

Identificación modal de puentes segmentales mediante simulaciones numéricas de pruebas de vibración forzada con vehículos

Modal identification of segmental bridge using numerical simulations of forced vibration testing with vehicles

Wilson Hernandez 

Álvaro Viviescas 

Universidad Industrial de Santander, Colombia

Carlos Alberto Riveros Jerez 

Universidad de Antioquia, Colombia

OPEN  ACCESS

Recibido: 17/03/2021

Aceptado: 23/06/2021

Publicado: 10/09/2021

Correspondencia de autores:
carlos.riveros@udea.edu.co



Copyright 2020
by Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Identificar parámetros influyentes en pruebas de vibración forzada con el fin de fomentar la implementación de pruebas dinámicas en puentes segmentales. Las condiciones topográficas y altas especificaciones técnicas de los recientes proyectos de infraestructura vial ejecutados por el gobierno colombiano ha impulsado la construcción de numerosos puentes segmentales. La Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP 14 no establece criterios específicos para la evaluación de puentes nuevos que permitan la evaluación estructural. **Metodología:** Con base en los parámetros identificados, se ejecutó un conjunto de simulaciones numéricas usando herramientas computacionales específicamente en análisis de historia tiempo para análisis de aceleraciones producto de circulación de vehículos pesados a distintas velocidades. **Resultados:** Se desarrolló un enfoque analítico para selección de velocidades de circulación para distintos tipos de vehículos de prueba. **Conclusiones:** Lo que permite obtener un conjunto de variables óptimas como velocidad, peso, posición de impacto y frenado para la ejecución de pruebas de vibración forzada que permitan complementar los resultados que se obtienen de pruebas de vibración ambiental.

Palabras clave: Análisis modal operacional, carga vehicular, identificación modal, pruebas dinámicas, prueba de vibración forzada, puente segmental, simulación numérica.

Abstract

Objective: To identify influential parameters in forced vibration tests in order to promote the implementation of dynamic tests in segmental bridges. The topographic conditions and high technical specifications of the recent road infrastructure projects executed by the Colombian government have prompted the construction of numerous segmental bridges. The Colombian Standard for Bridge Design - LRFD - CCP 14 does not establish specific criteria for the evaluation of new bridges that allow structural evaluation. **Methodology:** Based on the identified parameters, a set of numerical simulations was executed using computational tools specifically in Time History analysis for the analysis of accelerations resulting from the circulation of heavy vehicles at different speeds. **Results:** An analytical approach was developed for selection of circulations speeds for different types of test vehicles. **Conclusions:** which allows obtaining a set of optimal variables such as speed, weight, impact position and braking for the execution of forced vibration tests that allow complementing the results obtained from ambient vibration tests.

Keywords: Dynamic testing, forced vibration test, modal identification, numerical simulation, operational modal analysis, segmental bridge, vehicle load.

Introducción

A finales de la década de los 90, en aras de preservar la integridad de los puentes del país, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) implementó el sistema de administración de puentes de Colombia (SIPUCOL) como herramienta para evaluación estructural a partir de inspecciones visuales [1]. El resultado de estas inspecciones cualitativas depende del criterio y experiencia del evaluador y en muchas ocasiones los daños son detectados por inspección visual cuando estos comprometen la integridad estructural [2]. Para la recepción de puentes nuevos, la Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP 14 [3] afirma que los puentes existentes se pueden instrumentar para establecer los efectos de las fuerzas y la capacidad de carga pero no indica cuáles pruebas realizar, ni sugiere normativa adicional de referencia, por lo que deja un vacío importante en la determinación de criterios de evaluación y validación del comportamiento estructural respecto a las suposiciones iniciales de diseño. En años recientes, el gobierno colombiano ha impulsado la competitividad del país mejorando la infraestructura vial con el desarrollo de ambiciosos proyectos de infraestructura, los cuales por las condiciones topográficas han requerido la implantación de puentes de grandes luces para lograr las velocidades de diseño requeridas, en los cuales para el rango de las grandes luces predomina la tipología de puente con sección viga cajón construido por voladizos sucesivos.

