

Modelos de carga viva para el diseño y evaluación de puentes en Chile

Live load models for the design and evaluation of bridges in Chile

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del
artículo:

Recibido
14-11-2023
Aceptado
16-04-2024
Publicado
25-08-2024

Palabras Clave:
Puentes
Pesaje
Carga viva
Diseño
Mantenimiento
Conservación

Article history:

Received
14-11-2023
Accepted
16-04-2024
Available
25-08-2024

Keywords:
Bridges
Weighing
Live load
Design
Maintenance
Conservation

Victor Aguilar¹, Francisca Espinoza², Mariana Fuentes², Marcelo Márquez²

¹ Universidad San Sebastián, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Concepción, Chile, victor.aguilar@uss.cl

² Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, Santiago, Chile.

Resumen

Los puentes son críticos para el desarrollo de un territorio. Su vida útil es afectada por las cargas de tráfico a las que están expuestos. Para mantener la seguridad y capacidad de servicio es fundamental conocer las cargas reales a las que están sometidos. Los puentes en Chile se diseñan de acuerdo con el Manual de Carreteras, basado en las antiguas especificaciones de diseño de Estados Unidos y su patrón de carga vehicular propuesto en 1944. El patrón de carga en Estados Unidos se actualizó en 1993. Ambos patrones se propusieron en base a datos limitados; además, no se encuentra información sobre la adecuación de estos modelos para representar las cargas de tráfico nacionales. El pesaje de camiones se controla y registra rutinariamente en todo el país y esta información tiene muchos usos aún no explorados. Se presentó una propuesta de investigación a Fondecyt de Iniciación que fue aceptada para su ejecución entre 2023-2025. El objetivo de este estudio es proponer modelos probabilísticos de carga viva que describan la incertidumbre en los patrones de carga especificados para el diseño. La evaluación estadística se realizará comparando los efectos reales causados por el tráfico con los patrones de carga viva idealizados. Los resultados podrían contribuir a respaldar cambios en las especificaciones nacionales de diseño y evaluación de puentes, y podrían abrir investigaciones conducentes a puentes más seguros, más eficientes, y a preparar los puentes para las nuevas tendencias de transporte.

Abstract

Bridges are critical for the development of a territory. Their useful life is affected by the traffic loads to which they are exposed. To maintain safety and service capacity, it is essential to know the actual loads to which they are subjected. Bridges in Chile are designed according to the Highway Manual, based on the old U.S. design specifications and its vehicle load pattern proposed in 1944. The U.S. load pattern was updated in 1993. Both patterns were proposed based on limited data; furthermore, no information is available on the adequacy of these models to represent national traffic loads. Truck weighing is routinely monitored and recorded throughout the country and this information has many uses as yet unexplored. A research proposal was presented to Fondecyt de Iniciación and accepted for execution between 2023-2025. The objective of this study is to propose probabilistic live load models that describe the uncertainty in the load patterns specified for design. The statistical evaluation will be performed by comparing the actual effects caused by traffic with the idealized live load patterns. The results could contribute to support changes in national bridge design and evaluation specifications, and could open investigations leading to safer, more efficient bridges, and to prepare bridges for new transportation trends.

* Corresponding author at: Víctor Aguilar Vidal, Universidad San Sebastián, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Lientur 1457, Concepción, Chile. E-mail address: victor.aguilar@uss.cl

RIOC

journal homepage: <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/index>

Vol. 12, no. 02, pp. 1-9, Agosto 2024

1. Introducción.

Una parte importante de los daños en los puentes son causados por vehículos sobrecargados. La magnitud de las cargas de tráfico está asociada a los límites legales de carga, las reglas sobre cargas especiales y el control de vehículos ilegalmente sobrecargados (Babu, 2019; Ghosn et al., 2015; Nassif et al., 2015). Es necesario conocer las cargas reales sobre la infraestructura de transporte para mantener el servicio y la seguridad necesarios para el desarrollo socioeconómico del territorio y preparar la infraestructura para el futuro; asegurando la resistencia, la capacidad de servicio y la resiliencia de la red de caminos. En Chile se controla y monitorea el peso de los camiones que transitan, constantemente, a lo largo de prácticamente todo el territorio nacional, mediante estaciones de pesaje en movimiento (WIM, por sus siglas en inglés) de baja y media velocidad, fijas y móviles. Este monitoreo tiene principalmente fines de control de los pesos transitando en las rutas nacionales y multar a quienes evaden o se fugan de dicho control. El Ministerio de Obras Públicas (MOP) requiere estudiar en profundidad la información de pesaje disponible y sus posibles aplicaciones en diseño de puentes nuevos, evaluación de puentes existentes y estimación de daño en la infraestructura de transporte. En este contexto, se presentó una propuesta de investigación a los fondos de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile, Fondecyt de Iniciación, que fue aceptada para su ejecución en el período 2023-2025. El objetivo principal de este estudio es proponer modelos probabilísticos de carga viva aplicables para el diseño y evaluación de puentes en Chile, basados en datos de pesaje existentes levantados por el Departamento de Pesaje del MOP. Estos modelos son conocimiento fundamental sobre las cargas vivas vehiculares, que se necesitan para numerosas aplicaciones prácticas.

