

Tipo de artículo: Artículo original

Simulación computacional en la obtención del modelo de carga vertical móvil para el momento flector empleando como prototipo el puente de Mejía

Computational simulation in obtaining the mobile vertical load model for the bending moment using the Mejía bridge as a prototype

Luis Antonio Zambrano Beltrón^{1*} , <https://orcid.org/0000-0002-1986-630>

Jonathan Julián Vega Sabando² , <https://orcid.org/0000-0003-2670-6266>

Carlos Gustavo Villacreses Viteri³ , <https://orcid.org/0000-0001-8276-1783>

¹ Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas -Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador. Correo electrónico: lzambrano8596@utm.edu.ec

² Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas -Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador. Correo electrónico: jvega9720@utm.edu.ec

³ Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador Diplomado Superior en Diseño de Proyectos, Ingeniero Civil, Abogado de los Juzgados y Tribunales de la Republica, Licenciado en Ciencias Políticas y Sociales, Docente de la Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador. Correo electrónico: carlos.villacreses@utm.edu.ec

* Autor para correspondencia: lzambrano8596@utm.edu.ec

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo realizar una simulación computacional para la obtención de modelos de carga vertical móvil, útiles en la determinación de solicitaciones de momento flector en puentes de carreteras. Para ello, se escogió como prototipo el puente del sitio Mejía en la carretera Portoviejo-Crucita y se tomaron en cuenta los resultados de un monitoreo del tráfico real en dicho enlace vial, siguiendo el método indirecto modificado. Este monitoreo aportó datos relativos a las peculiaridades de circulación vehicular, tales como la frecuencia de circulación de los vehículos por tipos, así como su condición de carga. A partir de un análisis estático lineal, se determinaron los momentos flectores generados por una muestra no aleatoria del tráfico real y se extrapolaron, estas solicitaciones, para un periodo de 75 años. Con los resultados de los efectos extrapolados y fijando configuraciones geométricas propuestas por el autor o similares a las establecidas por la norma ASHTTO, se obtuvieron modelos de carga viva compuestos por cargas concentradas y la combinación de cargas distribuidas y concentradas.

Palabras clave: Simulación computacional; modelo de carga vertical móvil; puente de Mejía.

Abstract

The main goal of this research is to carry out a computational simulation in order to get mobile vertical load models, useful in determining bending moment requests in highway bridges. For this purpose, the bridge of the Mejía site on the Portoviejo-Crucita highway was chosen as a prototype and the results of real traffic monitoring following the modified indirect method on that highway was taken into account. This monitoring provided data related to the peculiarities of vehicular circulation, such as the frequency of vehicles by type, as well as their load condition. From a lineal static analysis, the bending moments generated by a non-random sample of real traffic were determined and these stresses were extrapolated for a period of 75 years. With the results of the



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

extrapolated effects and setting geometric configurations proposed by the author or similar to those established by the ASHTTO standard, live load models composed of concentrated loads and the combination of distributed and concentrated loads were obtained.

Keywords: *Computer simulation; mobile vertical load model; Mejía bridge.*

Recibido: 18/06/2022
Aceptado: 12/09/2022
En línea: 01/10/2022

Introducción

En la concepción de proyectos viales se analizan, entre otros aspectos, las características de los vehículos que circulan sobre dichos enlaces. Esto ocurre porque la geometría de los carriles y otros elementos de la sección transversal, está fundamentada en las dimensiones de las cargas móviles que circulan por ellos. Además, el diseño de los pavimentos y de las obras de fábrica que las componen depende, en buena medida, tanto de las distancias como de la distribución de pesos por ejes. En el caso específico de los puentes de carretera, los vehículos que los cruzan son una de las variables de mayor jerarquía para su análisis, diseño y revisión estructural. Debido a las diferentes configuraciones de los vehículos existentes y en dependencia del fin que se persiga, ya sea tanto para el diseño geométrico como estructural, las normas y reglamentos han empleado ciertos vehículos representativos, conocidos como vehículos de diseño (Miao & Chan, 2002).

Existe una gran diversidad de criterios en cuanto a la elección del vehículo idóneo para fungir como carga vertical móvil representativa en puentes. Algunos elementos determinantes para ello, son las características del tránsito en el área donde se ubica proyecto, la proyección del desarrollo vehicular, así como las solicitaciones predominantes para el diseño. Se impone, por tanto, la necesidad de estudiar a fondo los efectos que el tráfico ocasiona sobre los distintos elementos que componen los puentes, para establecer el modelo vehicular adecuado (van der Spuy & Lenner, 2019). El crecimiento del volumen de tránsito, la multiplicidad de configuraciones de vehículos, así como el aumento del peso bruto de los mismos, exigen un diseño basado en modelos de cargas que provoquen efectos similares a los producidos por el tráfico real. Estos modelos no describen en sí mismos las cargas reales, sino que han sido seleccionados de forma tal que sus efectos representen a los del tráfico real, para lo cual se crea un vehículo virtual que representa las condiciones reales de tráfico (Asociación española de normalización y certificación, 1998).

Si bien es importante la utilización de un modelo para representar la población vehicular, existen autores que proponen ir más allá. Rossigali (2006) plantea que con el desarrollo de métodos numéricos de cálculo y la amplia comercialización de programas computacionales específicos para el análisis estructural de puentes, desaparecerá la necesidad de mantener la configuración de un vehículo tipo.



El proceso de obtención y desarrollo de modelos de carga viva se ha llevado a cabo tomando los principios planteados por destacados investigadores tales como Nowak (1993), Nowak & Hong (1991), Hwang & Koh (2000), Ferreira, (2006) u otros más recientes desarrollados por Rossigali et al. (2015). Con el fin de ganar en seguridad estructural en el análisis de los elementos componentes de los puentes de carreteras, su diseño debe estar basado en modelos de cargas vivas que generen efectos similares a los producidos por el tráfico real.

La composición vehicular varía considerablemente de un país a otro e inclusive dentro de una misma silueta se observan variaciones. En el reglamento Especificaciones generales para la construcción de puentes y carreteras del Ministerio de transporte y obras públicas del Ecuador (2013) se han tomado como referencia normas de diseño, basadas en las características del parque vehicular de Estados Unidos. A partir del análisis de los resultados de los aforos vehiculares realizados a nivel local, se distingue una amplia variedad de configuraciones de vehículos, distancias y pesos por ejes. En tanto, el puente de Mejía fue diseñado considerando una carga de diseño correspondiente al vehículo HS20, incrementado en un 25%, según consta en la documentación de proyecto revisada (Supervisión de estudios viales. Regional 4 Manabí, 2011). Esto genera un nivel de incertidumbre acerca de los efectos que producen algunas de las siluetas vehiculares, que circulan por la red vial del Ecuador, sobre un prototipo de obra de fábrica como el puente de Mejía, y si estos exceden de los que resultan de la aplicación del vehículo normativo empleado. Dadas las condiciones descritas anteriormente, se definió como objetivo general, determinar modelos de carga vertical móvil para solicitaciones de momento flector y para un período de recurrencia de 75 años, aplicable a un modelo numérico de un prototipo basado en la tipología constructiva del puente de Mejía, tomando como base los resultados de los aforos realizados en la carretera Portoviejo-Crucita siguiendo el método indirecto modificado.

Materiales y métodos

Para la obtención de un modelo de cargas vivas vehiculares un primer paso es la selección de las variables que los investigadores consideren necesarias en su desarrollo, para lo cual se realiza un estudio del tráfico en el enlace vial donde se ubica la estructura que se analiza o se toman los datos de una obra que tenga características similares. El procesamiento de los datos necesita de un tratamiento estadístico. A continuación, se muestran algunos de los fundamentos normativos y de los métodos que sustentan este trabajo.



Especificaciones de la American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO) para vehículos de diseño

En las especificaciones de diseño para puentes de carreteras de los Estados Unidos (AASHTO, 2002) se establecen los requerimientos que se utilizan en el proyecto de puentes. Según este reglamento, los camiones designados con las letras HS, seguidas de caracteres numéricos son vehículos tipo con tractor y semirremolque. Concretamente, el HS20 está conformado, en la sección longitudinal, por tres ejes. El eje líder es simple y por él bajan 35.59 kN. Los otros dos ejes son también simples y por ellos bajan cargas iguales a 142.34 kN. La distancia entre el primer eje y el segundo es 4.27 m. Entre el segundo y el tercer eje la distancia es variable entre 4.27 m y 9.14 m. La carga de carril es una carga uniforme por metro lineal de vía de tránsito, combinada con una carga concentrada colocada en posición tal que provoque los máximos esfuerzos. La carga concentrada para solicitaciones de momento flector es 81.7 kN, mientras que para esfuerzos cortantes es 117.9 kN. En ambos casos, la carga uniformemente distribuida es 9.34 kN/m.

Especificaciones del método de carga y capacidad para los vehículos de diseño.

