únicamente el peso autorizado para caminos ET y A (27,5 t) y tipo B (23,0 t), suficientes para mostrar las diferencias.

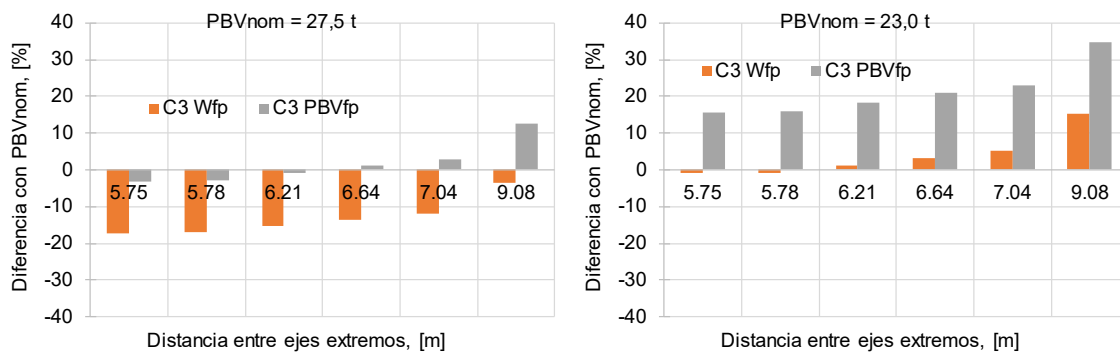


Figura 4.4 Comparación de diferencia para el camión unitario C3.

Fuente: Elaboración propia.

Como se indica en la figura, para el intervalo de distancia entre ejes extremos considerado, las diferencias porcentuales del peso resultante son negativas al aplicar la fórmula original, pero del -17% a -4% en el caso de la expresión local y de -3% a 13% según caminos tipo ET y A. Para el peso máximo en caminos tipo B las diferencias van de -1% a 15% para la original y de 16% a 35% para la local. Por tanto, en caminos tipo ET y A se presentaría una aparente condición que pudiera impactar la integridad y vida útil del puente según la fórmula original, aunque no es así según la fórmula local.

Por su parte, las diferencias porcentuales para la combinación vehicular articulada T3S2, al aplicar una y otra versión de la fórmula puente, se presentan en la Figura 4.5. En dicha figura se incluyen gráficas para el peso máximo autorizado en los caminos tipo ET y A (46,5 t), tipo B (38,0 t) y tipo C (33,5 t) para esta configuración vehicular.

