VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Evaluación del Efecto de Frenado por Cargas Vivas Vehiculares en Puentes Mexicanos

Assessment of Braking Effect by Vehicle Live Loads on Mexican Bridges

Alejandro Hernández Martínez[1], Andrea Sofía Flores Ramírez[2]

[1]Profesor e investigador del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. alejandro.hernandez@ugto.mx

[2]Estudiante del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato as.floresramirez@ugto.mx

Resumen

En el presente trabajo se presenta la evaluación del efecto de frenado en puentes de vigas simplemente apoyadas. Para la evaluación se emplean aforos vehiculares WIM (weigh-in-motion) que representan datos de vehículos que realmente transitan en carreteras de México. Por otra parte, se emplean los criterios empleados por el Reglamento Canadiense para el Diseño de Puentes Carreteros (CAN/CSA, 2014), el AASHTO (2024) que es el correspondiente en los EE. UU., así como en la Normativa Mexicana correspondiente. Tanto los aforos WIM como los modelos de cargas vivas correspondientes a los diferentes criterios normativos se analizan empleando una versión actualizada de software AMER 2.0 (2019). La evaluación de los efectos de frenado que se obtienen de los datos de aforos, así como de los diferentes criterios de diseño de puentes se realizan empleando el concepto de tasa de excedencia, en un formato de espectro en función de la longitud de los puentes considerados. Como podrá notarse, la gran variación de las tasas de excedencia que se muestran en los puentes de claro corto (menores a 10 m) indican que todos los criterios empleados en los reglamentos actuales tienen problemas para estimar adecuadamente las fuerzas de frenado respecto a lo que ocurre con los vehículos del tráfico real, representados por los aforos WIM.

Palabras clave: Fuerza de frenado, tasa de excedencia, modelos vehiculares, puente vehicular.

Introducción

Los puentes son elementos de la infraestructura de un país o región que permite el transporte de bienes y personas. Durante el proceso de diseño o evaluación de los puentes existen un gran número de condiciones de carga que un puente debe ser capaz de soportar durante su vida útil, siendo las provocadas por las cargas vivas vehiculares una de las que tienen una relevancia especialmente importante. Los modelos de cargas vivas de cada reglamentación tratan de ser representativos del tráfico real en el país o región de donde es una normativa aplicable, e intenta inducir los efectos más desfavorables que el tráfico real induce en las estructuras de los puentes. De esta forma, cada reglamento tiene sus propios modelos de carga viva, así como los criterios de cómo debe usarse para obtener dichos efectos desfavorables para poder diseñar o evaluar la estructura de un puente.

Modelos de Cargas Vivas en México

En México, durante muchos años se emplearon los modelos de cargas vivas T3-S3 y T3-S2-R4 (ver Figuras 1a y 1b) como vehículos para diseño, empleándose para diseñar un gran número de puentes. En años más recientes se ha implementado el modelo IMT 66.5 (Figura 1c) como el modelo de carga viva a emplear. Ya que en la actualidad en México no contamos con un reglamento de diseño de puentes como tal, cualquiera de los modelos de carga viva anteriores se emplea en combinación con los criterios de diseño definidos en el AASTO (2024).

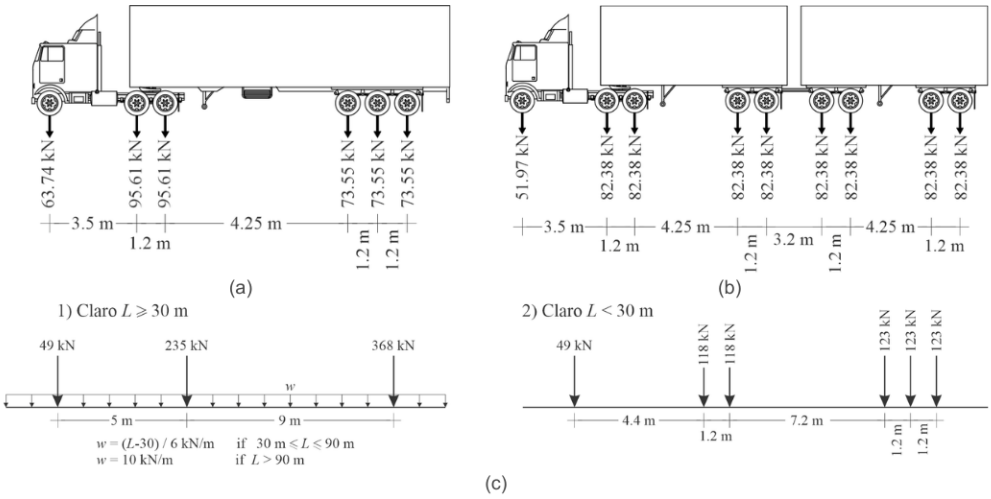


Figura 1. Modelos vehiculares mexicanos. (a) T3-S3 (b) T3-S2-R4 (c) IMT-66.5.

Modelos de Cargas Vivas Canadienses

El Código Canadiense CAN/CSA (2014) emplea el modelo CL-625, el cual tiene dos variantes. La primera corresponde a un vehículo idealizado de 5 ejes, como se muestra en la Figura 2a, mientras que la segunda variante corresponde al 80% de las cargas anteriores más una carga uniforme de 9 kN/m. Así, para fines de diseño o evaluación, se tomará el efecto más desfavorable de ambas variantes.