Las especificaciones de diseño de puentes AASHTO-LRFD hacen uso de la metodología de diseño de factores de carga y resistencia. Estos factores tienen un fundamento estadístico de acuerdo a las desviaciones en el comportamiento de las cargas y en el desempeño estructural de los materiales constitutivos. En la sección cargas y factores de carga se detallan los requerimientos del material móvil que ha de considerarse en los nuevos diseños. Esta norma emplea tres tipos de carga: carga de camión, que consta de un vehículo de diseño similar al HS20-44 de la AASHTO, carga de tándem que consiste en un par de ejes de 110 kN con una separación de 1.2 m y espaciado transversal de las ruedas de 1.8 m y carga de carril de 9.34 kN/m distribuida uniformemente en dirección longitudinal y transversalmente en un ancho de 3 m. La sobrecarga vehicular sobre las calzadas de puentes, designada como HL-93, consiste en una combinación del camión HS20 y la carga de carril; y otra con el eje tándem más la carga de carril, empleando la combinación que genere mayores solicitaciones.

Como ya se indicó en la introducción el vehículo de diseño empleado para el diseño del puente de Mejía es el HS25, que significa el HS20, con los pesos por ejes incrementados en un 25 %.

Modelo de Nowak y Lind

Este método, formulado en 1979, toma como base datos de una inspección del tráfico en Ontario, 1975. Para la previsión del máximo esfuerzo en los puentes en 50 años de vida útil, los momentos flectores calculados a partir de los datos del tráfico real son extrapolados, pues el período de medición fue de dos semanas. Aquí se asume que la cola superior de la distribución (L_{50}) es exponencial: $F_{L_{50}}(X) = 1 - e^{-X}$. Tal y como se observa en la figura 1, en el eje horizontal aparece la relación entre el momento flector obtenido por los camiones y el momento flector de diseño determinado por



la norma canadiense de la época $\left(\frac{M_{camión}}{M_{OHBD C}}\right)$. Mientras tanto, en el vertical se coloca el logaritmo natural de la cantidad de camiones que exceden el momento flector de diseño, obtenido por el código de diseño de puentes de carreteras de Ontario (Nowak & Lind, 1979).

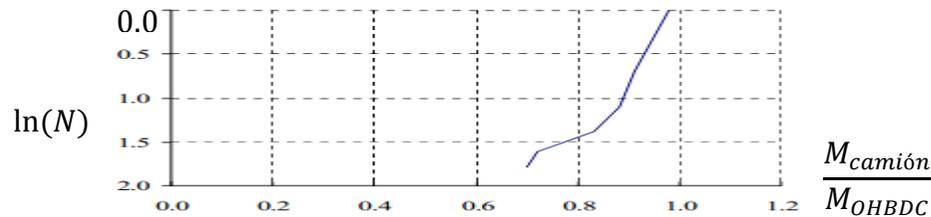


Figura 1. Cola superior de la distribución de momentos flectores. En la figura N es el **número** de camiones que exceden el momento flector de diseño, obtenido por el código de diseño de puentes de carreteras de Ontario.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Ferreira, 2006)

El procedimiento consiste en extrapolar el número de camiones hasta el período de diseño escogido y trazar, para esa ubicación, una recta paralela al eje horizontal, interceptar la función de extrapolación con dicha recta horizontal y obtener en el eje de las abscisas el valor de la relación entre solicitaciones correspondiente a ese período de diseño.

El modelo de Ghosn y Moses

Ghosn y Moses trabajaron en 1985 la teoría de los procesos estocásticos como una herramienta útil para el análisis de estructuras sometidas a cargas aleatorias. La técnica utilizada es basada en cadenas de Markov, considerando tanto el modelo de llegada de camiones al puente (medido o idealizado) como las características de los camiones (pesos y espaciamiento de los ejes). La distribución de probabilidad del máximo efecto de la carga móvil es determinada para el tiempo de vida útil de la estructura. Se analizan todas las posibles localizaciones de los camiones en el puente y sus pesos (Ghosn & Moses, 1985). De acuerdo con algunos autores citados por (Ferreira, 2006) los procedimientos para simplificar las expresiones teóricas hacen que su uso sea válido solo para luces pequeñas y medias.

El modelo de Nowak

(Nowak, 1993) al igual que en el modelo elaborado junto a Lind en 1979, utiliza los resultados de una inspección en el tráfico de camiones realizada en 1975 por el Ministerio del Transporte de Ontario. Se recuerda que, en ese estudio, se observaron en dos semanas cerca de 10 000 camiones (solo se midieron y se incluyeron en la base de datos camiones que parecían poseer elevado peso bruto). El investigador parte de esta información para realizar la calibración de coeficientes parciales para la norma AASHTO. De acuerdo con el autor, son varias las incertidumbres en el análisis debido a las limitaciones de los datos obtenidos del tráfico, entre ellas: la muestra de camiones estudiada es pequeña en



comparación con el número real de camiones durante la vida útil del puente (75 años), algunos camiones sobrecargados intencionalmente evitaron las estaciones de pesaje, y las desviaciones futuras en las distribuciones de pesos y ejes eran desconocidas.

En el trabajo, se asume que la población de camiones permanecerá constante. Para cada camión de la muestra se calculan momentos flectores y fuerzas cortantes. En las condiciones de apoyo de los prototipos, se analizan tramos simplemente apoyados y tramos continuos de igual longitud. Las funciones de distribución acumulada se representan dependiendo de la relación entre el momento flector obtenido por los camiones y el momento flector de diseño determinado por el vehículo HS20 $\left(\frac{M_{camión}}{M_{HS20}}\right)$. Los máximos momentos flectores y fuerzas cortantes para períodos (superiores a dos semanas) se determinan por extrapolación. A partir de los gráficos, se hacen tablas que establecen la relación entre el esfuerzo causado por el camión observado y el esfuerzo logrado con la carga HS-20 para varias luces y períodos. En la figura 2 se muestra la extrapolación para momento flector en una luz de 9 metros.

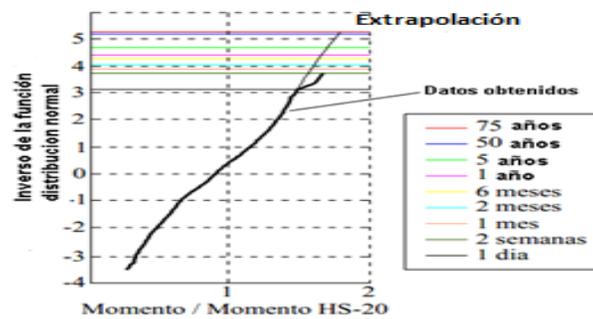


Figura 2. Extrapolación para momento flector para una luz de 9 m.

Fuente: Elaboración propia a partir de Ferreira (2006)

Modelo de Crespo-Minguillón y Casas

En este método los autores proponen un algoritmo en el que se simulan situaciones reales de tráfico sobre la longitud cargada de las obras de fábrica. Se incluye, además, otro módulo donde se extrapolan los resultados de las solicitaciones máximas. Los autores (Crespo-Minguillón & Casas, 1997) incluyen en su publicación, a modo de ejemplo, el efecto del tráfico sobre el puente es simulado cada 0.20 segundos durante una semana. El cálculo de los momentos flectores sobre las solicitaciones a las que se someten se realiza a través de la superficie de influencia de la estructura (Ferreira, 2006).

Modelo de Hwang y Koh

(Hwang & Koh, 2000) emplean como base para el desarrollo de su modelo, datos de pesaje en movimiento en 3 localidades. Las informaciones de presencia simultánea de vehículos sobre los puentes son obtenidas a través de



grabaciones de vídeo. En el análisis solamente fueron consideradas las siete siluetas de camiones más pesados y que aparecen en mayor frecuencia. Para cada localidad y tipo de camión, fueron ploteados en papel de probabilidad normal los 10 mayores pesos brutos. Considerando la relación entre el número de camiones observados y el previsto para la vida útil de la estructura (75 años), los máximos pesos brutos fueron extrapolados mediante un procedimiento análogo al utilizado por (Nowak, 1993).

Procedimiento general para la obtención de cargas verticales móviles de diseño en puentes de carreteras

Se presenta el procedimiento general para la obtención de cargas verticales móviles de diseño en puentes de carreteras. En él se emplea modelización numérica para el análisis del prototipo escogido y se consideran las características del tráfico real. Además, se explican someramente los materiales y métodos empleados. El procedimiento general, consta de cinco pasos, los cuales se ilustran en la figura 3.