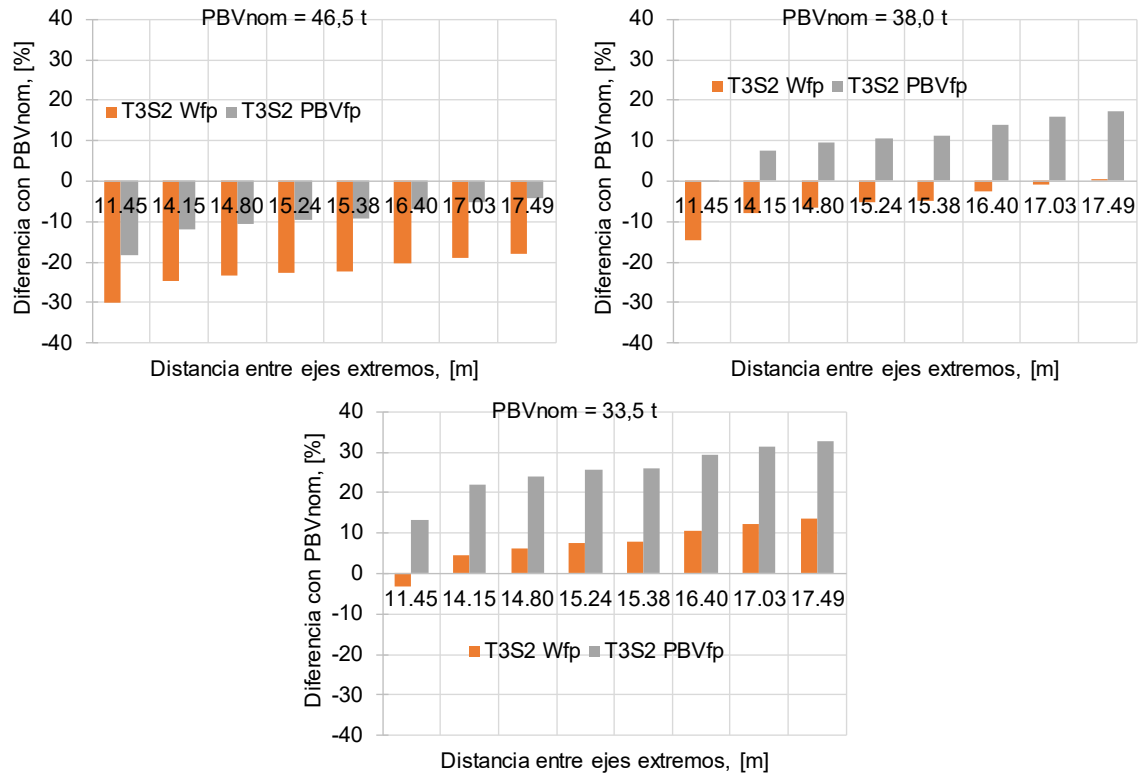


Figura 4.5 Comparación de diferencia para el tractocamión-semirremolque T3S2.

Fuente: Elaboración propia.

De la presentación gráfica de esas diferencias se observa que, para el PBVnom de 46,5 t tanto las diferencias respecto al peso determinado por la fórmula original como por la variante local son negativas, desde -30% a -18% y de -18% a -4%, respectivamente. Esto implica que, en ambos casos, el peso determinado por una y otra expresión es inferior al peso máximo autorizado para esta clase de vehículo en este tipo de caminos, para vehículos que están en el intervalo de distancias entre ejes extremos. Por tanto, circular con los pesos máximos autorizados sería negativo para la integridad del puente.

Para el peso máximo autorizado de 38,0 t en caminos B se observa algo peculiar para la configuración T3S2 en el intervalo de distancia entre ejes extremos contemplado, puesto que la expresión de la fórmula puente original produce valores negativos de -15% a 0%, mientras que la variante local produce diferencias positivas que van de 0 a 17%. Bajo este escenario, el criterio de peso de la variante local presupone que el peso máximo autorizado no promovería deterioro significativo, mientras que la expresión original dicta lo contrario. Así mismo, salvo la distancia más corta contemplada, el peso de 33,5 t no sería un promotor importante de deterioro en puentes, de acuerdo con ambas expresiones de estimación

de peso permisible, con diferencias de -3% a 14% y 13% a 33%, respectivamente para la expresión original y la expresión local.

Ahora, con respecto a la configuración T3S3, con el intervalo de distancias entre ejes parecido al de la configuración articulada anterior, las diferencias porcentuales de los pesos máximos autorizados de 54,0 t; 45,5 t y 40,0 t establecidos correspondientemente para caminos ET y A; B y C, respecto a los pesos permisibles obtenidos por ambas expresiones, los resultados se presentan gráficamente en la Figura 4.6.