Por otra parte, el continuo crecimiento del tráfico vehicular, tanto en volumen como en peso, junto con la introducción de nuevas tecnologías de transporte que ya se piensan implementar en otros países, como caravanas de camiones y camiones eléctricos, representa un desafío para los puentes en todo el mundo. El estudio propone una evaluación de la carga viva en puentes de Chile a modo de poseer una línea base de comparación con futuras demandas de transporte que se puedan presentar.

Este artículo presenta en el capítulo 2 los antecedentes y bibliografía relevantes para realizar el estudio propuesto incluyendo conceptos como patrones de carga viva idealizados, modelos probabilísticos de carga, una descripción de las tecnologías de pesaje en movimiento y los desafíos futuros que impone la modernización del transporte en el mundo. En el

capítulo 3 se describe en detalle la metodología propuesta para alcanzar el objetivo del estudio, con subsecciones que describen el análisis de datos, el control de calidad de la información, y las consideraciones para evaluar la influencia de las caravanas de camiones y vehículos de carga eléctricos. El capítulo 4 presenta los resultados esperados a partir de este estudio y el capítulo 5 concluye con la importancia de realizar análisis de estas características.

1.1 Antecedentes y revisión bibliográfica

Las cargas aplicadas a un componente estructural provocan esfuerzos, deformaciones y desplazamientos que se conocen como efectos de carga. Los componentes básicos de carga en los puentes son carga muerta, carga muerta superimpuesta y carga viva. La carga muerta es el peso intrínseco de los componentes estructurales. Las cargas muertas superimpuesta son cargas no estructurales que se aplican permanentemente a una estructura (carpeta de rodado, barreras, y otros). Las cargas vivas son cargas transitorias de ocupación de la estructura, estas cargas son debidas al flujo de tráfico y se mueven a través de los componentes estructurales. La carga viva en puentes depende de los siguientes factores: el peso bruto total de los vehículos; la distribución del espaciamiento del peso por eje de los vehículos; el número de vehículos simultáneos en el puente; el tráfico medio diario anual de camiones (ADTT, por sus siglas en inglés); la configuración del propio puente (luz y espaciamiento entre vigas); y el efecto dinámico de la carga de tráfico, también conocido como carga de impacto (Nowak, 1999).

1.2 Patrón de carga viva idealizado y modelo probabilístico de carga viva

Hay dos conceptos relacionados con la carga viva en puentes que deben definirse: el patrón de carga viva y el modelo probabilístico de carga viva. Un patrón de carga viva es un conjunto de cargas que luce como la configuración de un camión, pero no es un camión común o real; en cambio, es un patrón de carga cuyos efectos representan las fuerzas internas producidas por el tráfico real (es decir, momentos flectores y fuerzas cortantes). La Figura 1 muestra dos ejemplos: HS20-44 y HL-93, tomados de los códigos de diseño de puentes de Estados Unidos (EE. UU.) (AASHTO, 2002, 2017). La especificación de diseño en Chile, el *Manual de Carreteras* (MOP, 2019), requiere el uso del patrón de carga viva HS20-44 más un 20% aplicado a la carga de camión (HS20-44+20%). Por otro lado, un modelo probabilístico de carga viva captura la incertidumbre en el patrón de carga viva; es decir, qué tan lejos de la realidad están los efectos del patrón de carga idealizado de los efectos producto del tráfico real. Un modelo probabilístico de carga viva se define mediante una distribución estadística y sus parámetros probabilísticos (Iatsko et al., 2020; Iatsko & Nowak, 2021; Nowak, 1993). Se podría argumentar que el patrón de carga viva de EE. UU. podría no ser representativo de los efectos de carga

producto del tráfico de vehículos en Chile, así como que los modelos probabilísticos de carga viva de EE. UU. y Chile son probablemente diferentes.

La Figura 2 muestra camiones que transitan en Chile. Se puede observar lo diferentes que pueden ser las cargas según la actividad económica predominante. Los camiones de combustible (Fig. 2f) recorren todo el territorio, al igual que por ejemplo los buses de pasajeros. Sin embargo, los camiones agrícolas (Fig. 2a), ganaderos (Fig. 2d), lecheros (Fig. 2c) y forestales (Fig. 2b) se observan principalmente en el centro y sur del país en zonas rurales. Por otro lado, los camiones hormigoneros (Fig. 2e) son más frecuentes cerca de las grandes áreas urbanas. Por lo tanto, se espera observar diferentes estadísticas de carga de tráfico para diferentes áreas geográfico-económicas. Además, eventualmente se presenta la necesidad de transportar elementos más grandes o pesados de lo habitual para ciertas actividades económicas o desarrollos de infraestructura. Por ejemplo, la industria minera (Fig. 2g, común en el norte y el extremo sur del país), proyectos de energía eólica (Fig. 2h, numerosos en el centro de Chile) y construcción de grandes estructuras. Además, industrias de crecimiento económico acelerado pueden requerir del uso frecuente de cargas mayores a las habituales (Fig. 2i).

de cinco ejes que eran más pesados que la carga viva especificada en el código AASHTO Standard, es decir, HS20-44. Por lo tanto, se impuso un aumento del 20 por ciento a la carga de camión en todo el país; así nace el factor MOP. Sin embargo, el peso del camión no es el único parámetro que considerar en los efectos de la carga viva. Más aún, conociendo que las actividades económicas a lo largo del país son significativamente diferentes; por lo tanto, los bienes transportados son también diferentes, las cargas debido al tráfico también podrían mostrar diferencias importantes. El aumento del 20 por ciento en la carga de camión HS20-44 carece de documentación técnica y no parece adecuado que la carga viva, de diseño y para evaluación de puentes existentes, sea la misma en todo el país.