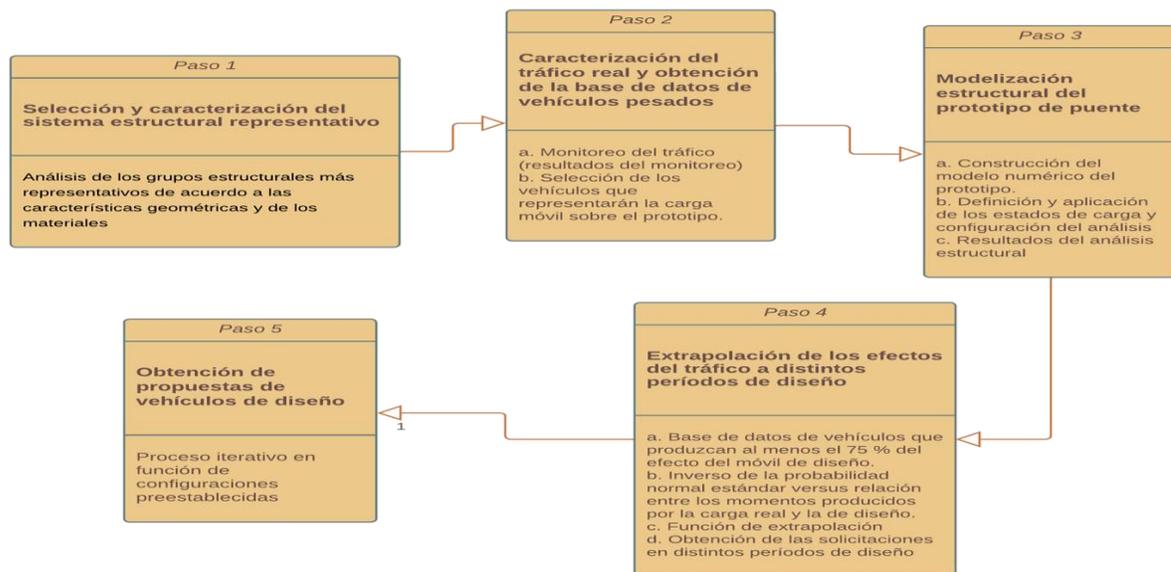


Figura 3. Flujo general del procedimiento empleado

La elección de los sistemas estructurales representativos es un proceso altamente influenciado por el criterio técnico y el nivel de experticia del sujeto de investigación. Como aspecto fundamental el investigador debe establecer las características de la estructura que influyen en el análisis específico que se desee realizar. Esos elementos parten -en primer lugar- de poseer información detallada sobre las tipologías más comunes, los materiales empleados, las dimensiones del tablero y las condiciones de apoyo que integran la población de puentes de un país o región. La



magnitud de este paso es tal, que requiere de la dedicación de una gran cantidad de tiempo a la adquisición y procesamiento de información.

Como segundo paso, se establece la caracterización del tráfico real y obtención de la base de datos de vehículos pesados, lo cual se lleva a cabo mediante el monitoreo del tránsito. Para cada silueta deben obtenerse el tráfico medio diario (TMD) por cada silueta, el peso total y por ejes de los vehículos. Además, podría ser deseable el comportamiento de la velocidad de circulación, la distribución por sentido del tránsito entre otros aspectos, sobre todo si se desean realizar estudios con enfoques estocásticos.

Lo primero que debe tenerse en cuenta es la duración del muestreo y el intervalo de tiempo en que este se va a ejecutar. Lo ideal es realizarlo continuamente, de lo contrario, se seleccionan aleatoriamente los días y sesiones que conforman el estudio del tránsito. De no disponer del personal y los recursos suficientes para acometer el conteo en la totalidad de las sesiones debe diseñarse un programa de muestreo. Se debe definir una cantidad de sesiones en las que es necesario monitorear el tráfico para obtener un nivel de confianza apropiado, cometiendo un error admisible dado y usando unas incertidumbres positivas y negativas prefijadas. Paralelamente con ello se debe realizar la elección de los sitios apropiados para realizar los conteos vehiculares. Para ello, estos puntos de observación deben tener buena visibilidad, un elevado tráfico de camiones y caracterizarse por encontrarse en un tramo recto del trazado, tanto en planta como en perfil, de modo que exista un flujo continuo. El registro de eventos por cada tipo, estado de carga y distribución temporal es ideal realizarlo a través un sistema de pesaje en movimiento. Otra alternativa es emplear balanzas móviles o estaciones de pesaje fija. Cuando no se dispone de ninguna de estas tecnologías, se puede realizar una categorización previa del tráfico vial, a través de una base del conocimiento. El método indirecto modificado parte de este último principio.

Las consideraciones para elegir los vehículos que serán aplicados al prototipo parten de tres principios: intensidad, geometría vehicular y distribuciones de peso por ejes. Estas variables son determinantes en la obtención de la respuesta estructural del prototipo. El número de eventos de una determinada silueta, variable directamente relacionada con la intensidad, se estudia a través de gráficos de distribución de frecuencias de todos los vehículos. Sin embargo, muchas de las cargas móviles de mayor frecuencia tienen un efecto estructural despreciable sobre los puentes. Tal es el caso de los vehículos ligeros, los utilitarios, microbuses y camionetas. Por ello, es buena práctica realizar la selección de los vehículos teniendo presente, a la vez de la frecuencia, el peso bruto vehicular. Este paso facilita etapas del trabajo ulterior sin afectar el objetivo final, pues hace más ligera la definición de los estados de carga sin perder la representatividad



En resumen, las cargas que deben considerarse en el desarrollo de un modelo de vehículo de diseño son aquellos camiones de mayor peso, menores distancias entre ejes y que tienen un mayor número de frecuencias absolutas registradas. En este caso se propone el empleo de la fracción más pesada del espectro vehicular.

Una vez seleccionado el prototipo representativo del puente, este ha de ser modelizado en una aplicación computacional apropiada. En estas aplicaciones, se introduce y concatena la información paramétrica en forma de módulos.

La construcción del modelo numérico se propone que se lleve a cabo en la aplicación CSiBridge. En ella, es necesario establecer el sistema de unidades de medida con el que se introducirán los parámetros geométricos y constitutivos. Luego, se define la alineación en planta y perfil del eje del puente. Posteriormente, se establecen los carriles de circulación para que las diferentes cargas verticales se muevan sobre el puente. A continuación, se concibe el comportamiento y la naturaleza de los materiales que conforman el puente. Se considera suficiente, en este primer acercamiento al tema, el empleo de materiales isotrópicos y trabajando en el rango elástico. Uno de los elementos de mayor importancia en un puente, lo constituye su tablero. Este objeto se encuentra notablemente parametrizado en la aplicación sugerida, permitiendo una gran flexibilidad en el diseño de geométrico de aceras, contenes, así como de la losa estructural y los elementos resistentes principales. El programa permite también la inclusión de una variedad de elementos de arriostramiento transversal, que se encuentran bajo la denominación genérica de diafragmas. La sección destinada a los aparatos de apoyo permite especificar las propiedades elásticas, así como los grados de libertad de estos elementos, que garantizarán la forma correcta de trabajo del tablero. La aplicación permite la definición de estribos, pilas y de los elementos de la infraestructura. En el módulo de cargas, el software tiene vehículos normativos ya preconcebidos y permite, mediante una cómoda interfaz, la inclusión de nuevas configuraciones entre las que se incluyen no solamente cargas por eje, sino también distribuidas.

Como ya se indicó, se propone la realización de un análisis lineal y en el que solo intervengan las cargas verticales móviles. Se toman como estados de carga, tanto el vehículo normativo como los camiones modelizados del tráfico real. El fin es obtener aquellos estados de carga que produzcan las situaciones pésimas en los elementos longitudinales del tablero. Como respuesta estructural del puente pueden escogerse solicitaciones, desplazamientos y tensiones. Lo habitual es considerar sólo el esfuerzo cortante y momento flector, pues son las solicitaciones más decisivas en los procesos de diseño y revisión estructural.

La situación crítica para el análisis de la seguridad de un prototipo de puentes puede ser resultado del tránsito de un camión aislado o de la presencia simultánea de dos o más vehículos sobre la estructura. Este último caso, requiere tener presente que la probabilidad de que la circulación de camiones suficientemente cercanos lleve a una situación de máxima solicitación, es menor, con relación a un camión aislado. Al no disponer de datos estadísticos que suministren



la probabilidad de la ocurrencia simultánea se ha decidido trabajar con las siguientes situaciones: un vehículo aislado circulando sobre el puente y dos columnas de vehículos del mismo tipo, circulando paralelamente en carriles contiguos y en el mismo sentido.

Los resultados del análisis estructural deben incluir, al menos, las solicitaciones de momento flector, para el estado de cargas que resulte más desfavorable, en la viga más solicitada y convenientemente dividida en secciones. En esta sección, se propone definir y determinar el coeficiente de relación entre solicitaciones del siguiente modo:

$$\psi_i = \frac{S_i}{S_{VN}}$$

ψ_i : Relación entre solicitaciones provocadas por la carga de tráfico y el vehículo de diseño

S_i : Solicitación producida por la silueta i en una sección dada

S_{VN} : Solicitación producida por el vehículo normativo considerado en la misma sección

De igual modo, se aconseja obtener una representación gráfica de la relación entre la frecuencia relativa acumulada de presencia de los camiones sobre el puente en función coeficiente de relación entre solicitaciones. A través de la representación anterior, se puede analizar si hay solicitaciones mayores que las producidas por el vehículo normativo o, por el contrario, el vehículo normativo excede a los efectos del tráfico. Esto permitiría esbozar las primeras conclusiones del estudio.