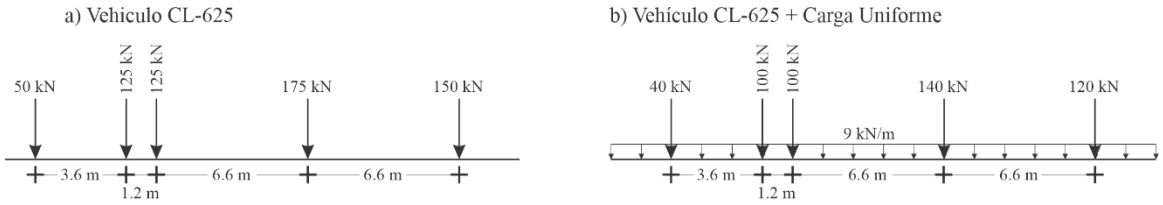


Figura 2. Modelo CL-625.

La provincia de Ontario tiene un modelo propio denominado CL-625-ONT (Figura 3), el cual no modifica el peso bruto vehicular, pero si la distribución de las descargas de los ejes.

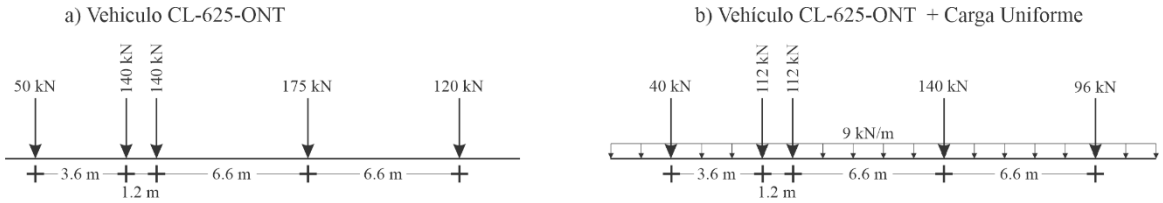


Figura 3 Modelo CL-625-ONT.

Los modelos CL-625 y CL-625-ONT mostrados en las Figuras 2 y 3 representan las cargas gravitacionales que inducen los modelos al puente. Para el efecto de frenado el código canadiense indica que se debe modelar como una carga concentrada de 180 kN más el 10% de la carga uniforme de 9 kN/m (es decir, 0.9 kN/m) aplicada en la superficie del tablero en la dirección del frenado, como se muestra en la Figura 4.

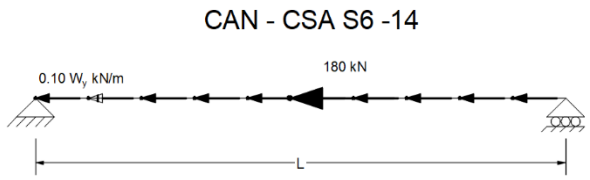


Figura 4. Efecto de frenado del Reglamento Canadiense CAN/CSA (2014).

Modelos de Cargas Vivas de los Estados Unidos de América

El AASHTO emplea tres variantes para determinar las fuerzas gravitacionales que inducen las cargas vehiculares. El primero corresponde a un vehículo de tres ejes con descargas de 35.56 kN (8 kip), dos ejes con 142.34 kN (32 kip), teniendo una distancia entre ejes variable entre los 4.27 y 9.14 m (14 a 30 ft), adicionalmente se debe considerar una carga uniforme de 9.34 kN/m (640 lb/ft) como se muestra en la Figura 5a. La segunda variante implica dos cargas de 111.21 kN (25 kip) separados 1.22 m (4 ft), como se muestra en la Figura 5b. La tercera variante implica el 90% de las cargas de dos vehículos separados un mínimo de 15.24 m (50 ft) mas 90% de la carga uniforme como se muestra en la Figura 5c. En esta última variante no se considera una distancia entre ejes variable del vehículo, dejándose fija en 4.27 m (14 ft).

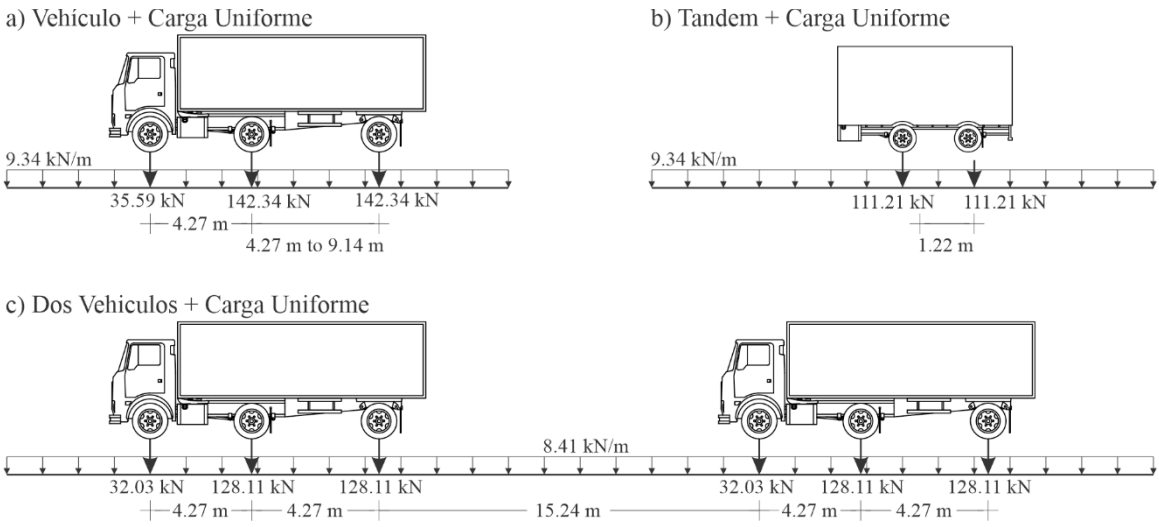


Figura 5. Modelo HL-93 del AASHTO (2024).