En la misma época, algunos estados en EE. UU. utilizaban un aumento en la carga viva para tener en cuenta su tráfico local, en particular, para tener en cuenta los camiones con carga especial que requieren de un permiso para circular. Se requiere de un permiso especial para transitar cuando existe sobrepeso, sobredimensión (o ambos) o tienen una distribución de ejes perjudicial.

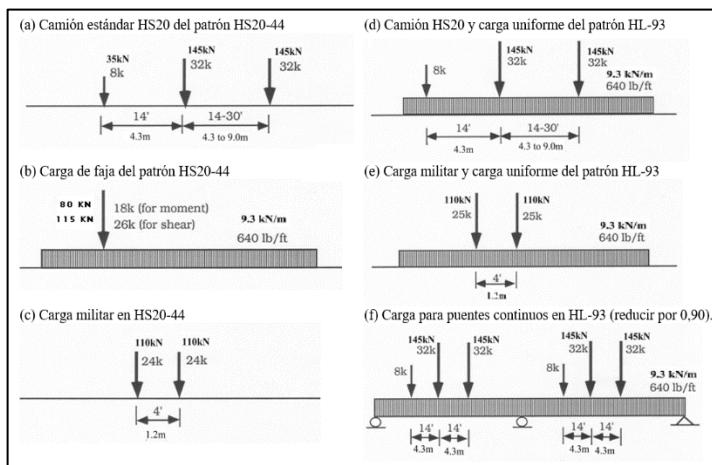


Figura 1. Patrones de carga viva provenientes de EE. UU: HS20-44 (a-c) y HL-93 (d-f)

1.3 Contexto chileno

En Chile, los puentes son diseñados de acuerdo con el *Manual de Carreteras* (MOP, 2019), el cual está basado en las antiguas especificaciones de diseño de puentes de EE. UU, conocida como AASHTO Standard (AASHTO, 2002); sin embargo, existe una transición hacia el uso de la norma AASHTO LRFD (AASHTO, 2017); por ejemplo, actualmente para los puentes concesionados se utiliza AASHTO LRFD.

En la década de 1980, comenzaron a circular en Chile camiones



Figura 2. Ejemplos de camiones circulando en rutas nacionales.

Las especificaciones de diseño de puentes en EE. UU. se actualizaron considerablemente en 1994 (AASHTO, 1994). Los factores de carga y resistencia para las combinaciones de carga de diseño se calibraron en base a análisis de confiabilidad estructural (Nowak, 1999). Los índices de confiabilidad (medida de seguridad) inherentes de puentes diseñados de acuerdo con las especificaciones anteriores a 1994 variaban desde 2.0 hasta 4.5 con la luz de los puentes. El problema de este margen de seguridad no uniforme se abordó mediante un nuevo patrón de carga viva, definido como HL-93. Este nuevo patrón de carga se basa en datos de encuestas de tráfico recopilados por el Ministerio de Transporte de Ontario en 1975. En esta encuesta,

se detuvo y pesó a 9250 camiones pesados seleccionados (aproximadamente cada décimo camión en el flujo de tráfico). También se midieron las configuraciones de peso del eje para cada camión. Luego, se extrapolaron linealmente los efectos de carga para 75 años, asumiendo una vida útil de diseño de 75 años para un puente (Nowak, 1993, 1999). Más tarde, otros trabajos han mostrado que HL-93 proporciona una mejor representación de los efectos del flujo de tráfico y conduce a niveles más uniformes de seguridad para puentes de distintas luces. Con la introducción de este nuevo modelo de carga viva, los estados ya no utilizan un aumento local en la carga viva. Las cargas especiales se analizan por separado en una combinación de carga especial.

La pregunta que origina esta propuesta es si los modelos de carga viva: HS20-44, HS20-44+20% o HL-93 son representativos de la carga viva de los puentes chilenos y cuál sería un modelo probabilístico de carga viva apropiado para capturar la incertidumbre.