Para seleccionar, en la base de datos, los vehículos más perjudiciales para el puente, se procede a considerar solamente aquéllos que producen solicitaciones mayores o iguales a una cierta fracción de los efectos debidos a los vehículos de proyecto. Hay estudios que adoptan como referencia el valor del 75% del vehículo normativo (Ferreira, 2006; Hwang & Koh, 2000; Rossigali et al., 2015).

La información obtenida hasta este paso y, que corresponde con el límite de tiempo que ha durado el monitoreo, se tabula. En una columna, se colocan los coeficientes de relación de solicitaciones, obtenidos para cada silueta escogida. Con la frecuencia absoluta acumulada se obtiene el inverso de la distribución acumulativa normal estándar (Φ^{-1}). Esta función devuelve el valor específico de la variable Z que está asociado a una probabilidad acumulada, considerando que dicha variable sigue una distribución normal.

$$\Phi_i^{-1} = f \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^i N_j}{\sum_{j=1}^n N_j} \right)$$

$\sum_{j=1}^i N_j$: Frecuencia acumulada de eventos hasta la silueta i

$\sum_{j=1}^n N_j$: Frecuencia acumulada total de eventos en el período de diseño



Φ_i^{-1} : Inverso de la probabilidad normal estándar acumulada de la silueta i .

Recordar que, en teoría de las probabilidades, a Z se le conoce como variable tipificada y es la diferencia entre un valor arbitrario de una variable y el promedio. Conceptualmente el período de retorno, aplicado al contexto que se analiza, se refiere al tiempo en el que la probabilidad de ocurrencia un evento (el paso de un camión sobre el puente) se distribuye de modo uniforme en cada año de ese tiempo (Rossigali, 2006). Como sucede habitualmente, los tiempos en que se realiza el monitoreo del tránsito suelen ser mucho menores que el período de diseño de un puente. Por ello, es frecuente realizar la extrapolación a intervalos de tiempo mayores al de medición. La extrapolación se puede obtener con la propia distribución principal ajustada, teniendo presente que la probabilidad de ocurrencia de un evento se puede considerar como el recíproco del período de retorno. Si consideramos que el intervalo de tiempo unitario es un año y que en ese período de diseño analizado pueden ocurrir N eventos de una silueta sobre el puente, la probabilidad de ocurrencia del evento (p) es

$$p = \frac{1}{N}$$

Téngase en cuenta que, en términos generales, la probabilidad de ocurrencia de un evento (p) es

$$p = 1 - \int_{-\infty}^z f(x) dx$$

$$p = 1 - F(x)$$

Donde:

$$\int_{-\infty}^z f(x) dx = F \text{ es la función de probabilidad acumulada}$$

Igualando las probabilidades de ocurrencia del fenómeno, resulta

$$F(x) = 1 - \frac{1}{N}$$

Si se considera que la duración del monitoreo del tránsito es t_m , donde ocurrieron una cantidad de eventos, N_i , para una silueta determinada y que el período de retorno es T , entonces la ecuación anterior adquiere la forma:

$$F(x) = 1 - \frac{t_m}{T \cdot N_i}$$



Si se considera que la función de probabilidad acumulada sigue una distribución normal, se puede obtener la inversa de la función de la distribución normal acumulada estándar (Φ^{-1}). Entonces, si se representa en un gráfico la relación del inverso de la probabilidad normal estándar en función de la relación de solicitaciones (ψ) y, para esas observaciones, se lleva a cabo un ajuste lineal, como opción más expedita, se pueden obtener los valores extremos para otros períodos de retorno. Este procedimiento demanda que se conozca el total de camiones que transitan diariamente por la zona de estudio. Para ello, se hace imprescindible establecer el período de retorno que se considerará. Las normas AASHTO establecen que este oscile entre los 25 y 100 años, siendo el valor habitual igual a 75 años. Considerando la cantidad de eventos que se pueden producir en el período de tiempo establecido, se obtiene el inverso de la probabilidad normal acumulada y se traza una línea paralela al eje de la relación de solicitaciones (ψ). Al emplear la ecuación de extrapolación, definida en el paso anterior se puede obtener la respuesta que provocará la carga vertical móvil en ese tiempo, extendiendo e interceptando la función de extrapolación con la línea horizontal definida para el período de diseño. Los vehículos de diseño que se emplean para el análisis y diseño estructural de puentes están conformados por cargas concentradas, distribuidas o una combinación de estas dos configuraciones. Ese conjunto debe producir las máximas solicitaciones que, debido al efecto del tráfico, estará sometida la estructura en el período de diseño. La propia elección de esta configuración implica un sinnúmero de posibles alternativas de soluciones. También, podría partirse de la elección de un camión -de los que conforman el tráfico real- como prototipo y amplificar sus valores de cargas por ejes hasta que se alcance la solicitación estimada en el período de diseño, con un nivel de tolerancia definido por el usuario, lo cual podría realizarse mediante un proceso iterativo, ante procesos no lineales, o a través de escalamientos o proporciones si los comportamientos son lineales.

Resultados y discusión

Partiendo del procedimiento anteriormente expuesto, al prototipo de puente seleccionado, y elaborado en el software SCI Bridge, se le imponen las cargas móviles producidas por el tráfico real, que fueron obtenidas a través de la recopilación de datos de estudios de tráfico, realizados durante dos años en el enlace vial Portoviejo-Crucita. Se obtienen valores de momento flector generados por la acción en dos carriles de una selección de siluetas del tráfico real y del vehículo de diseño HS20, incrementado en un 25%, sobre una viga extrema de la superestructura. Estos datos se grafican y se obtienen los esfuerzos para el periodo de retorno deseado a través de extrapolación. Siguiendo un proceso de prueba y error se logran dos configuraciones de carga móvil que responden a estos esfuerzos y se obtienen, finalmente, dos propuestas de vehículos de diseño.



Selección y caracterización de los sistemas estructurales representativos

Para seleccionar el prototipo sobre el que se aplicaron tanto las cargas de tráfico reales como normativas, se busca un puente representativo de estas obras de fábrica en Manabí, donde el tráfico vehicular provoque los mayores efectos en los elementos componentes. Según CONGOPE y Banco Interamericano de Desarrollo (2019) en Manabí existen 648 puentes, de los cuales más de las dos terceras partes tienen tablero de hormigón armado. Según la misma fuente, más del 40 % de estas obras poseen anchos superiores a 7 m, permitiendo la ubicación de dos o más carriles de circulación. Se ha decidido emplear como prototipo el puente de Mejía debido al ancho de su tablero, con capacidad nominal de dos carriles y debido a su considerable luz, teniendo en cuenta que las solicitaciones momento flector son altamente dependientes de la longitud cargada.

Caracterización del tráfico real y obtención de la base de datos de vehículos pesados

A partir del conteo vehicular es posible adquirir información del tránsito para su posterior empleo en la definición de la carga de diseño. Entre otras informaciones debe obtenerse el tráfico medio diario (TMD) por cada silueta, el peso total y por ejes de los vehículos por silueta. Además, es deseable el conocimiento de la velocidad de circulación, la distribución por sentido de del tránsito entre otros aspectos, sobre todo si se desean realizar estudios con enfoques estocásticos.

Monitoreo del tráfico

En el enlace vial Portoviejo-Crucita se han llevado a cabo conteos vehiculares, empleando el método indirecto modificado. El autor de este trabajo ha participado como observador en los mismos. Como consecuencia de dicho estudio, el cual está en proceso de publicación, se tiene el espectro vehicular en función de las siluetas que lograron 1000 o más eventos sobre la vía. Aparecen, además en el trabajo de referencia, el estado de cargas, separación entre vehículos y de velocidad puntual, los cuales se han medido durante los dos años previos a la pandemia, ver tabla 1. Los registros de monitoreo muestran el paso de 700 218 vehículos.

Tabla 1 . Peso bruto vehicular y frecuencia absoluta de las siluetas registradas durante el monitoreo del tráfico en el enlace vial

Portoviejo-Crucita.