Para evaluar el efecto del frenado, el AASHTO (2024) indica que se debe considerar el efecto más desfavorable que se obtiene de:

a) 25% de las descargas de los ejes de los vehículos o tándem
b) 5% de los vehículos de diseño + 5% de la carga uniforme distribuida

Estas fuerzas deben considerarse que actúan en el sentido del frenado a 1.83 m (6 ft) de altura sobre la superficie de rodamiento, para simular que el centro de masas vehicular está a dicha altura. Este aspecto de aplicación de las cargas se ilustra en la Figura 6.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

AASHTO LRFD 2024

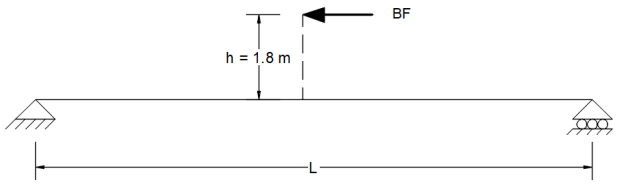


Figura 6. Efecto de frenado del Reglamento AASHTO LRFD (2024).

Por tanto, las fuerzas que realmente se aplican en los modelos de puentes para estimar el efecto de frenado al emplear el criterio definido en el AASHTO (2024) se resumen en la Figura 5.

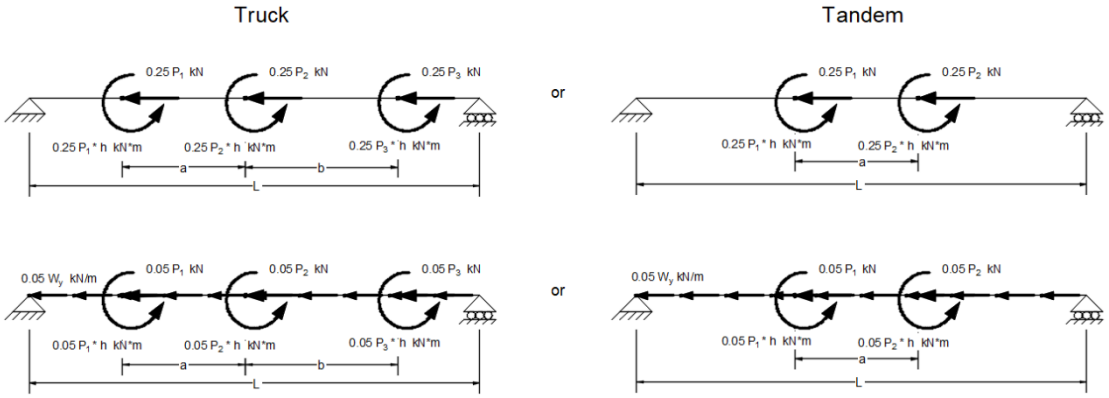


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre de la fuerza de frenado de modelos vehiculares AASHTO en barras simplemente apoyadas.

Debido a que en México no se cuenta con un Reglamento para el Diseño de Puentes, y solamente se ha trabajado en definir (entre otros aspectos) los modelos de cargas vivas, como los que se muestran en las Figuras 1 y 2, es práctica común que los criterios adicionales para el diseño o evaluación de puentes vehiculares se realice con la versión más reciente del AASHTO, por lo que el criterio mostrado en la Figuras 6 y 7 para la evaluación del frenado también será empleado por los modelos T3-S3, T3-S2-R4 e IMT 66.5.

El concepto de Tasa de Excedencia

Debido a que se pretenden comparar puentes con diferentes claros, la disparidad de las fuerzas de reacción horizontales provocadas por la significativa diferencia en las longitudes de los puentes estudiados, no resulta factible realizar una comparación directa de los valores de las reacciones inducidas por el efecto del frenado. Por lo tanto, en este trabajo se la evaluación de las reacciones causadas por frenado se evalúa realizando una adaptación del conceptual de la tasa de excedencia (TE), una metodología ampliamente usada en ingeniería sísmica (p.ej: Jaimes y García-Soto, 2024). La expresión general para evaluar la TE es:

$$\lambda(x) = P(Z > x) = \int_{z>x} f(z)\, dz = \int_{x}^{\infty} f(z)\, dz \qquad (1)$$

donde $\lambda(x)$ es la tasa de excedencia para un limite x, y $f(z)$ es la función de densidad de probabilidades de una variable aleatoria.

La integral definida en la ecuación (1) se realiza desde el límite x hasta el infinito, considerando únicamente los valores que superan el límite definido por x. Sin embargo, y dado que los resultados no pueden describirse por una función de densidad de probabilidades, se emplea una TE empírica definida como:

$$\lambda_{\text{emp}}(x) = \frac{N_x}{T} \quad (2)$$

donde $\lambda_{emp}(x)$ es la TE empírica para un límite x; N_x es el número de ocasiones donde los valores de frenado obtenido de los vehículos en los aforos WIM exceden el límite x, y T es el período de observación (días, meses o años).