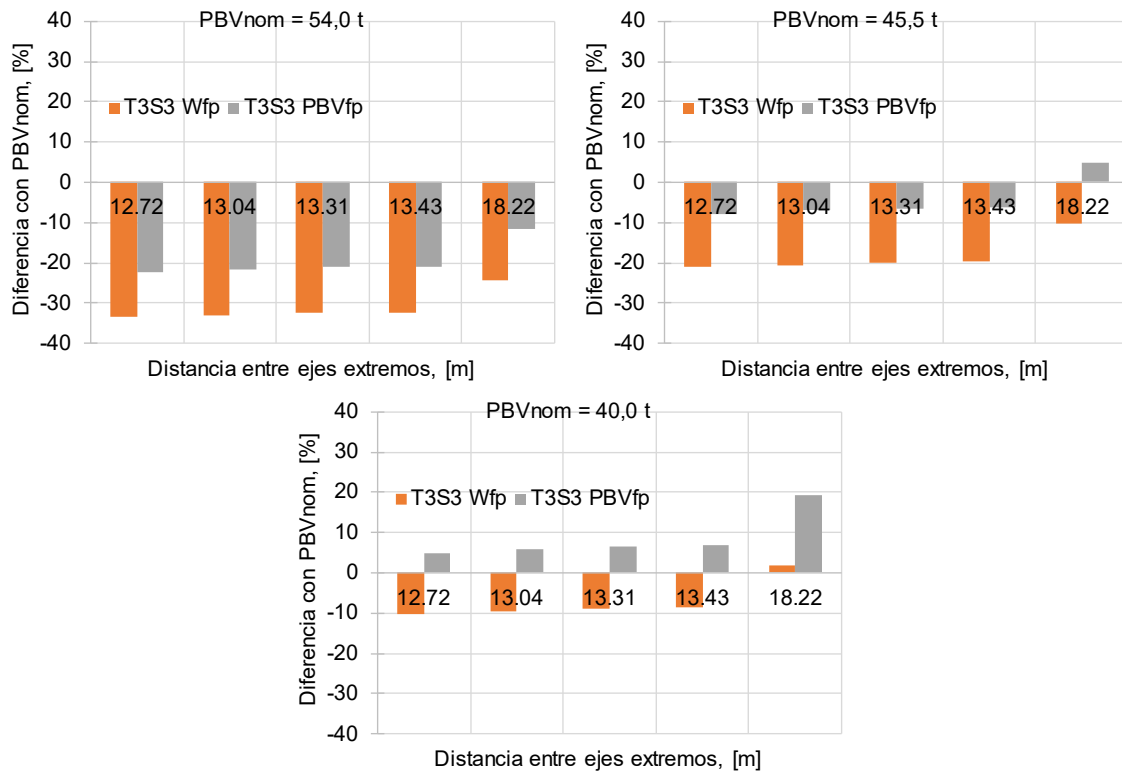


Figura 4.6 Comparación de diferencia para el tractocamión-semirremolque T3S3.

Fuente: Elaboración propia.

Tanto el peso de 54,0 t como el de 45,5 t presentan, en general para esta configuración, diferencias negativas respecto a los pesos que se obtienen a través de la fórmula puente en ambas versiones, siendo más críticas para el caso de la versión original, que van de -33% a -24% para el primer peso y de -21% a -10% para el segundo. En el caso de la fórmula local, las diferencias son menores pero significativas, que van de -22% a -12% para el mayor peso y de -8% -6% para el segundo, excepto en la mayor distancia, que resulta en un valor positivo de 5%.

Aunque esos dos pesos pudieran afectar negativamente la vida útil del puente de acuerdo con ambas expresiones de la fórmula puente, en el

caso del peso de 40,0 t el criterio tiene resultados de oposición entre una versión y otra, ya que las diferencias son, en general, negativas para la versión original, que va de -10% a -8% para distancias entre ejes corta, pero en la mayor distancia (18,22 m) tiene una diferencia positiva de 2%. Para la versión local, las diferencias son positivas (5% a 19%), lo que implicaría, bajo ese criterio, que no sería promotor importante de daño.

Las diferencias para los pesos de la configuración T3S2R4 se presentan en la Figura 4.7, con un intervalo estrecho de distancias entre ejes, de apenas 1,43 m de diferencia en ese intervalo. Esta configuración está autorizada solamente para caminos ET y A, por lo que el peso máximo considerado en este caso es de 66,5 t.