Id	Descripción	Peso bruto vehicular (ton)	Total de eventos
S0	Vehículos ligeros	-	371673
2D	Camión de 2 ejes pequeño	7	104134
2DA	Camión de 2 ejes mediano	10	100653
2DB	Camión de 2 ejes grande	18	28569
2D-BU	Buses		44534
2S1	Tractocamión de 2 ejes y semiremolque de 1 eje	29	2281
2S2	Tractocamión de 2 ejes y semiremolque de 2 ejes	38	12724
3S2	Tractocamión de 3 ejes y semiremolque de 2 ejes	47	19206



T2S3	Tractocamión de 2 ejes y semiremolque de 3 ejes	42	4682
T3S3	Tractocamión de 3 ejes y semiremolque de 3 ejes	48	3961
V2DB	Volqueta de 2 ejes 8 m3	27	3822
T2	Tractocamión de 2 ejes	18	1801
V3A	Volqueta de 3 ejes 10-14 m3	27	2178
Total			700218

Elección de los vehículos que se aplican al prototipo de puentes

A partir de la información anterior, se realiza un filtrado de las siluetas y se escoge aquella fracción de los vehículos más pesados, como es común en este tipo de estudios Haga clic o pulse aquí para escribir texto.. Ese filtrado se reduce a las siluetas: 2S1, 2S2, 3S2, T2S3 y T3S3. Entre estas, se registran 42 854 vehículos pesados. A modo de simplificación, se asume que cada silueta posee una distribución de cargas por ejes independiente del estado de cargas y acorde a lo indicado en las normativa vial NEVI-12 (Ministerio del transporte y obras públicas, 2013).

Modelo de numérico del puente y obtención del vehículo de diseño.

Para la obtención de las propuestas de vehículos de diseño se parte de un modelo numérico del puente. El proceso para acometer esta parte del trabajo se ilustra en la figura 4.

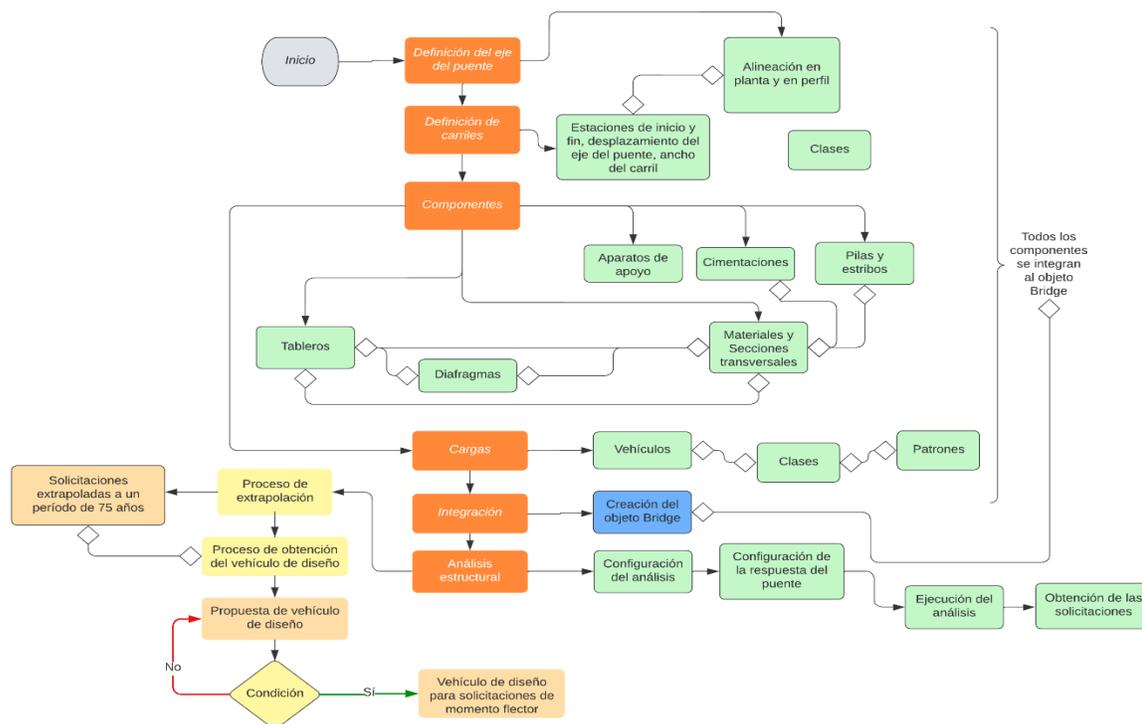


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso seguido para definir el modelo estructural del puente y el vehículo de diseño.



Construcción del modelo numérico del prototipo

La construcción del modelo numérico se lleva a cabo en la aplicación CSiBridge en su versión 24. En todo el proceso se han empleado el sistema internacional de unidades. El primer paso consiste en la definición de la alineación en planta y perfil. Tal como se indica en la documentación de proyecto, se colocaron las estaciones iniciales y finales, así como se especificó la cota de la rasante. En este caso, se ha obviado tanto el rumbo del eje de la vía como la contraflecha de las vigas del tablero por considerar que ambos parámetros no inciden de manera determinante para el propósito de este estudio.

Posteriormente a ello, se definieron dos carriles de circulación. El carril derecho está restringido por la presencia de una acera peatonal y en él se ha incluido, como parte del ancho útil de circulación, la ciclo vía. Por su parte, el carril izquierdo solo posee la restricción del contén de 0.20 m de espesor. Se especificaron excentricidades constantes de los ejes de ambos carriles con respecto al centroide del tablero y a todo lo largo del puente. La asimetría de los carriles, así como el aporte de los rigidizadores transversales inciden en la decisión de que uno de los estados de carga analizados sea el camión circulando únicamente por el carril izquierdo.

Se definieron dos materiales con las propiedades establecidas en la documentación de proyecto: hormigón armado y acero estructural para planchas y perfiles laminados.

Se identificó con “Hgon_PMejia” al material que caracterizaría al hormigón de resistencia a la compresión de 35 MPa. A la hora de establecer su módulo de elasticidad, en lugar de utilizar las clásicas expresiones de la ACI, donde relacionan la resistencia y el módulo de elasticidad, se decidió emplear las ecuaciones empíricas obtenidas para algunos hormigones en el Ecuador (Osejo Mora, 2020). Este material fue asignado a la losa del tablero y a los estribos. Las propiedades de este material aparecen en la figura 5.

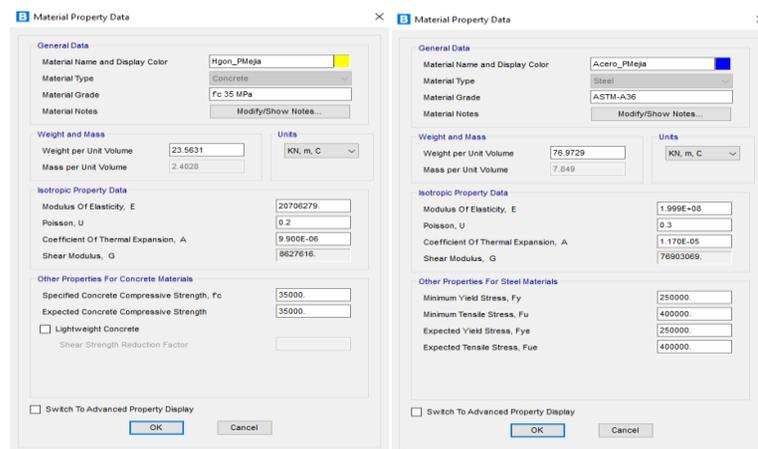


Figura 5. Definición de las propiedades del acero para planchas y perfiles y el hormigón para el prototipo empleado.



Se identificó con “Acero_PMejia” al material que caracterizaría a los componentes de las planchas de la viga construida y de los perfiles laminados empleados. Tal y como se establece en la documentación de proyecto, se empleó acero ASTM A36, con límite de fluencia 250 MPa.

Se introdujeron los parámetros del tablero, nombrado Tablero_PMejia 4. Para ello, se definió que este estaría compuesto por una losa de hormigón armado de 0.20 m de espesor y seis vigas construidas de acero de sección I y 2.05 m de peralte. Además de ello, se establecieron las ubicaciones de aceras y contenes. Las líneas verdes establecen las posiciones de los bordes de contenes y aceras, de modo que el espacio entre ellas es el ancho útil de circulación. La figura 6, permite observar el tablero definido.

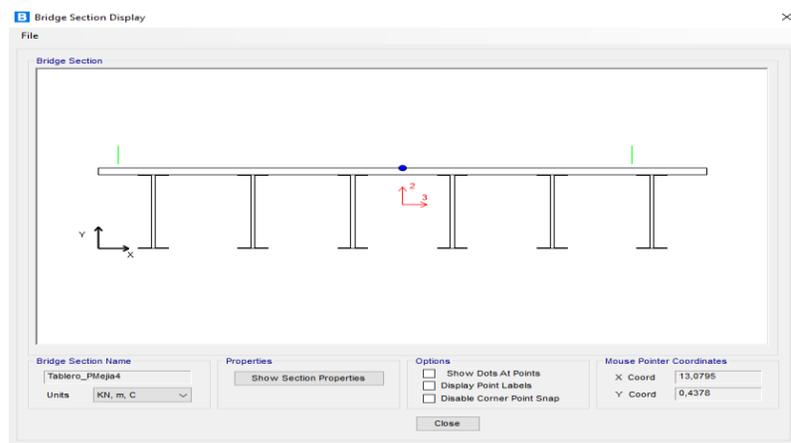


Figura 6. Definición del tablero.