Para este trabajo T se reemplaza por el número de vehículos de cada una de las bases de datos de las cuales se evalúa el efecto de frenado, mientras que el límite x lo define el criterio de frenado que define cada una de las normativas consideradas.

Metodología

Para realizar la evaluación de los efectos de frenado asociados a cada uno de los modelos de carga viva, como a los obtenidos de los aforos vehiculares, se realiza mediante una versión actualizada del software AMER 2.0 (2019). De esta forma, los modelos vehiculares T3-S3, T3-S2-R4, IMT 66.5 y HL-93 emplean el criterio definido por el AASHTO (2024) para la evaluación del frenado. Mientras que el modelo CL-625 emplea el criterio definido por el CAN/CSA (2014) resumido por la Figura 4.

Por otra parte, el frenado de los vehículos en las bases de datos se evalúa considerando que el 25% de las descargas gravitacionales, se aplican como cargas de frenado, en la dirección del movimiento, sobre la superficie de rodamiento.

Se evaluaron cuatro aforos *Weigh-In-Motion* (pesaje en movimiento) los cuales tres de ellos se realizaron en el año 2017 en el mes de enero y octubre, mientras que el otro se realizó entre los meses enero-marzo del año 2009, siendo éste el aforo con mayor registro de vehículos, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Aforos vehiculares que fueron analizados.

Aforo WIM	Mes	Número de vehículos registrados
Guanajuato - Silao 2017	Enero	127,207
Querétaro - Irapuato 2017	Octubre	86,632
Irapuato - La Piedad 2017	Enero	226,515
Irapuato - La Piedad 2009	Enero-Marzo	3’831,313

En la Tabla 2 se muestran los incrementos con los cuales se mueven las cargas a lo largo del puente, en ambos sentidos, tanto para el caso de los modelos de cargas vivas de reglamento, como para los realizados para los aforos vehiculares de año 2017.

Tabla 2 Incrementos de análisis en función de la longitud del puente para aforos realizados en 2017.

Longitud del Puente (m)	Incremento de Análisis (cm)
1, 2, 3, 4, 5	1
6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22	2
24, 26	3
28, 30	4
35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100	5

Mientras que en la Tabla 3 detalla los incrementos de análisis para la evaluación del aforo IP-2009, esta diferencia de incrementos con respecto a los aforos anteriores se debe a una optimización del análisis de más de tres millones de vehículos que los programas calcularon.

Tabla 3. Incrementos de análisis en función de la longitud del puente para el aforo realizado en 2009.

Longitud del Puente (m)	Incremento de Análisis (cm)
1, 2, 3, 4, 5	1
6, 7, 8, 9, 10	2
12	3
14, 16, 18, 20	4
22, 24, 26, 28	5
30	6
35	7
40	8
45	9
50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100	10

Una vez realizados los análisis, se identifican los casos de los vehículos que sobrepasan los valores de frenado estimado por cada uno de los modelos y se calcula la TE empleando la ec. (2), expresada en porcentaje, en un formato de espectro, es decir, mostrando las TE que se obtienen para cada claro de puente considerado y mostrándolo de forma gráfica, mediante un código de programación.

Resultados

En la Figura 8 se muestran los resultados de las TE obtenidas para el aforo Guanajuato-Silao 2017, los de la columna izquierda consideran presencia simultánea de vehículos (es decir, más de un vehículo puede estar al mismo tiempo en el puente), mientras que los de la columna derecha solamente consideran los vehículos analizados de manera individual. Por otra parte, el primer renglón considera todos los resultados obtenidos, mientras que el segundo renglón muestra los mismos resultados, pero enfocándose en puentes de claro corto y medio.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