Para esta tipología se ha evidenciado en la literatura científica, la aparición de deflexiones excesivas en centro de luz, fisuración en los elementos en la sección transversal, entre otros, fenómenos que pueden afectar la calidad de servicio de la estructura y en varias ocasiones incluso ocasionar su colapso, con las subsecuentes pérdidas económicas [4]. Por estas razones, es importante profundizar en el conocimiento del comportamiento dinámico de la tipología de puente dominante en Colombia para el rango de las grandes luces, como lo es la sección viga cajón construido por voladizos sucesivos con miras a establecer líneas base confiables para su posterior monitoreo permanente. El deterioro de la infraestructura vial por efectos de fatiga y factores ambientales motivó el desarrollo de herramientas y métodos robustos en la década de los 60 para evaluar, monitorear el estado de salud y detectar algún posible daño en la estructura [5]. Se desarrollaron diversos métodos y técnicas basados en pruebas no destructivas (NDT) como vibraciones, emisión acústica, termografía infrarroja entre otros [6] Dentro de estos tipos de pruebas se destacan aquellas que a partir de vibraciones permiten caracterizar dinámicamente la estructura ya sea con fuerza aplicada (vibración forzada) o las que proporciona el ambiente (vibración ambiental). El objetivo principal, a grandes rasgos, es la detección de cambios considerables en las propiedades dinámicas; temas en los que se han ejecutado diversas pruebas de vibración ambiental (AVT) y forzada (FVT) en múltiples estructuras como edificios [7], puentes [8], represas [9].

Para la caracterización dinámica de puentes de grandes luces, algunos investigadores han desarrollado ciertas recomendaciones para ejecutar pruebas de vibración ambiental, aplicables a cualquier tipología, como el tiempo de medición [10] y ubicación de sensores [11]; caso contrario sucede para las pruebas de vibración forzada donde éstas dependen de la longitud de la luz mayor, tipología del puente y fuente de excitación usada por lo que no se tiene un marco de referencia general que pueda ser aplicable. [12] documentó los métodos más habituales para ejecutar pruebas dinámicas apropiadas en puentes mencionando las fuentes de excitación como lo es el ambiente y dispositivos mecánicos como desplazamiento, agitadores e impacto enfatizando la longitud del vano más largo máxima en la que es viable usar estas fuentes. En general los dispositivos mecánicos tienen a ser usados en puentes de luz corta ($L < 50\text{m}$) ya que la masa y fuerza inducida por los aparatos debe ser proporcional a la masa del puente [10,13,14]; en casos excepcionales con los equipos adecuados y recursos suficientes se pueden superar estas distancias, para el caso de puentes de luces mayores a 50m predomina el uso de fuentes ambientales. A pesar de las bondades de las vibraciones

ambientales en el amplio rango de luz para la caracterización dinámica de puentes, la identificación de las propiedades dinámicas está sujeta al contenido energético de la señal de entrada al puente lo que a su vez limita la identificación de ciertas propiedades dinámicas en las direcciones ortogonales.

Un ejemplo de esto es reportado por [15], quienes estudiaron el comportamiento dinámico de un puente de sección viga cajón construido por voladizos sucesivos con pruebas de vibración ambiental donde únicamente lograron identificar formas modales en dirección transversal al tablero. Ambos tipos de pruebas han sido comparados experimentalmente como lo reportan [16] quienes ejecutaron pruebas de vibración ambiental y forzadas para analizar la calidad de la información obtenida de ambas pruebas encontrando notables diferencias entre estas, como lo son mayor cantidad de frecuencias encontradas y picos del espectro de potencia mejor definidos en pruebas FVT que en aquellas usando vibración ambiental; algo similar fue documentado por [17] en un puente viga losa de tramos de 40m de luz mayor usando vibraciones ambientales y forzadas mediante impactos con dispositivo mecánico como fuentes de excitación en el que identificaron mayor cantidad de frecuencias y formas modales con pruebas FVT además las formas modales estaban mejor definidas y con mayor consistencia respecto el modelo numérico. Investigaciones similares en puentes de grandes luces comparando pruebas AVT y FVT se han realizado en puentes atirantados [8,18], aunque estudios en puentes de sección viga cajón construidos por voladizos sucesivos, siendo la tipología dominante en Colombia, no han sido documentados. Lo anterior deja al descubierto ciertos vacíos en la investigación relacionado con la caracterización dinámica de esta tipología de puentes que, aunque es cierto que han sido estudiados con pruebas AVT con resultados parciales [15], puesto que no se logran excitar algunos modos que son importantes en respuesta dinámica, aún no se han ejecutado pruebas de vibración forzada que ayuden a complementar estas investigaciones.