1.4 Pesaje en movimiento y estaciones de pesaje

La importancia de la red vial y la necesidad de una conectividad eficiente han llevado al desarrollo de varias tecnologías de monitoreo de carga. Según su velocidad de operación, hay dos grupos de sensores de pesaje en movimiento: Los dispositivos WIM de baja velocidad, que funcionan entre velocidades entre 5-10 km/h y son altamente precisos; y, los WIM de alta velocidad, que pueden recopilar datos sin necesidad de reducir la velocidad o detener los camiones, con una precisión típica de 10 al 15 por ciento. Hay dos grupos de sensores WIM según su lugar de instalación: Los sensores WIM de pavimento que van incrustados en la superficie del pavimento; y, los sensores BWIM están ubicados debajo de un puente, que son portátiles y pasan desapercibidos para los conductores. Las tecnologías WIM y BWIM de alta velocidad proporcionan varias ventajas en cuanto a seguridad vial, disponibilidad de datos, ayuda a la economía local con un transporte de mercancías más rápido y conducen a un ahorro en tiempo y combustible.

La Dirección de Vialidad, desde hace más de 40 años, ha impulsado la aplicación de sistemas para controlar el peso de los vehículos de carga y pasajeros que circulan por la red vial nacional. El objetivo es preservar la ingente inversión que hace el país para asegurar la transitabilidad por sus caminos. La red de pesaje actualmente está conformada por 23 estaciones de pesaje fijas y 85 puntos de pesaje móvil, a nivel nacional. En estas estaciones se utilizan varias tecnologías de pesaje en movimiento de velocidad media y baja. Adicionalmente, existen proyectos piloto donde se utilizan sistemas WIM de alta velocidad.

La información técnico-estadística que se obtiene en los

controles de peso es fundamental para el diseño de proyectos de construcción y conservación de los caminos. Actualmente, la Dirección de Vialidad, a través del Departamento de Pesaje, que depende de la Subdirección de Mantenimiento, realiza las siguientes funciones: Planificar y desarrollar acciones para controlar los pesos por ejes, conjunto de ejes y peso bruto total de los vehículos de carga y de pasajeros, de acuerdo con las normas legales y reglamentarias establecidas sobre la materia; proponer normas de carácter técnico y administrativo en el área de pesaje; coordinar, supervisar y fiscalizar las actividades de pesaje a nivel nacional; autorizar la circulación de los vehículos con cargas indivisibles, que excedan los pesos y/o dimensiones máximas establecidas; determinar pesos de vehículos patrones y calibrar o contrastar precisiones de básculas; proponer informes y estadísticas de estratigrafías de peso; Ejecutar trabajos de mantención y conservación de las plazas de pesaje; y, aprobar el emplazamiento y fiscalizar el funcionamiento de los sistemas de pesaje en las empresas generadoras de carga.

1.5 Desafíos para la ingeniería de puentes

Es notorio cómo el tráfico vehicular crece constantemente en volumen y peso (Federal Highway Administration, 2022). Además, el acelerado desarrollo de los vehículos autónomos ha abierto la posibilidad de las caravanas de camiones (truck platooning). El truck platooning es un sistema de transporte futurista que actualmente está siendo explorado por varias agencias de transporte (Bergenhem et al., 2012; Tsugawa, 2013; Tsugawa et al., 2011, 2016). Esta tecnología consiste en enlazar dos o más camiones en una caravana. Estos vehículos mantienen automáticamente una distancia cercana establecida entre sí, necesitando solo un conductor en el vehículo líder. Se ha propuesto que los convoyes con tres o más camiones por convoy sea lo habitual en el año 2025 (Sayed et al., 2020). Los puentes de todo el mundo no fueron diseñados para este tipo de carga y actualmente hay una falta de trabajos publicados que investiguen los efectos de los convoyes de camiones en la integridad de la superestructura y la subestructura de los puentes (Couto Braguim et al., 2020; Pillay Thulaseedharan, 2020; Sayed et al., 2020). Otra tecnología que podría afectar la infraestructura de transporte son los camiones eléctricos. Presumiblemente, debido al peso de las baterías necesarias para estos vehículos, el peso vacío del camión sería mayor que el de los camiones vacíos tradicionales. Ambos efectos, el acoplamiento en caravanas y el aumento del peso de los camiones vacíos, podrían tener un gran efecto en la carga viva a la que están sujetos los puentes.

2. Metodología

Para obtener una muestra representativa del flujo de tráfico en Chile, se recopilarán datos de pesaje de camiones, como peso bruto total de los vehículos, peso por eje y espaciamiento entre

ejes, de varias estaciones en el país para caracterizar cuatro zonas: (1) el norte, donde la minería y sus subproductos impulsan las necesidades de transporte; (2) cerca de Santiago, la capital y la mayor área urbana de Chile; (3) entre el Gran Concepción y la Araucanía, centro del país, zona altamente industrializada y de importante actividad forestal; (4) y en el sur del país con una economía basada en las industrias agrícola y acuícola. Estas estaciones permitirán estudiar las diferencias en las cargas de tráfico en el país. Se realizarán visitas en cada estación de pesaje para tener una caracterización visual del tráfico. También se recopilará una lista exhaustiva de permisos emitidos por el Departamento de Pesaje. Esta información se complementará con los datos públicos proporcionados por el Departamento de Estadísticas y Encuesta de Tráfico.