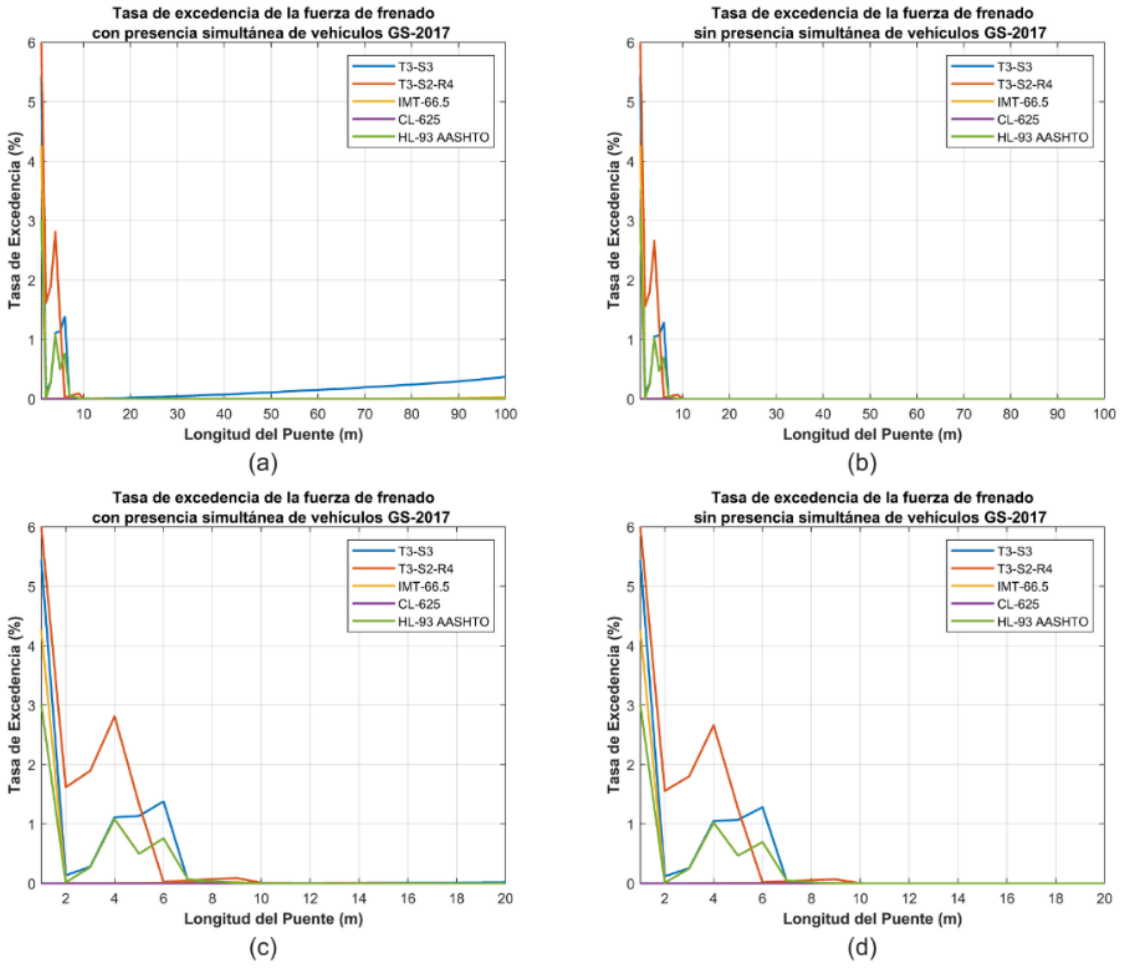


Figura 8. Tasa de excedencia de la fuerza de frenado del aforo vehicular Guanajuato-Silao 2017.

Cabe resaltar que los resultados que se muestran en la Figura 8 corresponden al aforo Guanajuato-Silao, el cual contiende los vehículos más ligeros (automóviles en su mayoría), y aún para el caso de claros cortos, las TE alcanzan valores considerables, es decir, aún con vehículos ligeros, un gran número de ocasiones, los valores de frenado que estiman los modelos reglamentarios son excedidos hasta el 6% de las veces. Por otra parte, para claros medianos o grandes los valores son nulos o muy pequeños. Es de notarse en la Figura 8a, como el efecto de la presencia simultánea de más de un vehículo sobre los puentes hace que las TE respecto al modelo T3-S3 empiecen a crecer conforme el claro aumenta, ya que la presencia de varios vehículos en el puente, hacen que las fuerzas que estima el modelo T3-S3 sea insuficiente para representar realmente lo que los vehículos reales inducen en los puentes por frenado.

En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos para el aforo Querétaro-Irapuato 2017, en el cual se tienen en promedio, los vehículos más pesados de todos los aforos considerados. Como puede notarse, ahora las TE tienen valores no nulos para todos los casos. En la Figura 9b se nota que para claros mayores a 30 m las TE tienden a mantenerse constantes. Este comportamiento es que idealmente se debería de obtener, ya que, sin importar la longitud del puente, la probabilidad de que las fuerzas de diseño sean excedidas, debería ser la misma, lo que es consistente con una TE constante. Sin embargo, para claros menores a 30 m, las TE no presentan valores constantes, alcanzando valores de hasta 16% y 8 % para puentes de 4 y 9 m de longitud para el modelo T3-S2-R4.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