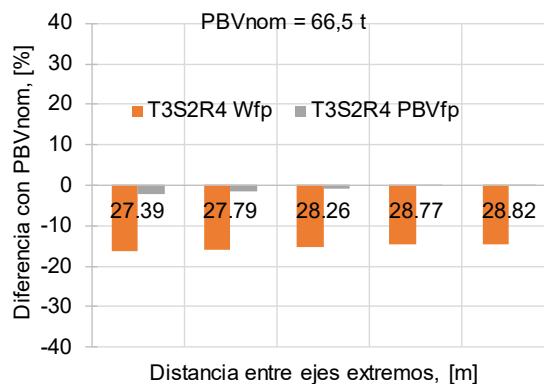


Figura 4.7 Comparación de diferencia para el tractocamión-semirremolque-remolque T3S2R4.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, con ese estrecho intervalo de distancia entre ejes extremos la diferencia del peso con respecto al que resulta de la aplicación de la expresión original son valores negativos que, en promedio, ronda el -15%. En contraparte, la aplicación de la versión local arroja diferencias no menores del -2%, que podrían asumirse como irrelevantes para la integridad de la estructura de los puentes y su correspondiente proyección de vida útil según los criterios de su diseño.

Los resultados anteriores para esta configuración vehicular hacen referencia a 66,5 t como peso máximo nominal. No obstante, se debe considerar la autorización explícita de incremento de peso para las configuraciones doblemente articuladas, como se indica en la NOM-012-SCT-2-2017. Para el caso de la configuración T3S2R4 es de 9,0 t superior al peso nominal; es decir, el peso máximo autorizado es de 75,5 t, [17].

La comparación de ese peso de 75,5 t con los resultados de peso permisible obtenidos de las expresiones de fórmula puente original y local, son los mostrados en la Figura 4.8. Para esa condición de peso, las

diferencias alcanzan en promedio -25% para la versión original y -13% para la versión local, ambas con diferencia importante como criterio que indica un impacto negativo sobre la vida útil esperada de puentes.

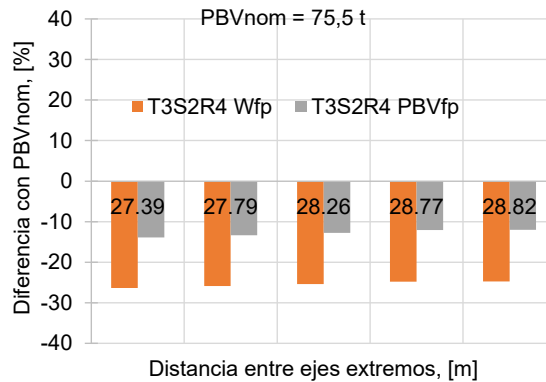


Figura 4.8 Comparación de diferencia para el camión unitario de tres ejes.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionarse que la longitud máxima autorizada para las configuraciones doblemente articuladas es, en su gran mayoría, de 31,0 m. La distancia entre ejes extremos considerada para la estimación (aprox. 28,5 m) es cercana a la máxima distancia práctica de diseño de esas configuraciones; por tanto, no es práctico extender la distancia entre ejes extremos para disminuir el efecto.

4.4 Discusión

Es evidente que la expresión local de la fórmula puente contemplada en la norma oficial sobre pesos y dimensiones resulta en pesos de mayor magnitud que la fórmula original, estimados en alrededor de un 17% superior. Como se ha descrito, la expresión original se obtuvo de los resultados del análisis de los momentos flexionantes y fuerzas cortantes producidos por los vehículos circulantes en las autopistas estadounidenses en su paso sobre las estructuras de puentes. Tales vehículos eran en configuraciones de menor longitud y peso que los que pudieran circular en carreteras mexicanas en la época en que se desarrollaron los estudios y que, en la actualidad, presentan diferencias en esos y otros parámetros. Esos estudios proporcionaron las bases para definir la expresión de un peso permisible en función del número de ejes y del espaciamiento entre ellos, tanto en la configuración vehicular como en los agrupamientos de ejes consecutivos en la configuración.

La Norma Oficial Mexicana sobre pesos y dimensiones vigente establece que esta versión local se aplica únicamente a configuraciones de tractocamión doblemente articulado, además de que utiliza solamente el

espaciamiento entre ejes extremos en la configuración, no en grupos. De esta manera, se discrimina la distribución del peso sobre los ejes y los diferentes agrupamientos de ejes consecutivos que pueden definirse en la configuración vehicular. Además, según la norma, la fórmula local no se aplica al resto de las configuraciones de carga autorizadas para circular en la red federal de carreteras, por lo que su aplicación es parcial.