En ese orden de ideas, la selección de la fuente de excitación forzada representa el hito de partida, lo que lleva a guiar el estudio por el camino recorrido por [10,11,12] para concluir que el uso de vehículos pesados representa el medio viable para la excitación de esta tipología de puentes en función de la longitud mayor del vano [19,20,21]. Lo anterior es consistente con lo reportado [22,23,24,25,26] que usando vehículos pesados identificaron propiedades dinámicas de puentes de grandes luces como atirantados y colgantes. El uso de dispositivos mecánicos con las características dinámicas adecuadas para excitar un puente de gran luz podría ser excesivamente costoso, esto es soportado por [11] que en el año 2000 desarrolló un estudio comparativo entre pruebas AVT y FVT (usando agitadores mecánicos e impacto) analizando costos de ejecución, personal y preparativos necesarios en cada prueba donde salta a la vista presupuestos hasta 72 veces mayores para pruebas FVT con un incremento sustancial en la complejidad de preparación y ejecución de las pruebas. Buscando la aplicabilidad de pruebas FVT para la tipología de puente dominante en Colombia es preciso usar dispositivos mecánicos de relativo bajo costo como lo son los vehículos. Son varios factores que intervienen en la respuesta dinámica como lo es el tipo de vehículo, velocidad, peso, propiedades mecánicas de la suspensión entre otros como lo sugiere [27, 28]. Estos parámetros presentan nuevas incertidumbres ¿Cuál es la velocidad adecuada para excitar dinámicamente el puente? ¿Cuáles formas modales se identifican bajo el caso de carga propuesto? ¿Cuál es el peso y distribución de ejes óptimo para ejecutar las pruebas FVT? En vista de estas incertidumbres y teniendo en cuenta el crecimiento en los últimos años del número de puentes de grandes luces por voladizos sucesivos en Colombia, el Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME) adscrito a la Universidad Industrial de Santander - UIS ha incrementado su interés en profundizar en el conocimiento de la respuesta dinámica de este tipo de estructuras.

Con ese objetivo, se desarrolla un proyecto de investigación que busca estudiar la ventaja de complementar la vibración ambiental y forzada para poder enriquecer la caracterización dinámica de este tipo de

estructuras que además de dominar actualmente las grandes luces en Colombia tiene un importante desarrollo en otros países latinoamericanos como México, Brasil y que incluso a pesar del avance de los métodos de construcción prefabricada sigue vigente en países desarrollados como USA, España, Portugal, etc. Se presentan aquí los resultados de la primera fase de la investigación, consistente en el diseño del experimento a partir de simulaciones numéricas para la realización de las pruebas de vibración forzada en un puente de sección viga cajón construido por voladizos sucesivos usando vehículos circulando sobre el tablero a velocidad constante. Se describen algunas de las ventajas y limitaciones en el tema para luego presentar el caso de estudio junto con el modelo numérico de elementos finitos realizado, los casos de carga propuestos y finalmente, los resultados obtenidos para las distintas simulaciones planteadas.

Pruebas de vibración forzada con vehículos

Las pruebas dinámicas que involucran fuerzas artificiales se caracterizan por magnitud y dirección conocida de la fuerza de entrada, siendo éstas controladas por el operador, lo que permite reducir las distorsiones en la señal a causa del ruido ambiental. Los métodos más conocidos para inducir estas fuerzas son impacto, liberación de carga, agitadores. Según [21], la carga móvil se puede clasificar como una prueba transitoria en la que la fuerza de entrada no es medida pero es controlada y aplicada a voluntad mediante el flujo de vehículos sobre el tablero lo que permite identificar las propiedades dinámicas del puente [29]. Esta fuerza inducida resulta ser un fenómeno complejo que involucra variables como: peso de vehículo, distribución de ejes (cantidad y separación), velocidad de circulación, propiedades mecánicas de la suspensión, presión de llantas, rugosidad del pavimento, interacción dinámica vehículo – puente. Estas variables, propias de la fuente de excitación, han sido estudiadas previamente por autores como [22,30] que investigaron la interacción vehículo-puente como el fenómeno que es generado por el acoplamiento de frecuencias entre el puente y camión, ya que al estar en contacto se genera un sistema acoplado que cambia a medida que este se mueve sobre el tablero modificando las propiedades geométricas del puente y vehículo lo que sugiere una variación de frecuencias en función de la relación de masas entre el puente y el camión [28]. La rugosidad del pavimento no puede ser omitida como lo sugiere [31] ya que el espesor de la capa se relaciona con las vibraciones producidas, también encontraron que las velocidades altas de circulación no siempre generan más vibraciones puesto que esto se relaciona con la rugosidad y el estado del pavimento. Un estudio reportado por [27] encontró que camiones de igual peso pero con diferentes propiedades de suspensión alteraban las frecuencias detectadas al incrementar o reducir el valor respecto las pruebas de referencia como vibración ambiental. Para analizar la influencia de dichos parámetros en la respuesta dinámica de un puente de gran luz de sección viga cajón construido por voladizo sucesivos se proponen un conjunto de simulaciones numéricas a partir de la selección rigurosa de los parámetros a modelar.