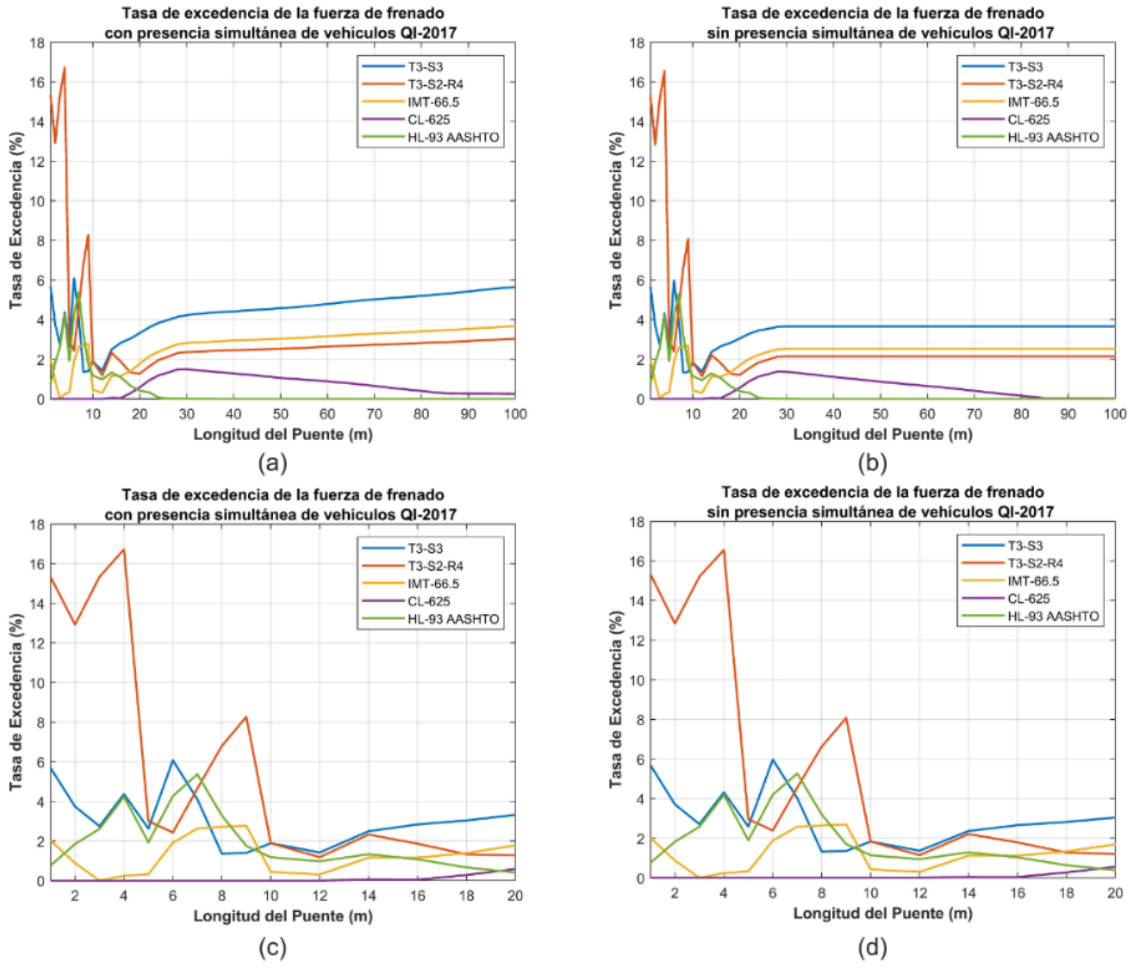


Figura 9. Tasa de excedencia de la fuerza de frenado del aforo vehicular Querétaro-Irapuato 2017.

Indistintamente de los valores de TE que se obtengan, lo realmente relevante es la gran variabilidad de valores que se tienen para claros cortos y medianos (< 30 m). Esta gran variabilidad indica que más que el peso bruto vehicular, todos los modelos de cargas vivas de los reglamentos tienen problemas para predecir adecuadamente las fuerzas de frenado cuando uno o dos ejes del vehículo cabe dentro del puente, y el vehículo es lo suficientemente largo para no caber completo. En otras palabras, los vehículos reales tienen descargas en uno o dos ejes muy grandes, aunque el peso total del vehículo no sea considerable. Así, la uniformidad de las descargas vehiculares de los modelos de los reglamentos puede ser un aspecto que no es representativo de las fuerzas que inducen los vehículos reales en los puentes.

Este mismo comportamiento, aunque con otros valores de TE pueden verse par el caso de los aforos Irapuato-La Piedad, lo cual se muestra en la Figura 10 y Figura 11.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