La técnica de análisis de datos, los controles de calidad de los datos y el desarrollo de modelos probabilísticos de carga viva se describen en las secciones 2.1 a 2.3. Se compararán los modelos obtenidos con los datos de EE. UU. y entre diferentes macrorregiones dentro de Chile. Una vez que se generen los modelos de carga viva probabilísticos, se realizará un análisis de confiabilidad exploratorio. El marco teórico del análisis de confiabilidad se describe en la sección 2.4.

Se identificarán las clases y cargas de camiones más comunes. Se crearán escenarios de formación de caravanas de camiones en función de esos camiones. Por lo tanto, se evaluará el efecto de la formación de caravanas de camiones en los puentes. También se utilizará la consideración teórica de aumentar el peso del camión vacío como resultado de los camiones eléctricos para cuantificar el efecto en la carga viva y la vida útil de los puentes. Una descripción de las consideraciones se presenta en la sección 2.5.

A medida que se completen las tareas del proyecto, se llevarán a cabo reuniones para describir el progreso del proyecto al personal de la Dirección de Vialidad del MOP y recibir sus comentarios.

2.1. Análisis de datos

Se creará una base de datos de pesos de camiones a partir de los datos recopilados. Una mala calidad de los datos de tráfico puede llevar a una interpretación errónea y una estimación incorrecta de los efectos de carga. Por lo tanto, se aplicará un procedimiento de control de calidad de datos como se describe en la sección 3.2. La base de datos consolidada limpia se utilizará luego para evaluar el efecto real de la carga del tráfico, y se comparará con los valores de diseño nominal especificados en el manual de diseño de puentes chileno y la especificación de diseño de puentes de EE. UU. Se proporciona una descripción de este análisis en la sección 3.3. Finalmente, se considerarán las perspectivas futuras de la carga viva en los puentes, como se indica en la sección 3.5.

2.2. Control de calidad de datos

La necesidad de una calidad adecuada de los datos de tráfico en el diseño de puentes ha sido estudiada extensamente en el informe NCHRP 683 (Sivakumar et al., 2011). Se producen dos tipos de errores en la recopilación de datos de WIM a largo plazo: errores aleatorios (que ocurren individualmente) y errores sistemáticos (que ocurren con frecuencia y afectan a algunos registros). Los errores suelen estar asociados con el mal funcionamiento del sistema WIM, la falta de registro, la configuración no típica de vehículos o la posición del vehículo en el sensor. Por lo tanto, se aplicarán controles de calidad de datos para garantizar que la información disponible sea confiable. Teniendo en cuenta el trabajo realizado por Babu (2019), el procedimiento de control de calidad consiste en tres conjuntos de controles: de integridad, lógicos y estadísticos. El control de integridad se utiliza para identificar datos faltantes en la base de datos. Los controles lógicos se utilizan para eliminar registros que contienen errores obvios, como pero no limitado a filas vacías, vehículos de peso cero y vehículos de peso no realista. Finalmente, se aplican controles estadísticos para identificar anomalías en los patrones de tráfico. Estos controles se aplican a los datos acumulados mensualmente para detectar posibles mal funcionamientos y sus causas, como fallos de comunicación, problemas operativos con el sensor y desviaciones en la calibración de los sistemas.

2.3. Efectos de carga viva y enfoques de extrapolación máxima

Una vez consolidada la base de datos, la evaluación estadística de la carga viva se realizará en función del peso bruto del vehículo (GVW, por sus siglas en inglés), el momento flector y la fuerza cortante. El momento flector y las fuerzas cortantes de la carga viva se calcularán ejecutando el peso del eje y la configuración de espaciamiento de cada registro en la base de datos sobre una línea de influencia para puentes simplemente apoyados de distintas luces. El momento y la fuerza se informarán como una relación con un patrón de carga viva particular (es decir, HS20-44, HS20-44+20% y HL-93). Las curvas de probabilidad normal se utilizarán comúnmente en todo el proyecto para la interpretación de los resultados. Las curvas de probabilidad normal utilizan una escala especial para la presentación de la función de distribución acumulativa (CDF, por sus siglas en inglés). Se construye en función de la CDF normal estándar (Benjamin & Cornell, 2014; Nowak & Collins, 2013). Las CDF de las relaciones de momento flector y fuerzas cortantes de la carga viva para diversas ubicaciones (EE. UU., Ontario, Europa) se muestran en la Figura 3. Para cada valor en el eje x, el valor correspondiente en el eje y representa la probabilidad de que este valor no se supere. Por ejemplo, para el Estado de Maine en puentes cortos, hay un cinco por ciento de probabilidad de que el momento flector y la fuerza cortante causados por la carga viva de diseño HL-93 sean superados por el tráfico real.