Selección de parámetros para simulaciones numéricas – Modelo FEM

Para las simulaciones numéricas propuestas, la selección de los parámetros listados previamente parte del vehículo de prueba, ya que este lleva implícito el peso, separación y cantidad de ejes. Generalmente, las investigaciones documentadas a la fecha usan camiones pesados de más de 18 Ton [22,32,33,34] lo que lleva a cuestionar ¿con vehículos de menor peso y distinta configuración de ejes es viable ejecutar pruebas FVT y tener resultados válidos en cuanto a la identificación de propiedades dinámicas? Para resolver esta duda fue pertinente proponer distintos vehículos de prueba abarcando desde un sedán 4 puertas hasta una volqueta de 3 ejes, todos los vehículos disponibles en el mercado colombiano. El vehículo 1 (V1) – auto- se tomó pensando en un auto sedan liviano comercial en Colombia; cada modelo de auto de cada marca

tiene pesos y distancias de ejes diferentes pero el peso está en el rango de 1.3 y 1.5Ton, distancia de ejes entre 2.6 y 2.8m. Para la camioneta – V2- el rango de peso y distancia de eje está entre 1.9 - 2.1Ton y 3 – 3.2m respectivamente. Sucede algo similar para las volquetas de 2 (V3: sin carga; V4: con carga) y 3 ejes (V5: sin carga; V6: con carga), donde la capacidad máxima de carga es tomada de las fichas técnicas. Los parámetros de rigidez y amortiguamiento de la suspensión no están indicados textualmente en la ficha técnica de los vehículos o fabricantes de las piezas ya que manejan otro tipo de información como carga máxima y no datos de tasa de deformación o directamente valores rigidez y amortiguamiento con respectivas unidades; sucede algo similar con la presión de llantas ya que esta interviene directamente en la deformación, en conjunto, del sistema de rodadura por lo que asumir valores de estos parámetros no sería razonable puesto que podrían distar de valores reales y conducir a falsas identificaciones; la rugosidad del pavimento es otro parámetro que no se puede establecer a priori pues varía en función de condiciones ambientales (seco, húmedo, lluvioso), desgaste del material, propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica entre otros lo que podría alterar los resultados dinámicos del análisis numérico por lo que no serán ingresados en las simulaciones numéricas.

Por simplicidad del problema numérico no se consideró el efecto de la frecuencia natural del vehículo durante el paso sobre el tablero. Documentos normativos como [32,33] recomiendan velocidades de tránsito “seguras” lo que posiblemente hace referencia a velocidades bajas pero ¿con velocidades altas de circulación se obtienen resultados dinámicos válidos? En la década de los años 50 -70's el Laboratorio Federal Suizo para Pruebas de Materiales e Investigación - EMPA - desarrolló una extensa investigación en los puentes de suiza ejecutando pruebas de vibración forzada con camiones y resaltos para estudiar el fenómeno de amplificación dinámica [22]. Para ello usaron camiones de distintas configuraciones de peso, número y distancia de ejes con velocidades entre 10 y 90km/h.

Este precedente mostró el camino para el rango de velocidades a tomar en este estudio seleccionando 5 velocidades de prueba como 10–20–40–60–80km/h. La ejecución de las campañas experimentales y el procesamiento de las señales suma incógnitas al problema como lo son la ubicación y configuración de sensores, frecuencia de muestreo, resolución de frecuencia y tiempo de medición. Estos se relacionan directamente con la cantidad de acelerómetros disponibles y en general son parámetros definidos a criterio profesional del director de prueba por lo que no existe respuesta única a este problema. Haciendo un barrido identificando estos parámetros en las referencias presentadas [8,9,10,11,12,13,14] se obtuvo la Tabla 2; para los 4 parámetros estudiados los resultados no son concluyentes y presentan gran variación lo que sugiere usar otra técnica estadística de análisis como cuartiles para datos agrupados. Los datos se reordenaron en función del parámetro estudiado y se tomó el rango entre el 25 y 75% de los datos. Para la distancia relativa con ubicaciones entre $L/4$ y $L/9$, distancia absoluta entre 4 y 28.25m, frecuencia de muestreo entre 100 y 256Hz y tiempo de medición entre 3 y 16 minutos. [15,16,17,18,19,20,21,22]