Aunque no se dispone de información técnica precisa sobre el origen de la fórmula local, el factor “870” utilizado en la expresión posiblemente fue adoptado a partir de la revisión del peso de la configuración de tractocamión doblemente articulado. La sugerencia que da lugar a esta premisa se apoya en los resultados de la configuración T3S2R4 con el peso de 66,5 t y la distancia entre ejes alrededor de 29 m, común en este tipo de configuración vehicular. Los resultados de la expresión local son los únicos coincidentes de las configuraciones analizadas con los datos disponibles aquí presentados. Así mismo, el uso de este factor, que resulta en un peso mayor con la aplicación de la fórmula local, tiene también un posible sustento en la consideración de cargas vivas con modelos de vehículos de mayor peso en el diseño de los puentes de la red federal de carreteras.

De acuerdo con la normativa federal para la infraestructura del transporte se aplican los modelos de vehículos denominados “IMT 66.5” e “IMT 20.5”, que representan una condición de carga viva superior a modelos previamente utilizados, los cuales fueron propuestos para el diseño de puentes y adoptados en dicha normativa a partir de 2001, [28, 29]. Sin embargo, la existencia de puentes diseñados y construidos con criterios anteriores a esta consideración requiere de un tratamiento más conservador, lo que pudiera sugerir que el control de pesos de vehículos circulantes pudiera basarse o analizarse bajo el criterio de la expresión original o, en su defecto, que se pudiera extender la aplicación y el análisis a subgrupos de ejes en la misma configuración.

Es también evidente que la aplicación tanto de la versión original como de la versión local de la fórmula puente produce, en general, pesos permisibles de menor magnitud que los pesos máximos autorizados en carreteras tipo ET y A. Esto, principalmente para vehículos de transporte de carga de las clases tractocamión simple y doblemente articulados y, aunque en menor proporción de la diferencia de carga, también aplica para configuraciones de camión unitario de tres ejes. Estos resultados, a priori, sugieren la necesidad de un análisis de mayor detalle para la búsqueda y definición de criterios que pudieran aplicarse, con bases de mayor sustento, para el establecimiento de límites de peso.

Conclusiones

El deterioro físico de caminos y puentes debido al tránsito de vehículos ha sido un tema de preocupación e interés permanente de las autoridades encargadas de la construcción, conservación y mantenimiento de la infraestructura carretera, particularmente cuando los niveles de deterioro sobrepasan los niveles normalmente esperados y, consecuentemente, puedan reducir de manera significativa la vida útil. Los puentes son obras de conexión sensibles en las rutas de transporte carretero que tienen mayor repercusión sobre la continuidad de la comunicación si presentan daño. Por tanto, conservar su adecuado nivel de servicio es un aspecto prioritario para las autoridades responsables.

Un factor que ha sido determinante en la vida útil de la infraestructura y en su calidad de servicio es el peso de los vehículos de carga, razón por la cual ha sido importante regular, verificar y controlar su magnitud para el tránsito. Límites de peso se han implementado desde antes de la mitad del siglo pasado en diversos países, los cuales se han ido modificando a lo largo del tiempo. La definición de los límites no ha sido una tarea sencilla debido, entre muchos aspectos, a la necesidad a lo largo del tiempo de incremento de los bienes transportados de la sociedad y a la evolución asíncrona de vehículos, carreteras y puentes. En la complejidad de la definición de límites se involucra, además, el efecto que el peso y su distribución en el vehículo pudiera tener en temas de seguridad.