Para evaluar la confiabilidad de los puentes, se necesita la carga viva máxima que el puente podría experimentar durante todo el período de servicio. Esta es una parte importante del desarrollo de un modelo de carga viva probabilístico. Sin embargo, no hay acuerdo respecto a un modelo determinístico o probabilístico preciso para estimar dicho valor extremo (Babu et al., 2019). Además, son necesarias numerosas suposiciones relacionadas con las estadísticas de presencia múltiple del camión. En estudios anteriores (Kulicki et al., 2015; Nowak, 1994; Nowak & Hong, 1991; Nowak & Lind, 1979), se concluyó que la cola superior de la CDF del efecto de carga por momento flector se aproxima a la distribución gaussiana con el aumento del número de registros. Por lo tanto, la cola superior de la CDF se puede extrapolar con un modelo de regresión lineal (Iatsko, 2018). Las estadísticas para los efectos de carga se pueden hallar para un determinado período de retorno (por ejemplo, 1 día, 1 año, 5 años, 75 años y 100 años). El efecto de carga viva máximo esperado depende principalmente del período de tiempo en días (T), el tráfico promedio diario de camiones (ADTT) y la distribución acumulativa específica del sitio para el efecto de carga considerado (Babu et al., 2019). Por lo tanto, para cada CDF (cada efecto de carga y cada ubicación), se puede determinar la posición del efecto máximo de la carga en el eje de desviación estándar (Z_{max}) por la coordenada vertical (eje de probabilidad) dependiendo del ADTT seleccionado como:

$$Z_{max} = \Phi^{-1}(1/N)$$

(Ecuación 1)

Donde Φ^{-1} es la función de distribución normal estándar inversa, N es el número de registros para el período T (en días) y cierto ADTT, por lo tanto, $N = (T)(ADTT)$. Cuando no hay suficientes registros recopilados en una ubicación para alcanzar una ordenada que corresponda al valor de Z_{max} dentro de la vida útil de un puente, se aplica una extrapolación lineal a la cola superior de cada curva CDF.

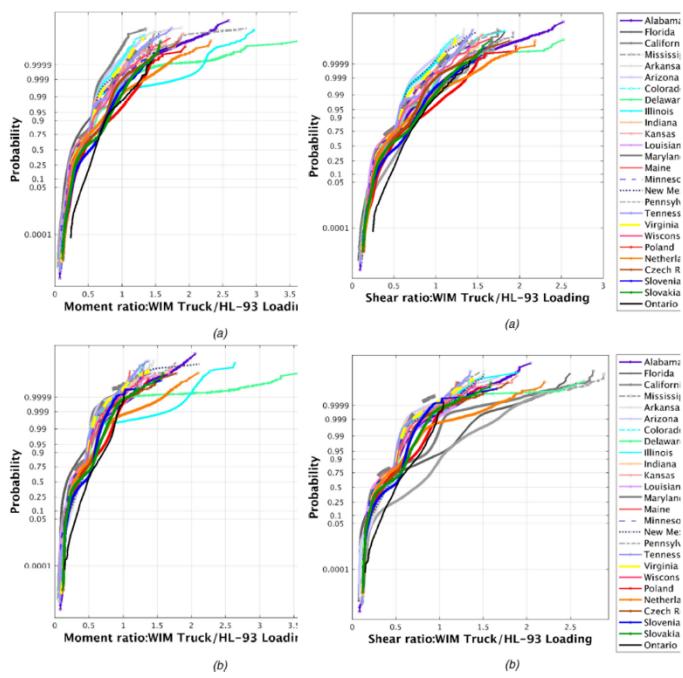


Figura 3. CDFs para razón de momento y corte en EE. UU., Europa, y Ontario (Canadá): (a) para puentes de 9 m, y (b) para puentes de 61 m (Adaptada de Babu et al., 2019).

2.4. Confiabilidad estructural y gestión de la seguridad

El margen de seguridad de un componente de un puente es la diferencia entre el efecto de las cargas y la resistencia asociada. La falla ocurre cuando el efecto de las cargas excede la resistencia. Las cargas que actúan sobre un puente no pueden predecirse con precisión; son aleatorias en la naturaleza y varían con el tiempo. Similarmente, la resistencia depende de las propiedades del material y las dimensiones, que tampoco pueden predecirse con certeza absoluta. Así, tanto cargas y resistencia son variables aleatorias; por lo tanto, el margen de seguridad también es una variable aleatoria. La probabilidad de falla, P_f , es la probabilidad de que la carga exceda la resistencia (Nowak & Collins, 2013). Es común referirse a la confiabilidad de los componentes estructurales en términos de su índice de confiabilidad (β), que se define como indica la Ecuación 2.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$$

(Ecuación 2)

En base a este marco probabilista, en los años 60, se desarrolló una metodología de factores parciales de seguridad (factores individuales para cada componente de carga y tipo de resistencia) para la industria del hormigón. Este enfoque de diseño incluye factores de carga que amplifican cada componente de carga (muerta, viva, viento, nieve, terremoto, etc.), teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas con ellas

y el factor de resistencia que tiene en cuenta las incertidumbres asociadas con la resistencia. Este formato o metodología de diseño se llama Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD). Los factores de carga y resistencia en la nueva generación de códigos de diseño se han calibrado en base a este enfoque probabilístico con el objetivo de garantizar una reserva de seguridad adecuada. Las últimas ediciones de los códigos principales de diseño y construcción siguen la filosofía LRFD, por ejemplo, estructuras de acero AISC-2016 (AISC, 2016), edificios de concreto ACI 318-19 (ACI Committee 318, 2019), edificios de mampostería TMS 402-2013 (TMS 402/602-16, 2016), construcción de madera NDS-2018 (NDS, 2018), y puentes carreteros AASHTO LRFD (AASHTO, 2017).