Tabla 1. Análisis estadístico de distancia relativa [adimensional]

| Propiedad | RANGO | Moda | Mediana | Promedio | Desviación |
|--------------------|----------------|------|---------|----------|------------|
| Distancia relativa | L < 50m | 4 | 4 | 5.4 | 2.88 |
| | 50m < L < 200m | 8 | 9 | 10.89 | 8.5 |
| | L > 200m | 4 | 5 | 9.19 | 10.68 |
| | Total | 4 | 5 | 7.46 | 6.97 |
| Distancia absoluta | L < 50m | 15 | 5.375 | 6.62 | 4.52 |
| | 50m < L < 200m | 10.9 | 10.9 | 29.48 | 48.55 |
| | L > 200m | 48 | 78.125 | 84.59 | 35.94 |
| | Total | 15 | 9.25 | 27.64 | 41.27 |
| Frecuencia muestro | L < 50m | 100 | 180 | 372.24 | 19.38 |
| | 50m < L < 200m | 1000 | 600 | 646 | 19.92 |
| | L > 200m | 100 | 100 | 143.2 | 6.57 |
| | Total | 100 | 200 | 390 | 17.66 |
| Tiempo de medición | L < 50m | 10 | 10 | 13.36 | 19.38 |
| | 50m < L < 200m | 10 | 10 | 16.1 | 19.92 |
| | L > 200m | 15 | 15 | 12.81 | 6.57 |
| | Total | 10 | 10 | 13.95 | 17.66 |

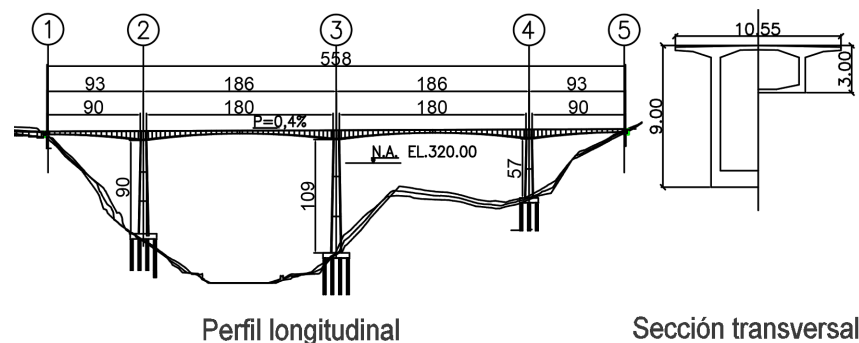
Fuente: elaboración propia

Siguiendo las recomendaciones de [11] se tomaron 3 puntos de medición representando un sensor de referencia y dos sensores móviles. Por lo anterior se tomaron puntos cada $L/6$ (30m) agrupados en 9 configuraciones de nodos a una frecuencia de muestreo de 200Hz para un rango de frecuencias de 0-10Hz con 1024 datos (resolución de frecuencia). El tiempo de medición está en función de la velocidad de circulación, para 10km/h es 200s y para 80 es 25s, por tanto, se tomó el tiempo máximo de circulación, 200s, como el tiempo de medición para todas las velocidades de circulación. Finalmente, los parámetros seleccionados fueron ingresados al software de elementos finitos MIDAS CIVIL® y a través de un análisis Time-History se obtuvieron los registros de aceleración para cada nodo del puente, estos datos fueron procesados en el software ARTEMIS® usando la técnica Frequency Domain Decomposition FDD [35].

Caso de estudio: Puente El Tablazo

Es un puente en concreto de 558m de longitud, de máxima luz libre de 180m (Figura 1), la altura de pilas oscila entre 57m en el acceso sur y 109m en el centro del puente con ancho de carril de 10.55m construido en 115 dovelas de sección cajón variable 3 a 9m y la pendiente longitudinal es 0.4%.