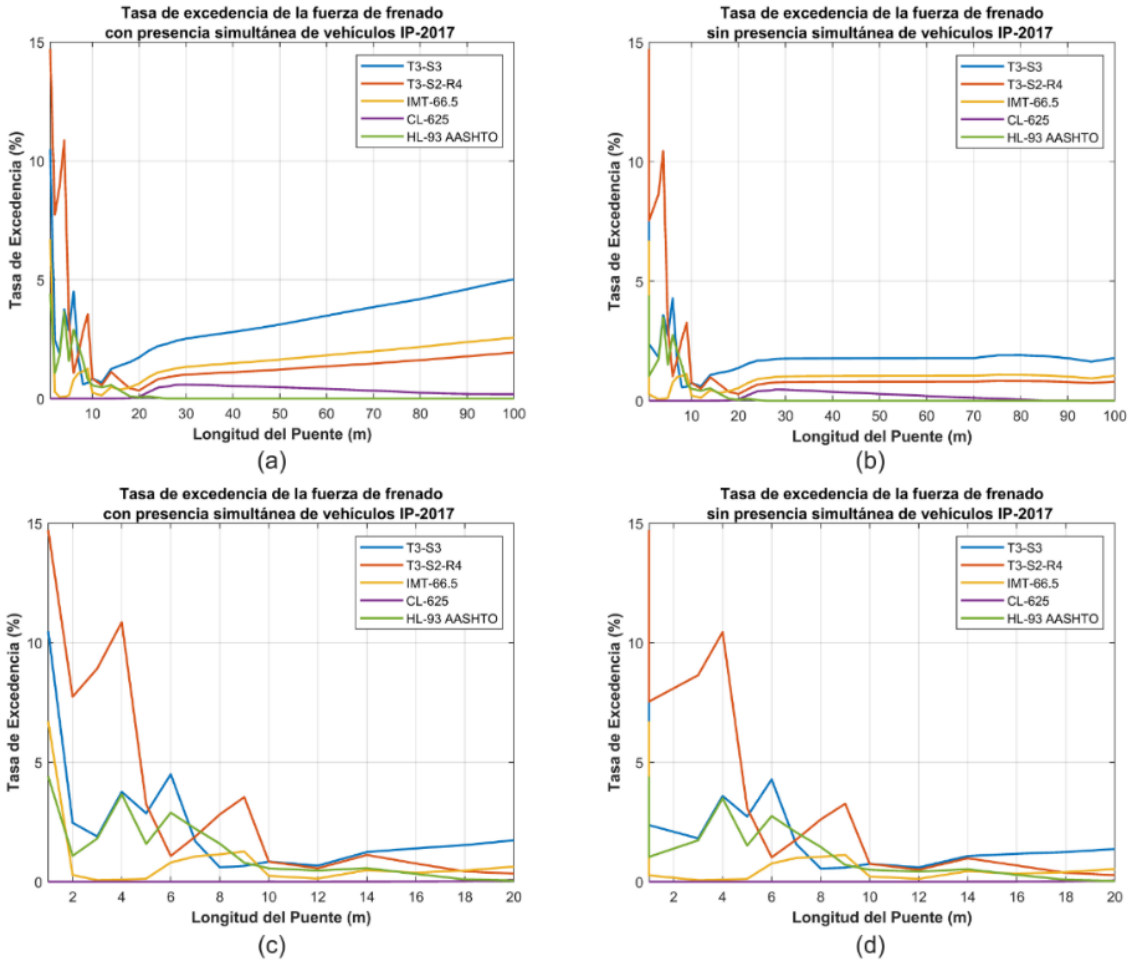


Figura 10. Tasa de excedencia de la fuerza de frenado del aforo vehicular Irapuato-La Piedad 2017.

Como en todos los aforos del 2017, el aforo IP-2009 (Figura 11) también indica que en los puentes con claros mayores el peor modelo vehicular resulta ser el T3-S3 a pesar de tener un peso bruto vehicular menor que el T3-S2-R4, esto revela que en modelos vehiculares con menores ejes puede presentar mayores descargas debido a la distribución del peso vehicular, esto sumado a que normalmente este tipo de vehículos transportan productos pesados como los camiones refrigerados que contienen líquidos.

En cambio, en los claros cortos el modelo vehicular que más presenta complicaciones es el T3-S2-R4 como se puede visualizar de mejor manera en las Figuras 11c y 11d, como se mencionó anteriormente, la longitud de estos camiones supera a los claros del puente que todo el peso vehicular se descarga en los ejes delanteros.

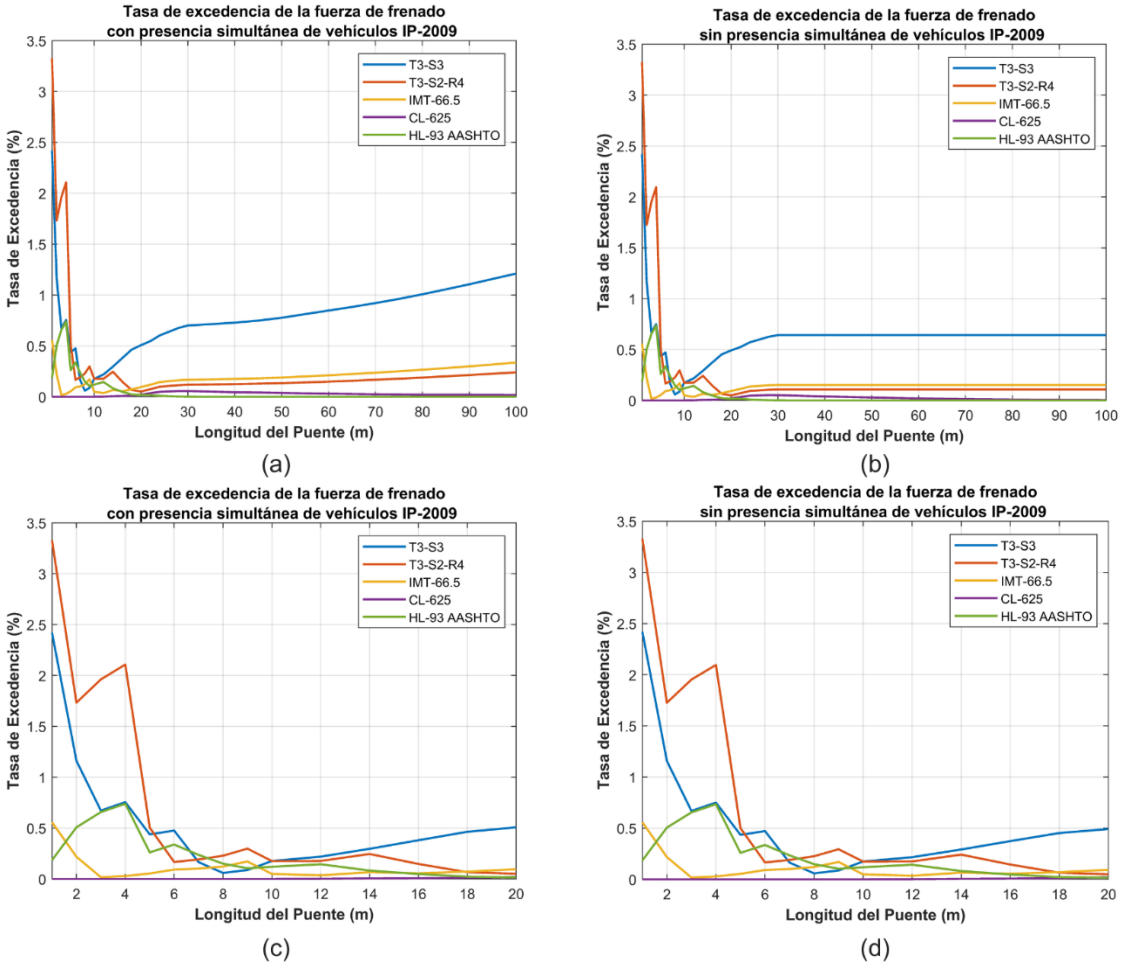


Figura 11. Tasa de excedencia de la fuerza de frenado del aforo vehicular Irapuato-La Piedad 2009.