Los diafragmas se colocan cada 6.35 m y se distribuyen a todo lo largo de la luz del puente. Los diagramas están compuestos por cordones superiores e inferiores, arriostrados con diagonales a las alas superior e inferior de las vigas construidas. Estos elementos se conforman con dos perfiles angulares de alas iguales. Se han incluido también en la definición de estos tipos estructurales las planchas de anclaje de dichos perfiles. La parametrización del objeto “Diafragma_PMejia” aparece en la figura 7.

Teniendo en cuenta que las vigas en sus extremos están asentadas sobre aparatos de apoyo de neopreno, se configuran estos limitando los grados de libertad traslacionales y liberando los giros en los tres ejes. El objeto que los caracteriza, nombrado “Apoyo_PMejia”, se indica en la figura 8.



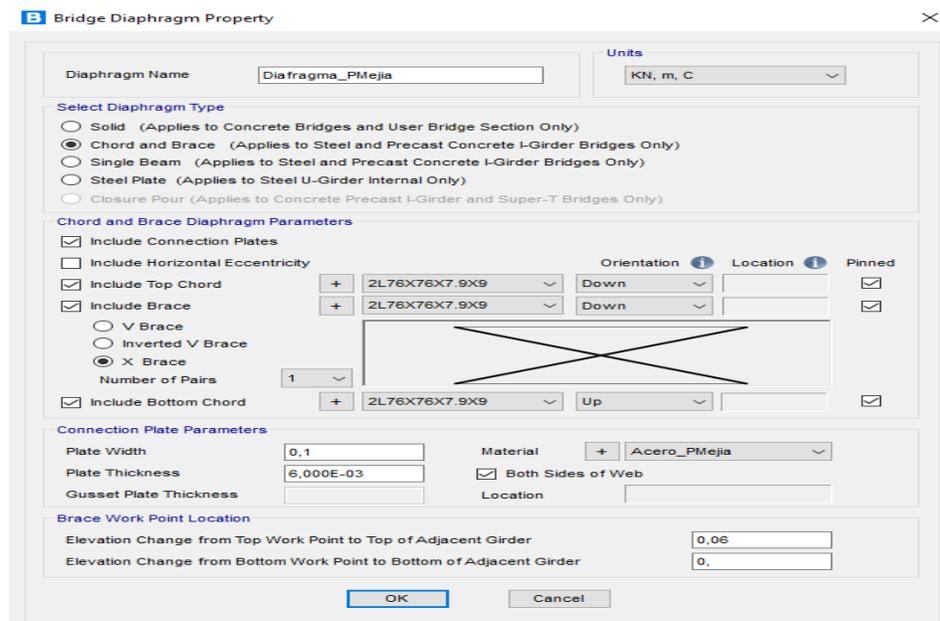


Figura 7. Definición del arriostramiento transversal.

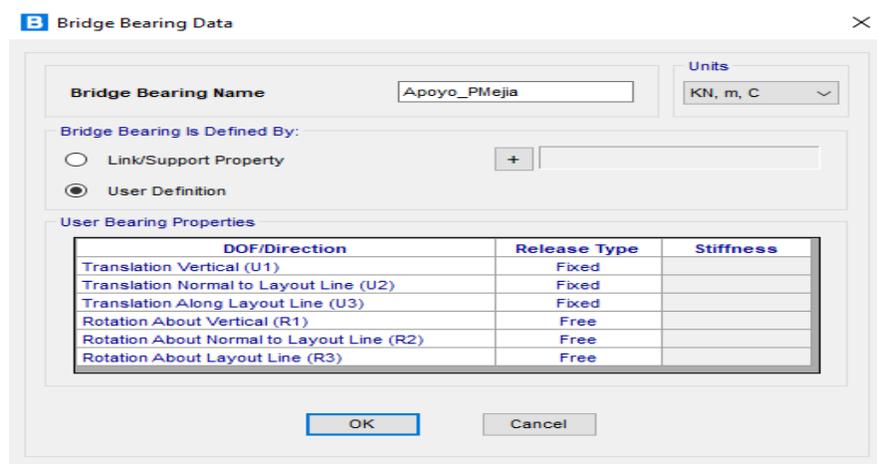


Figura 8. Definición de los aparatos de apoyo.

Aunque el análisis de la infra y subestructura del puente y cualquier interacción suelo-estructura, quedan fuera del alcance de este trabajo, se modelizaron estos componentes teniendo en cuenta las siguientes consideraciones. La subestructura del puente de Mejía está constituida por estribos de hormigón armado, los cuales se dimensionaron empleando el objeto “Estribo_PMejia”, como un elemento donde se conectan las vigas por su alma inferior. Se tuvo en cuenta la geometría de la pantalla estribo y que este se apoyaba directamente sobre un grupo de 16 pilotes (“Gpilotes_PMejia”) de 25.0 m de longitud, tal y como se observa en la figura 9.



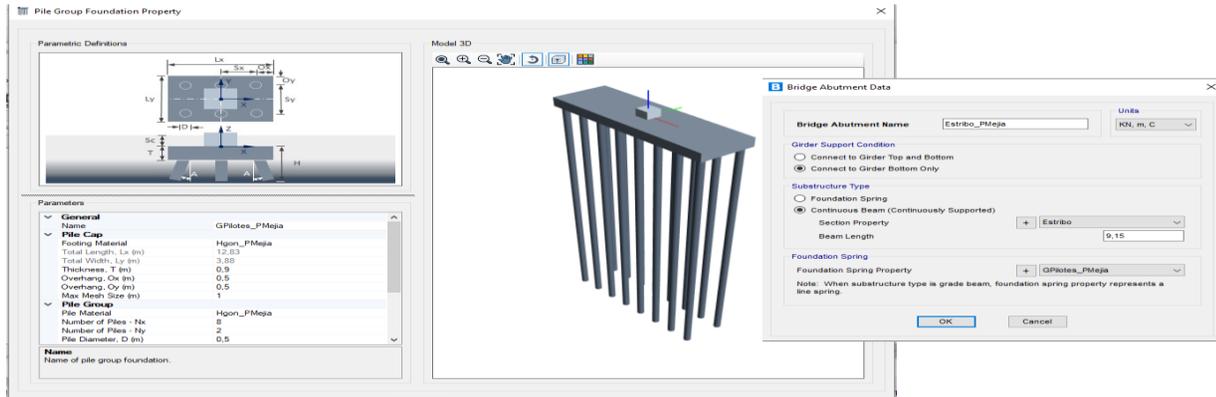


Figura 9. Parametrización del grupo de pilotes y del estribo.

Como el propósito de la investigación es obtener un modelo de carga vehicular para este prototipo de puentes se procedió, en primer lugar, a trabajar con la carga normativa. El vehículo de diseño, según la documentación de proyecto, es el 1.25 HS20, que consiste en aumentar proporcionalmente en un 25 % el camión de diseño HS20. Posteriormente a ello, se definieron 15 siluetas, correspondientes a las denominaciones: S05, S06, S07, S09 y S10; cada una con su respectivo estado de cargas.

Todos los componentes definidos hasta aquí se integran en un objeto, nombrado “Object_PMeja”. En este objeto se han relacionado las alineaciones en planta y perfil, así como el tablero, los aparatos de apoyo y los estribos con sus correspondientes cotas. Se han asignado, además, las ubicaciones de los diafragmas. Algunas de estas especificaciones se muestran en la figura 10.

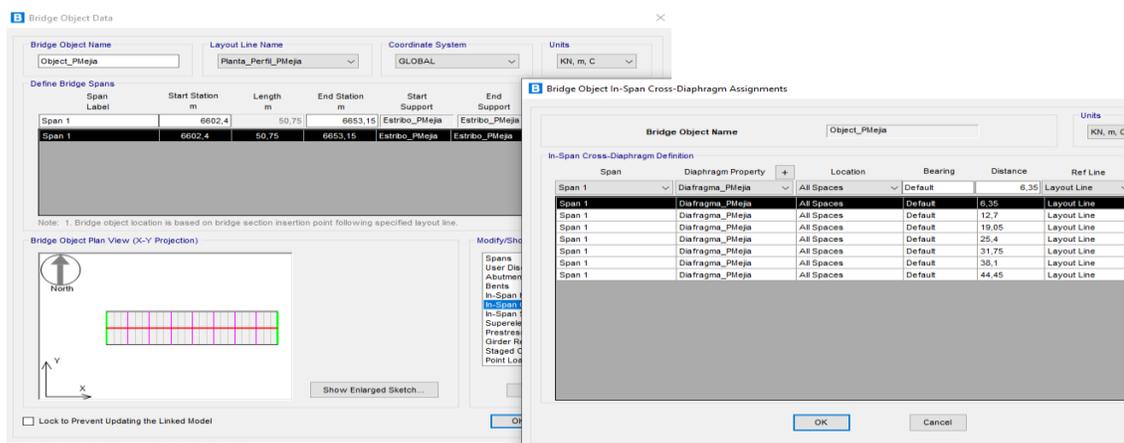


Figura 10. Asignaciones de estribos y diafragmas realizadas al objeto Object_PMeja.