El deterioro de puentes y carreteras por el tránsito de vehículos pesados evidenció la necesidad de tener control sobre las condiciones de operación de los vehículos en Estados Unidos. En su Sistema Interestatal de Autopistas (*Interstate Highway System*) se legalizó el criterio de peso permisible de vehículos de carga que transiten en su red de acuerdo con la Fórmula Puente B. Además, se condiciona el peso de eje sencillo (20 klb, 9,1 t), de tándem (34 klb, 15,4 t) y del peso bruto vehicular (80 klb, 36,3 t). Esto, derivado del análisis de resultados de estudios sobre el momento flector producido por los vehículos sobre la estructura de los puentes, que resultó en la expresión de dicha fórmula en función del número de ejes y el espaciamiento entre ellos.

Por la parte mexicana, el peso máximo con el que un vehículo de autotransporte puede transitar en caminos y puentes federales está establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017. En este

sentido debe notarse que, en general, el peso permitido por eje o combinación de ejes en la normativa mexicana es muy superior a los permitidos en las carreteras de los Estados Unidos. Por ejemplo, el peso por eje sencillo de cuatro llantas puede ser de 11,0 t y de 12,5 t si es motriz; es decir, 20% y 27% superiores, respectivamente; mientras que un doble de ocho llantas es de 19,0 t y de 21,0 t si es motriz, superiores en 23% y 36%, respectivamente.

Para el establecimiento del peso máximo autorizado en combinaciones de tractocamión doblemente articulado se utiliza, de manera combinada, el límite de peso por eje y una expresión local de la fórmula puente, la cual difiere de la fórmula original por el valor de un coeficiente. Tal coeficiente tiene el valor de 744 kg/m en la fórmula original, mientras que en la fórmula local es de 870 kg/m, lo que produce en su versión local diferencias de pesos aproximadamente 17% superiores a los de la versión original. Al respecto, no se encontró evidencia técnica disponible que defina la forma en que se estableció tal coeficiente.

Además del coeficiente, la versión local define su aplicación solamente con el número de ejes en la configuración vehicular y la distancia entre los ejes extremos (primero y último), mientras que la original considera el número de ejes y el espaciamiento entre ejes extremos de distintos agrupamientos de ejes consecutivos en la configuración vehicular. De esta manera, la versión original define pesos permisibles en agrupamientos intermedios de ejes, lo que le da mayor relevancia a la distribución de peso para todos los ejes en el vehículo.

Para las configuraciones vehiculares de carga contempladas en la NOM-012-SCT-2-2017, de la aplicación de la fórmula puente tiene mayor efecto de incremento del peso un menor número de ejes para los intervalos de distancia en una misma configuración y el espaciamiento entre ejes sea mayor. Esto es, las configuraciones de pocos ejes como la C2 y la C3 son más sensibles al incremento o decremento de la separación entre ejes. Con base en el posible tamaño del vehículo, los espaciamentos entre el primero y el último eje pueden ser amplios para las configuraciones unitarias C2 y C3 (14 m de longitud máxima), así como medianamente amplias para las simplemente articuladas como la T3S2 y la T3S3 (23 m de longitud máxima). No obstante, en la configuración doblemente articulada como la T3S2R4 (31 m de longitud máxima), la separación en los ejes es relativamente menor, por lo que en esta clase los agrupamientos de ejes pueden estar muy cercanos, particularmente en combinaciones de unidades de pequeña longitud.

Con base únicamente en la ubicación de ejes extremos en el conjunto de configuraciones referidas en el estudio, los pesos determinados por la

aplicación de las versiones original y local de la fórmula puente muestran diferencias que pueden ser muy amplias respecto al peso máximo autorizado en México:

- En vehículos unitarios C2 (dos ejes) el peso máximo de 19,0 t puede ser inferior hasta en un 18% de acuerdo con la versión original, y hasta un 38% del peso permisible por la versión local.
- Para vehículos unitarios C3 (tres ejes) con peso de referencia de 27,5 t el peso permisible obtenido de la fórmula original resulta inferior en hasta 17%, mientras que la versión local resulta en pesos superiores con hasta 15% de diferencia.
- En la configuración articulada T3S2 (cinco ejes), con respecto al peso máximo autorizado de 46,5 t implican que este peso es hasta un 30% superior del peso permisible obtenido por la versión original y hasta un 18% para la versión local.
- En la configuración T3S3 (seis ejes) con referencia a un peso máximo autorizado de 54,0 t, éste es superior hasta en 33% del peso permisible proporcionado por la fórmula original y hasta un 22% del de la fórmula local.
- Respecto al peso máximo autorizado de 66,5 t para la configuración T3S2R4 (nueve ejes), éste es superior aproximadamente un 15% que el obtenido de la fórmula original, mientras que es muy cercano al obtenido con la fórmula local, con diferencias no mayores al 2%. No obstante, si se considera el incremento autorizado que resulta en un peso máximo de 75,5 t las diferencias son superiores en un 25% y un 13% del peso permisible de la expresión original y de la local, respectivamente.

De los resultados se deduce que el factor “870” utilizado en la fórmula local pudo tomar de referencia las características de longitud y peso de la configuración T3S2R4, con base en un peso de 66,5 t y una distancia entre ejes extremos de 29,0 m. El uso de este factor en la fórmula local puede tener también un posible sustento en la consideración de cargas vivas con los modelos de vehículos “IMT 66.5” e “IMT 20.5”, contemplados en la normativa federal para la infraestructura del transporte desde 2001, lo que supone la construcción de puentes con mayor resistencia. Sin embargo, se deben tener en cuenta puentes diseñados y construidos con criterios anteriores a esta consideración, lo que requiere de un tratamiento más conservador.

Los resultados de pesos permisibles que resultan de ambas versiones (original y local) de la fórmula puente son, en general, inferiores a los máximos autorizados en carreteras tipo ET y A. Para mayor sustento, los resultados sugieren la necesidad de un análisis de mayor detalle para la

búsqueda y definición de criterios que pudieran aplicarse para el establecimiento de límites de peso en vehículos de carga pesada. Debe considerarse, además, los agrupamientos de ejes en una misma configuración, que permitan profundizar sobre la distribución de peso permisible en ejes intermedios, además del total de ejes en el vehículo. En este aspecto, debe tenerse también en cuenta la magnitud de los pesos máximos por eje o grupo de ejes según la NOM-012 (superiores a los utilizados en Estados Unidos, por ejemplo), que sienta una base de reflexión sobre parámetros de diseño y construcción de caminos y puentes, así como sobre su vida útil y el rendimiento de su inversión.

Así mismo, deben realizarse estudios que consideren no solamente el efecto del peso de los vehículos en el deterioro de caminos y puentes, sino también el efecto en el desempeño y seguridad vial. Esto, ya que la magnitud del peso y la distribución sobre los ejes afecta su comportamiento dinámico y las características de control en su movimiento. Al respecto, debe considerarse analizar la posibilidad de transitar hacia el sistema de estándares basados en desempeño (PBS por sus siglas en inglés), que den mayor certidumbre las configuraciones vehiculares que se autoricen con base en el desempeño seguro y compatible con la infraestructura carretera.

Bibliografía

1. Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas [SCOP]. (19 de febrero de 1940). *Decreto: Ley de Vías Generales de Comunicación*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.
2. Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas [SCOP]. (9 de enero de 1948). *Decreto: Reforma al Capítulo II del Título II, Libro Segundo de la Ley de Vías Generales de Comunicación de 30 de diciembre de 1939*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.
3. Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas [SCOP]. (24 de agosto de 1949). *Reglamento del capítulo de explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.
4. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (24 de diciembre de 1960). *Decreto que reforma el capítulo undécimo del Reglamento del Capítulo de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.
5. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (03 de octubre de 1980). *Decreto por el que se modifica el Capítulo XI del Reglamento del Capítulo de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.
6. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (28 de noviembre de 1980). *Apéndice 1 al Capítulo XI del Reglamento del Capítulo de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.
7. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (28 de noviembre de 1980). *Apéndice 2 al Capítulo XI del Reglamento del Capítulo de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.
8. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (28 de noviembre de 1980). *Apéndice 3 al Capítulo XI del Reglamento del Capítulo de Explotación de Caminos de la Ley de Vías Generales de Comunicación*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.