Conclusiones y Recomendaciones

En los resultados se puede observar que para el aforo Querétaro-Irapuato 2017 se obtienen los mayores valores de TE de todos los aforos considerados, esto es debido a que al ser una autopista los vehículos más pesados la circulan con mayor frecuencia. Al contrario, la carretera Guanajuato-Los Infantes es una vialidad estatal por lo que registró los menores valores de la tasa de excedencia.

Los modelos vehiculares en todos los aforos mostraron un comportamiento similar obteniéndose los mayores valores de TE para puentes de claro corto, aunado a una alta variabilidad de dichos valores. Para el objetivo de este trabajo resulta necesario considerarlo puesto que en México los puentes se diseñan con la reglamentación AASHTO y la carga de los vehículos mexicanos muestra tener un comportamiento excedente en la magnitud de la fuerza de frenado.

Aunque la longitud mínima de un puente, para que sea considerado puente (según algunas de las reglamentaciones empleadas) sea de 6 metros, se adicionaron longitudes de hasta un metro para conocer la tendencia de las tasas excedentes. Se pueden notar que en los diferentes aforos presentaron los picos más altos en las longitudes de un metro y cuatro metros, esto se debe a que en uno o dos ejes se tienen grandes descargas, aunque no necesariamente esté asociado a un peso bruto vehicular grande.

Además, en las longitudes posteriores (entre 6 metros a 10 metros) se presentan grandes valores de TE, respecto a puentes de gran longitud, en todos los aforos. Es importante mencionar que, en número, la gran mayoría de los puentes en México corresponden a puentes de vigas de claros cortos (< 15 m), lo cual es de gran relevancia para los resultados obtenidos.

Por otra parte, el considerar la presencia simultánea de vehículos en un mismo carril, es relevante para casos de puentes de claros grandes (> 30 m) donde existe mayor posibilidad de que ingrese mas de un vehículo a la vez. Aunque el incremento de las TE es mucho más suave y paulatino en estos casos, si puede ser relevante para algunos puentes especiales. Caso especial es el modelo canadiense, con o sin la presencia simultánea, las TE tienen una tendencia descendente al crecer el claro, lo cual es contrario a lo que ocurre con los demás modelos.

Los resultados que se obtuvieron de los vehículos en el caso sin la presencia simultánea de vehículos en las longitudes más grandes describen el comportamiento ideal que deberían mostrar todos los modelos vehiculares al presentar una tasa de excedencia constante para todos aquellos casos. Sin embargo, en la realidad ocurre cotidianamente una simultaneidad de vehículos que circulan las vialidades en México, por lo que esa idealidad se rompe al presentar variaciones para todos los casos.

Los resultados permiten identificar que las TE de la fuerza de frenado no permanecen constantes conforme varía la longitud del puente. Asimismo, los modelos vehiculares de la normativa mexicana presentaron una tendencia a exceder la carga de diseño a medida que aumenta la longitud del puente y muestran una mayor variabilidad en las longitudes menores, donde se registraron los valores máximos de TE. Dado que este intervalo de longitudes es representativo de un número importante de puentes carreteros en México, estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de revisar el modelo de fuerza de frenado establecido en la normativa nacional.

En consecuencia, se recomienda profundizar en la evaluación de la fuerza de frenado considerada en la normativa mexicana para el diseño estructural de puentes carreteros, incorporando información representativa del tránsito vehicular real del país con el propósito de mejorar la representatividad de las cargas de diseño.

Referencias

AASHTO (2024). LRFD Bridge Design Especifications 10th ed. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C. EE. UU.

AMER 2.0 (2019). Análisis Matricial de Estructuras Reticulares (AMER versión 2.0). Alejandro Hernández Martínez. Repositorio Institucional de la Universidad de Guanajuato. http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/13639

CAN/CSA (2014). Canadian Highway Bridge Desing Code. Mississauga, Ontario, Canadá.

Hernández Martínez, A., Hernández Guillén, B. S., & Flores Ramírez, A. S. (2025). Análisis estadístico de aforos vehiculares en carreteras de México. *Jóvenes en la Ciencia*, 37, 1–15.

Instituto Mexicano del Transporte. (2005). Pesos y dimensiones vehiculares máximas. Boletín externo.

Mendoza Díaz, A., & García Morales, E. (2004). Efecto del peso y la velocidad de los vehículos pesados sobre la infraestructura carretera y la seguridad vial (Publicación Técnica No. 243). Instituto Mexicano del Transporte.

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes. (2025). N·PRY·CAR·6·01·003/25. Cargas y acciones. Instituto Mexicano del Transporte. Normativa para la Infraestructura del Transporte

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2017, 26 de diciembre). 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 de la Federación.