Figura 1. Perfil longitudinal y sección transversal



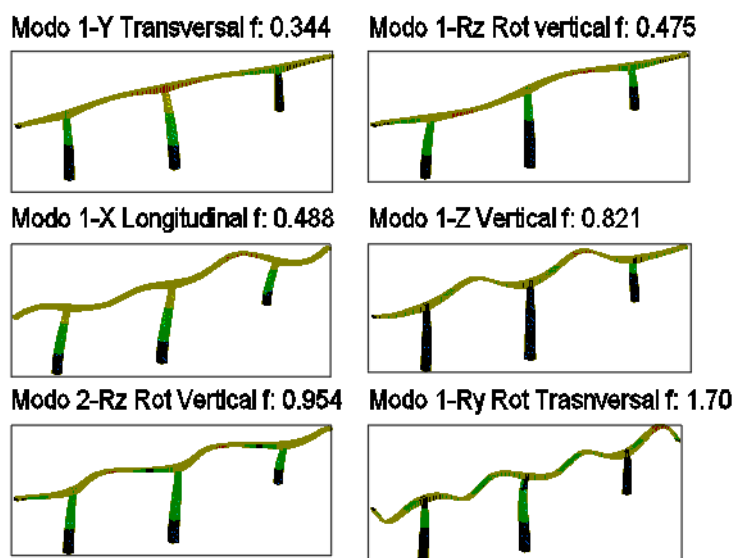
Fuente: Gobernación de Santander, ISAGEN

La resistencia del concreto a compresión es 35MPa para pilas y tablero, con acero de postensado de baja relajación (módulo elasticidad 1860MPa), este fue construido en la vía Bucaramanga – San Vicente de Chucurí (Santander) en zona de amenaza sísmica intermedia [36]. Con esta información se modeló el puente en el software MIDAS CIVIL® de elementos finitos considerando propiedades elásticas del material y fenómenos como Creep y Shrinkage usando 1228 elementos tipo BEAM. Se calcularon las propiedades dinámicas para 3 situaciones (Tablero horizontal – modelo base, acero de postensado, acero de postensado y etapas constructivas) a fin de reducir costo computacional. Al comparar el porcentaje de error en el valor de las frecuencias se encontró que no superaban el 3% de diferencia por lo que seleccionó el modelo con tablero horizontal con propiedades mecánicas de los materiales en rango elástico. La Figura 2 presenta las formas modales con mayor participación de masas.

Simulaciones numéricas

Usando las herramientas informáticas de MIDAS CIVIL® se planteó una serie de etapas para la circulación de los vehículos en el modelo numérico del puente El Tablazo mediante un análisis Time-History durante 200s a una frecuencia de muestreo de 200Hz calculando datos de desplazamiento, velocidad y aceleración en todos los nodos del modelo numérico. Un dato primario en la etapa de simulación es el valor de amortiguamiento, este se tomó como 1% siendo consistente a los valores registrados por [15] en el puente Guillermo Gómez Ortiz de tipología y características geométricas similares al puente de estudio. Adicionalmente, la señal de entrada está en dirección Z (vertical) por lo que los modos con participación en Y (transversal) como 1-Y, 1-RZ, 2-RZ no tendrán excitación alguna limitando la identificación a los modos 1-X, 1-Z, 1-RY. [23,24,25,26,27,28,29,30,31]