Los carriles o sendas cargadas, en el modelo estructural del puente, se muestran en la figura 11. En el carril izquierdo, en color azul, la carga móvil tiene mayor asimetría con respecto al eje del puente.

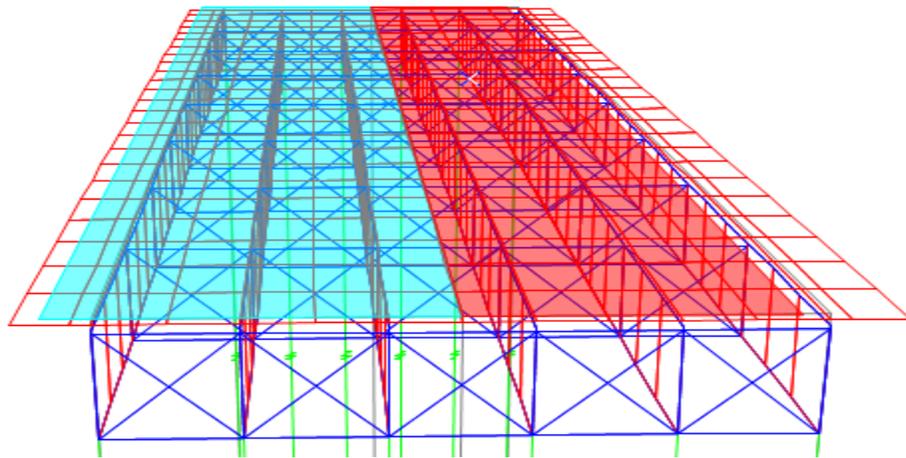


Figura 11. Representación tridimensional de los carriles de circulación. En azul el carril izquierdo, en rojo el derecho. La configuración final obtenida para el tablero del puente se muestra en la figura 12.

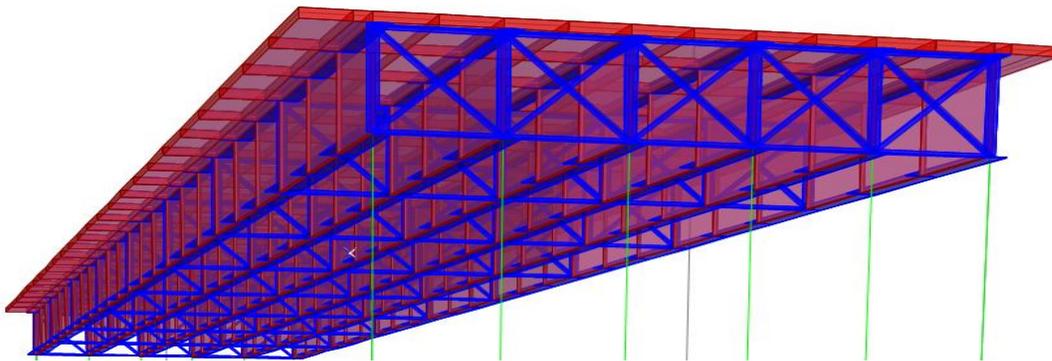


Figura 12. Tablero resultante después de realizar el proceso de modelización del prototipo de puente.

A tenor con los objetivos del trabajo, se lleva a cabo un análisis lineal sólo para las cargas verticales móviles. La respuesta estructural del puente se traduce en la obtención de los esfuerzos y tensiones sobre los elementos del tablero.

Extrapolación de los efectos del tráfico a otros períodos de diseño

Se toman como situaciones de análisis, para la carga vertical móvil, las siguientes: presencia de una carga vertical móvil en cada carril en la longitud cargada y presencia de una carga vertical móvil en el carril izquierdo en la longitud cargada. La primera de las situaciones trata de simular el evento en que el puente se encuentre sometido, simultáneamente, a la mayor cantidad de filas cargadas posible. En la segunda situación se trata de buscar una combinación, en que la



resultante de las cargas móviles se ubique lo más excéntricamente posible respecto al eje del tablero. Con ello se intenta tener en cuenta la influencia de los diafragmas en la rigidez transversal de la superestructura. En total se configuraron 16 estados de cargas móviles, uno correspondiente a la carga de diseño HS25 y otro asociado a cada silueta con su correspondiente estado de carga. De dichas situaciones se escoge la que produce las máximas solicitaciones de momento flector, en la sección ubicada en el centro de la luz, sobre la viga más esforzada, que resulta ser la extrema izquierda. La presencia simultánea de dos vehículos, uno en cada carril, resultó ser el estado de cargas crítico.

Se ha definido también el coeficiente de relación entre solicitaciones del siguiente modo

$$\psi_i = \frac{M_i}{M_{HS25}}$$

ψ_i : Relación entre momentos provocados por la carga de tráfico y el vehículo de diseño

M_i : momento flector producido por la silueta i en una sección dada

M_{HS25} : momento flector producido por el vehículo de diseño HS25 en la misma sección

La frecuencia relativa acumulada, en función de la relación entre el momento flector obtenido por el tráfico real y el momento de diseño, de muestra en la figura 13.

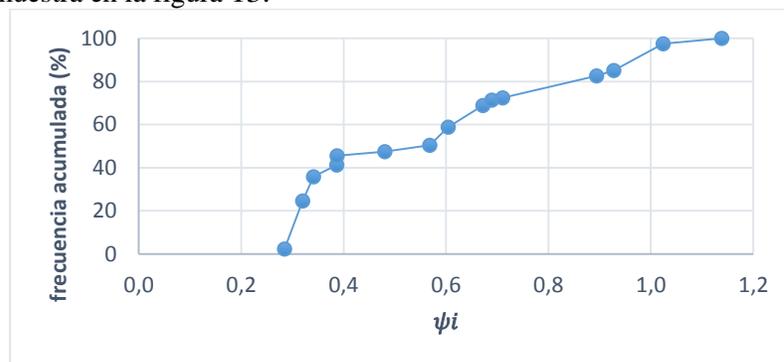


Figura 13. Frecuencia acumulada versus relación entre el cociente de los momentos flectores del tráfico real y el de diseño.

A partir de la figura anterior es notable que, la base de datos de vehículos más pesada, produce momentos flectores a partir del 28,7 % del obtenido por el vehículo de diseño. El 85,1 % de las siluetas generan solicitaciones menores o iguales que las de diseño y dos de las siluetas analizadas provocan solicitaciones mayores que la de diseño, una de ellas la S07, con el peso bruto vehicular, logra un valor casi un 14 % superior al momento producido por el HS25. Esto permite prever que el modelo propuesto provocará efectos superiores a los planteados por el vehículo de diseño considerado en la documentación de proyecto.

A partir de la información anterior, se filtra una nueva base de datos considerando sólo aquellos vehículos que generan el 75 % o más de los efectos provocados por el móvil de diseño. De ese modo, la muestra se reduce de 42814 a 11785 vehículos. Las solicitaciones así obtenidas se organizan en un gráfico de inverso de la probabilidad normal estándar (z^{-1}) en función de la relación de solicitaciones (ψ). En dicha gráfica se realiza un ajuste lineal entre estos valores



máximos, con el fin de realizar la extrapolación. La función obtenida es $z^{-1} = 17.002\psi - 15.773$. Para realizar la extrapolación, se requiere conocer el tránsito promedio diario anual que circula por el prototipo analizado. Se realiza una extrapolación considerando el número de vehículos total de la muestra reducida (11785), como la cantidad de vehículos que circulan en dos años. Con estos datos se estima el número de sucesos vehiculares en 25, 50, 75 y 100 años y a partir de estos, se determina el valor del inverso de la probabilidad normal estándar para ese tiempo. Los resultados se muestran en la figura 14. En dicha gráfica, además de la función de extrapolación obtenida, se incluyen líneas horizontales para mostrar la posición de los inversos de la probabilidad normal para los diferentes períodos analizados.