El desarrollo del procedimiento de factores de carga específicos del sitio mediante protocolos para recopilar y usar datos de tráfico en el diseño de puentes está disponible en el informe NCHRP 683 (Ghosn et al., 2013; Sivakumar et al., 2011).

2.5. Evaluación de las demandas de tráfico futuro en los puentes chilenos

La evaluación de los efectos del flujo de tráfico futuro se considerará de manera teórica respaldada por la base de datos recopilada. Se calculará el efecto de carga de los siguientes camiones concebidos teóricamente y se comparará con las cargas de diseño de los tres patrones de carga viva de interés, es decir, HS20-44, HS20-44+20% y HL-93: (1) cargas especiales frecuentes, (2) camiones eléctricos y (3) caravana de camiones. Además, se llevará a cabo un análisis de vida útil del puente para los mismos tres escenarios siguiendo la metodología presentada en Iatsko et al. (2020).

3. Análisis de resultados

El principal resultado de este proyecto son los modelos probabilísticos de carga viva aplicables para el diseño y evaluación de puentes en Chile. Un resultado secundario de esta propuesta es promover la modernización de los dispositivos de monitoreo de carga de tráfico en todo el país.

Se pueden explorar las diferencias entre las regiones geográficas de Chile en función de los datos recopilados. Es muy probable que se requieran recomendaciones diferentes para el diseño y evaluación de puentes según zona. Se espera poder identificar los camiones más frecuentes por cada macrorregión definida y definir el patrón de carga más adecuado para diseño de puentes en el país. Este patrón podría ser el actual HS20-44+20% definido en el Manual de Carreteras, o patrón HL-93 de AASHTO LRFD, con modificaciones según macrorregión. Similarmente, se podrán recomendar patrones de carga asociados a camiones frecuentes (por ejemplo, vehículos de emergencia y utilitarios) necesarios para evaluación de puentes existentes y decidir sobre restricciones de carga en puentes con alguna deficiencia.

A partir de este proyecto también se podrá evaluar cuál será el efecto de las tendencias de tráfico futuras, como las caravanas de camiones y los camiones eléctricos, en la carga viva en puentes. Este proyecto podría abrir varias líneas de investigación. Por ejemplo, se podrían desarrollar modelos estadísticos de carga viva específicos para sitios de interés. Los datos podrían utilizarse para desarrollar modelos de carga viva para determinar la confiabilidad de los puentes existentes, estudiar el efecto de los vehículos con carga especial en la infraestructura nacional y un modelo de carga viva específico para el análisis de fatiga. Los resultados de este proyecto podrían respaldar cambios en las especificaciones nacionales de diseño y evaluación de puentes. Estas actualizaciones deberían hacer que los puentes sean más eficientes en cuanto a la economía y la seguridad. Además, estos resultados serían de interés para revisar las suposiciones en los diseños de pavimentos.

Adicionalmente, estos análisis pueden contribuir a definir una estructura de costos para los permisos para cargas especiales y para multas asociadas a evasión y fuga de los puntos de control de peso. La idea de este tipo de análisis es lograr que los fondos que ingresan por estos conceptos sean suficientes para realizar conservación y reposición de la infraestructura de transporte que se daña como resultado de las cargas con sobrepeso.

Finalmente, los procedimientos utilizados estarán disponibles para futuras revisiones de carga viva en puentes para estar preparados para la rápida evolución en las tecnologías de transporte.

4. Conclusiones

El proyecto descrito tiene como objetivo desarrollar modelos probabilísticos de carga viva aplicables al diseño de puentes nuevos y evaluación de puentes existentes en Chile, utilizando datos recopilados a partir de dispositivos de monitoreo de carga de tráfico. Los resultados esperados incluyen la identificación de patrones de carga adecuados para el diseño de puentes en diferentes macrorregiones del país, así como la evaluación del efecto de las tendencias de tráfico futuras en la carga viva y la vida útil de los puentes. Recomendaciones para evaluación de puentes existentes también son esperables como resultado de este estudio.

Áreas potenciales para futuras investigaciones podrían ser desarrollar modelos de carga viva para determinar la confiabilidad de los puentes existentes, así como modelos específicos para el análisis de fatiga en puentes. Además, los procedimientos utilizados en este proyecto estarán disponibles

para futuras revisiones de carga viva en puentes, lo que permitirá estar preparados para la rápida evolución en las tecnologías de transporte y sus nuevas demandas.

Este proyecto tiene el potencial de tener un impacto positivo en la infraestructura de transporte de Chile. Los modelos probabilísticos desarrollados en este proyecto podrían respaldar cambios en las especificaciones nacionales de diseño y evaluación de puentes y lograr puentes más eficientes en términos de economía y seguridad. La identificación de cargas especiales frecuentes, y las características de vehículos que se fugan de los puntos de control de peso, podría contribuir a definir una estructura de costos para los permisos de cargas especiales y para las multas asociadas a la evasión y fuga.

5. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo mediante el proyecto, Fondecyt de Iniciación 11230092. Los autores agradecen también a la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas por su apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

6. Referencias

- AASHTO. (1994). *LRFD Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway Transportation Officials.
- AASHTO. (2002). *Standard Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2017). *LRFD Bridge Design Specifications* (8th ed.). American Association of State Highway Transportation Officials.
- ACI Committee 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)*. American Concrete Institute.
- AISC. (2016). *ANSI/AISC 360-16. Specification for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction.
- Babu, A. R. (2019). *Quantifying the Fatigue Damage Accumulation in Bridges*.
- Babu, A. R., Iatsko, O., & Nowak, A. S. (2019). Comparison of Bridge Live Loads in US and Europe. *Structural Engineering International*, 29(1), 84–93. <https://doi.org/10.1080/10168664.2018.1541334>
- Benjamin, J. R., & Cornell, C. A. (2014). *Probability, statistics, and decision for civil engineers*. Courier Corporation.

- Bergenhem, C., Shladover, S., Coelingh, E., Englund, C., & Tsugawa, S. (2012). Overview of platooning systems. *Proceedings of the 19th ITS World Congress, Oct 22-26, Vienna, Austria* (2012).
- Couto Braguim, T., Lou, P., & Nassif, H. (2020). Truck Platooning to Minimize Load-Induced Fatigue in Steel Girder Bridges. *Transportation Research Record*, 0361198120973657.
- Federal Highway Administration. (2022, May 31). *Truck Size and Weight Study—Executive Summary*. <https://www.fhwa.dot.gov/reports/tswstudy/EXECSUM4.htm>
- Ghosn, M., Fiorillo, G., Gayovyy, V., Getso, T., Ahmed, S., & Parker, N. (2015). *Effects of overweight vehicles on NYSDOT infrastructure*. University Transportation Research Center.
- Ghosn, M., Sivakumar, B., & Miao, F. (2013). Development of state-specific load and resistance factor rating method. *Journal of Bridge Engineering*, 18(5), Article 5.
- Iatsko, O. (2018). *WIM-Based Live Load Model for Bridges*.
- Iatsko, O., Babu, A. R., Stallings, J. M., & Nowak, A. S. (2020). Weigh-in-Motion-Based Fatigue Damage Assessment. *Transportation Research Record*, 2674(8), 710–719.
- Iatsko, O., & Nowak, A. S. (2021). Revisited Live Load for Simple-Span Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 26(1), Article 1.
- Kulicki, J. M., Wassef, W. G., Nowak, A., Mertz, D., Samtani, N. C., & Nassif, H. (2015). *Bridges for Service Life Beyond 100 Years: Service Limit State Design (SHRP 2 Project R19B)*. Washington, DC: National Academy of Sciences.
- Ministerio de Obras Publicas. (2019). *Manual de Carreteras*. MOP.
- Nassif, H., Ozbay, K., Wang, H., Noland, R., Lou, P., Demiroluk, S., Su, D., Na, C., Zhao, J., & Beltran, M. (2015). *Impact of freight on highway infrastructure in New Jersey*.
- NDS. (2018). *National Design Specification for Wood Construction*. American Wood Council.
- Nowak, A. S. (1993). Live load model for highway bridges. *Structural Safety*, 13(1–2), 53–66.
- Nowak, A. S. (1994). Load model for bridge design code. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21(1), 36–49.
- Nowak, A. S. (1999). *NCHRP report 368: Calibration of LRFD bridge design code* (Issue 368). Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program.
- Nowak, A. S., & Collins, K. R. (2013). *Reliability of Structures* (Second). CRC Press.
- Nowak, A. S., & Hong, Y.-K. (1991). Bridge live-load models. *Journal of Structural Engineering*, 117(9), 2757–2767.
- Nowak, A. S., & Lind, N. C. (1979). Practical code calibration procedures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 6(1), 112–119.
- Pillay Thulaseedharan, N. (2020). *Impact of Truck Platooning on Texas Bridges* [PhD Thesis].
- Sayed, S. M., Sunna, H. N., & Moore, P. R. (2020). Truck platooning impact on bridge preservation. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(3), Article 3.
- Sivakumar, B., Ghosn, M., & Moses, F. (2011). *NCHRP 683: Protocols for collecting and using traffic data in bridge design*. Transportation Research Board.
- TMS 402/602-16. (2016). *Building Code Requirements and Specifications for Masonry Structures*. The Masonry Society.
- Tsugawa, S. (2013). An overview on an automated truck platoon within the energy ITS project. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(21), Article 21.
- Tsugawa, S., Jeschke, S., & Shladover, S. E. (2016). A review of truck platooning projects for energy savings. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 1(1), Article 1.
- Tsugawa, S., Kato, S., & Aoki, K. (2011). An automated truck platoon for energy saving. *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4109–4114.
- Unión, A. (2009). Estudio comparativo del camión de diseño HL-93 de la Norma LRFD v/s camión Bitren y cargas especiales frecuentes. Departamento de Proyectos de Estructuras de la División de Ingeniería de la Dirección de Vialidad.