9. Mendoza, A.; Cadena, A. (1992). *Estudio de pesos y dimensiones de los vehículos que circulan sobre las carreteras mexicanas - Análisis estadístico del peso y las dimensiones de los vehículos de carga que circulan por la red nacional de carreteras - Estaciones instaladas durante 1991*. [Documento Técnico No. 8]. México: Instituto Mexicano del Transporte.
10. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (22 de diciembre de 1993). *Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.
11. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (28 de enero de 1994). *Reglamento sobre el peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de Jurisdicción Federal*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.
12. Secretaría de Economía [SE]. (01 de julio de 1992). *Ley Federal sobre Metrología y Normalización*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.
13. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (29 de noviembre de 1994). *NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-1994, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.
14. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (07 de enero de 1997). *NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-1995, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.
15. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (01 de abril de 2008). *NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.
16. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (14 de noviembre de 2014). *NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2014, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.

17. Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT]. (26 de diciembre de 2017). *NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal*. Diario Oficial. Estados Unidos Mexicanos.
18. Wikipedia. (2022). *Federal Bridge Gross Weight Formula*. Consultado desde https://en.wikipedia.org/wiki/Federal_Bridge_Gross_Weight_Formula
19. Napier, C. S., Eicher, J. P. (1988). *The United States Bridge Formula*. Proceedings / International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. June 8-13, 1986. Kelowna, British Columbia. Roads and Transportation Association of Canada (TAC). Consultado desde <https://hvttforum.org/wp-content/uploads/2019/11/The-United-States-Bridge-Formula-Napier-.pdf>
20. Congress of United States of America. (1956). *Federal Aid Highway Act of 1956 (National Interstate and Defense Highways Act)*. Consultado desde <https://www.archives.gov/milestone-documents/national-interstate-and-defense-highways-act> USA: National Archives.
21. Noel, J. S.; James, R. W.; Furr, H. L.; Bonilla, F. E.; Cayes, L. R. (1986). *Bridge Formula Development*. Transportation Research Record No. 1072.
22. Bureau of Public Roads [BPR]. (August 19, 1964). *Maximum Desirable Dimensions and Weights of Vehicles Operating on the Federal-Aid Systems*. Doc. 354, 88th Congress, 2nd Session, U.S. Department of Commerce.
23. Noel, J. S.; James, R. W.; Furr, H. L.; Bonilla. (1985). *Bridge Formula Development*. Final Report (FHWA/RD-85-088) for Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation. Washington, D. C. USA.
24. Stephenson, H. K., Noel, J. S. and Mayfield, A. D. (1962). *Truck Weight Trends Related to Highway Structures*. Bulletin No. 19, Texas Transportation Institute. Obtenido desde <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/TTI-1962-9.pdf>
25. Code of Federal Regulations [CFR]. (2022). *23 CFR 658.17 Weight*. USA: National Archives. Consultado desde

<https://www.ecfr.gov/current/title-23/chapter-I/subchapter-G/part-658/section-658.17>

26. Federal Highway Administration [FHWA]. (2019). *Bridge Formula Weights*. USA: Department of Transportation. Consultado desde https://ops.fhwa.dot.gov/freight/publications/brdg_frm_wghts/fhwah_op19028.pdf
27. United States Code. (2022). *Vehicle weight limitations-Interstate System*. 23 U.S.C. 127. Consultado desde <https://uscode.house.gov/view.xhtml?hl=false&edition=prelim&req=granuleid%3AUSC-1999-title23-section127&num=0>
28. Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT]. (2001). *Norma N-PRY-CAR-6-01-003/01 Cargas y acciones*. México. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/N-PRY-CAR-6-01-003-01.pdf>
29. Rascón, O. (2004). *Formulación de la Norma SCT de Cargas Vehiculares para Diseño Estructural de Puentes Carreteros*. [Publicación Técnica No. 243]. México: Instituto Mexicano del Transporte.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
San Fandila, Pedro Escobedo
C.P. 76703
Querétaro, México
Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>