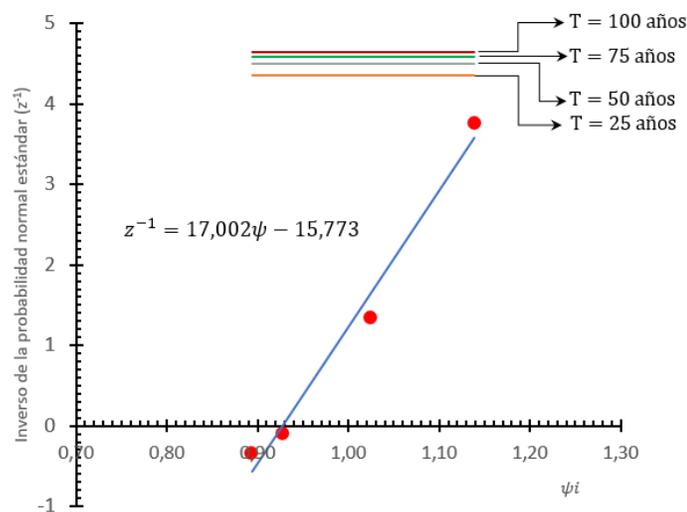


Figura 14. Función de extrapolación e inverso de la probabilidad normal estándar para cada período de diseño.

Obtención de modelos de carga viva para el puente Mayarí

Los vehículos de diseño se establecen a partir de las siguientes composiciones:

Modelo 1: Dimensiones y configuración semejante al HS20. Este vehículo está conformado por cargas concentradas en los ejes, para simular el tránsito de un vehículo pesado sobre el puente.

Modelo 2: Una carga distribuida de 9.34 kN/m combinada con una fuerza concentrada.

El procedimiento consiste en la elección de una configuración de cargas verticales que es aplicada sobre el modelo del puente y obtener, para esa primera alternativa, las solicitaciones máximas de momento flector. A partir de ahí realizar un proceso iterativo de prueba y error hasta que se cumpla la condición que el momento flector obtenido por el modelo de carga propuesto no difiera 1 % de la solicitación prevista para un período de diseño de 75 años (2601 kNm).

A partir de llevar a cabo reiteradas veces el método de prueba y error descrito en el párrafo precedente, para el modelo 1, se obtuvo una solicitación de momento flector -en la viga de diseño- de 2606 kNm, que difiere en un 0.20 % del valor



de solicitación extrapolada para un período de 75 años. El modelo 1 resulta en tres ejes: el delantero con una carga vertical de 53.38 kN y los otros dos de 213.52 kN. La sección transversal del eje indicaría que los ejes de neumáticos están espaciados a 1,83 m. La sección longitudinal de dicho modelo aparece en la figura 15.

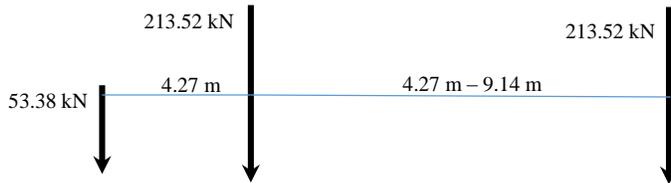


Figura 15. Sección longitudinal y distribución de pesos por ejes del modelo 1 de carga vertical móvil de diseño propuesta.

Luego de aplicar el proceso iterativo explicado anteriormente, para el modelo 2, se obtuvo una solicitación de momento flector de 2599 kNm, que difiere en un 0.07 % del valor de solicitación extrapolada para un período de 75 años. El modelo 2 resulta en un eje de 201,3 kN, que se coloca en la posición que resulta crítica para la solicitación que se está analizando. La sección transversal del eje mostraría que los ejes de neumáticos están espaciados a 1,83 m. La carga uniformemente distribuida, en toda la longitud cargada, es igual a 9.34 kN/m.

Conclusiones

Se procesaron estadísticamente los momentos flectores obtenidos para aquellas siluetas que producían efectos mayores que el 75 % del valor de la solicitación del vehículo de diseño, obteniendo una función de extrapolación que permitió estimar los efectos del tráfico para períodos de 25, 50, 75 y 100 años.

Se comprueba la hipótesis de que los momentos flectores que producen las siluetas más pesadas que componen el parque vehicular analizado, sobre el puente de Mejía, exceden (en un 14 %) a los que resultan de la aplicación del vehículo normativo HS25, para un período de diseño de 75 años.

Se ilustró el procedimiento para la obtención de modelos de cargas verticales móviles en el prototipo basado en la tipología constructiva del Puente de Mejía y se obtuvieron dos modelos de cargas de diseño, uno de ellos escalando el HS20 en un 30 % y el otro, conformado por un eje cargado, integrado a una carga de carril uniformemente distribuida que lograr responder a la solicitación máxima de momento flector para un período de 75 años con márgenes de error de 0.20 % y 0.07 %; respectivamente.

Conflictos de intereses

Los autores no poseen conflictos de intereses.

Contribución de los autores



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

1. Conceptualización: Luis Antonio Zambrano Beltrón, Jonathan Julián Vega Sabando, Carlos Gustavo Villacreses Viteri.
2. Curación de datos: Jonathan Julián Vega Sabando, Carlos Gustavo Villacreses Viteri.
3. Análisis formal: Luis Antonio Zambrano Beltrón, Jonathan Julián Vega Sabando.
4. Investigación: Luis Antonio Zambrano Beltrón, Jonathan Julián Vega Sabando
5. Metodología: Luis Antonio Zambrano Beltrón, Jonathan Julián Vega Sabando
6. Recursos: Jonathan Julián Vega Sabando, Carlos Gustavo Villacreses Viteri.
7. Software: Jonathan Julián Vega Sabando, Carlos Gustavo Villacreses Viteri.
8. Supervisión: Carlos Gustavo Villacreses Viteri.
9. Validación: Jonathan Julián Vega Sabando.
10. Visualización: Luis Antonio Zambrano Beltrón.
11. Redacción – borrador original: Luis Antonio Zambrano Beltrón, Jonathan Julián Vega Sabando, Carlos Gustavo Villacreses Viteri.
12. Redacción – revisión y edición: Luis Antonio Zambrano Beltrón, Jonathan Julián Vega Sabando, Carlos Gustavo Villacreses Viteri.

Financiamiento

La investigación no requirió fuente de financiamiento externa.

Referencias

- Crespo-Minguillon, C., & Casas, J. R. (1997). A comprehensive traffic load model for bridge safety checking. *Structural safety*, 19(4), 339-359. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167473097000167>
- de Normalización, A. E. (2009). Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- Ferreira, L. M. (2006). *Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto* Universidade de São Paulo]. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-27072006-110602/publico/Tese.pdf>
- Ghosn, M., & Moses, F. (1985). Markov renewal model for maximum bridge loading. *Journal of engineering mechanics*, 111(9), 1093-1104. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1985\)111:9\(1093\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9399(1985)111:9(1093))



- Guillén Sánchez, M. J. (2016). *Calibración del modelo de carga vertical móvil para puentes de carretera de tipología cubana, utilizando datos de aforos manuales* Universidad de Holguín, Facultad de Ingeniería, Departamento de Construcciones].
- Hwang, E.-S., & Koh, H.-M. (2000). Simulation of bridge live load effects. IABSE Congress Report,
- Macías Moreira, L. J. (2019). *Resultados del espectro de cargas pesadas que transitan por los accesos viales de la ciudad de Jipijapa* JIPIJAPA-UNESUM]. <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/1684>
- Miao, T., & Chan, T. H. (2002). Bridge live load models from WIM data. *Engineering structures*, 24(8), 1071-1084. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029602000342>
- Ministerio del transporte y obras públicas del Ecuador. (2013). Especificaciones generales para la construcción de puentes y carreteras. In *academia.edu*. https://www.academia.edu/download/47705085/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_3.pdf
- Nowak, A. S. (1993). Live load model for highway bridges. *Structural safety*, 13(1-2), 53-66. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167473093900486>
- Nowak, A. S., & Hong, Y.-K. (1991). Bridge live-load models. *Journal of Structural Engineering*, 117(9), 2757-2767. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:9\(2757\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:9(2757))
- Nowak, A. S., & Lind, N. C. (1979). Practical bridge code calibration. *Journal of the structural division*, 105(12), 2497-2510. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JSDEAG.0005307>
- Osejo Mora, O. M. (2020). *Estudio de la relación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad estático para hormigones fabricados con cemento por rendimiento y compuesto en el Ecuador* Quito]. <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/8822/1/991473328706366.pdf>
- Radelat, G. (2003). Principios de Ingeniería de Tránsito, Institute of Transportation Engineers, 300 pp. *Washington DC, EE. UU.*
- Rossigali, C. E. (2006). *Estudos probabilísticos para modelos de cargas móveis em pontes rodoviárias no Brasil* Master Thesis (in Portuguese), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil].
- Rossigali, C. E., Pfeil, M. S., Battista, R. C., & Sagrilo, L. V. (2015). Towards actual Brazilian traffic load models for short span highway bridges. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 8, 124-139. <https://www.scielo.br/j/riem/a/xNptpZT5b3BCkSwCSx5nP6x/?format=html&lang=en>
- van der Spuy, P., & Lenner, R. (2019). Towards a new bridge live load model for South Africa. *Structural Engineering International*, 29(2), 292-298. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10168664.2018.1561168>