Figura 2. Formas modales con mayor participación de masas

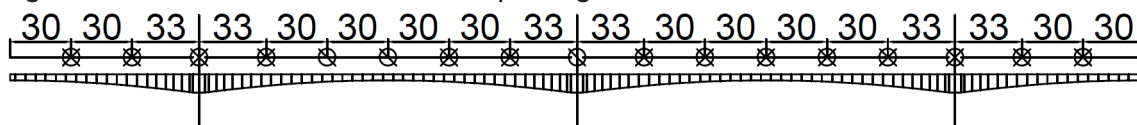


Fuente: elaboración propia

Etapa 1: pruebas a distintas velocidades

En esta etapa cada vehículo de prueba circuló a velocidades de 10–20–40–60–80km/h procesando los registros de aceleraciones en ARTEMIS®, no se incluyó distorsión de la señal por ruido ambiental). La Figura 3 presenta la ubicación esquemática de los nodos del puente para la extracción de los registros de aceleraciones. Para validar y organizar la información se tomó como referencia el índice MAC, porcentaje de error relativo en frecuencia y valor del pico máximo de cada modo en el espectro de potencia. Dado que el valor de frecuencia del pico máximo de energía es diferente para cada simulación y en ocasiones este no coincide con la frecuencia de mayor índice MAC [37] se tomó un rango de frecuencias para los 3 modos objetivo (modos 1-X, 1-Z, 1-RY) con 6 valores entre 0.459-0.508Hz (1-X), 0.791-0.84Hz (1-Z) y 1.68 -1.729Hz (1-RY). Para cada rango de frecuencia se tomó el valor promedio del índice MAC de los modos, la frecuencia con mayor índice MAC y finalmente, el pico de mayor magnitud en cada rango de frecuencia. Luego se organizó la información de mayor a menor, para cada modo, dejando en primer lugar, las velocidades con mayor índice MAC, menor porcentaje de error en la frecuencia y el pico de energía más alto (mayor magnitud). Teniendo presente que el índice MAC mide la consistencia o correlación de cada modo experimental con el modo referencia, se multiplico el valor de frecuencia por el índice MAC correspondiente para evitar seleccionar frecuencias que tienen formas modales poco consistentes con el modo calculado numéricamente.

Figura 3. Ubicación de nodos seleccionados para registros de aceleraciones



Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Velocidades con mayor índice MAC, menor porcentaje de error relativo de frecuencia y magnitud pico de espectro de potencia

| Vehículo | Parámetro | Simulaciones | | | Moda [km/h] | | | | |
|----------|-------------|--------------|----------|-----------|-------------|----|----|----|----|
| | | Modo 1- X | Modo 1-Z | Modo 1-Ry | 10 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| V1 | MAC | 40 | 10 | 20 | 3 | 1 | 3 | 0 | 2 |
| | %Error Frec | 10 | 40 | 10 | | | | | |
| | Espc pot | 80 | 40 | 80 | | | | | |
| V2 | MAC | 60 | 10 | 20 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| | %Error Frec | 80 | 40 | 20 | | | | | |
| | Espc pot | 80 | 40 | 20 | | | | | |
| V3 | MAC | 60 | 20 | 20 | 0 | 5 | 1 | 3 | 0 |
| | %Error Frec | 20 | 40 | 20 | | | | | |
| | Espc pot | 60 | 60 | 20 | | | | | |
| V4 | MAC | 60 | 10 | 20 | 1 | 2 | 3 | 3 | 0 |
| | %Error Frec | 40 | 40 | 20 | | | | | |
| | Espc pot | 60 | 40 | 60 | | | | | |
| V5 | MAC | 60 | 10 | 20 | 1 | 2 | 3 | 3 | 0 |
| | %Error Frec | 60 | 40 | 20 | | | | | |
| | Espc pot | 60 | 40 | 40 | | | | | |
| V6 | MAC | 60 | 10 | 20 | 2 | 2 | 2 | 3 | 0 |
| | %Error Frec | 20 | 40 | 10 | | | | | |
| | Espc pot | 60 | 40 | 60 | | | | | |

Fuente: elaboración propia

Por último, para las velocidades que estaban en los primeros puestos, se computaba el valor de moda siendo las velocidades más adecuadas, aquella con mayor moda. La Tabla 2 presenta los resultados finales de las velocidades óptimas para cada vehículo de prueba. Ahora bien, dado que algunas velocidades se repiten más de una vez ¿Cuáles y cuantas deberían seleccionarse? La cantidad va limitada por el tiempo en la prueba real, por lo que a lo mucho 3 velocidades es razonable. También se podría preguntar ¿se mejorarían los resultados si estas velocidades se repiten 2 o 3 veces? Responder estas preguntas constituye la siguiente etapa del artículo.

Etapa 2: Repeticiones de velocidad

A partir de los resultados de la Tabla 2 se tomaron 3 velocidades para cada vehículo de prueba; para el automóvil se seleccionó 10-40-80km/h, para la camioneta 20-40-80km/h y para las volquetas de 2 y 3 ejes 20-40-60km/h. Realizando el procedimiento descrito en la etapa anterior se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3, en ella predominan las velocidades con 2 repeticiones, aunque esto puede estar relacionado con el tipo de vehículo. Ahora bien ¿mejorarían los resultados en las propiedades dinámicas (índice MAC, porcentaje de error relativo de frecuencia) si se combinan distintas velocidades? Para ello, se presenta la siguiente etapa en la investigación.

Tabla 3. Velocidades con mayor índice MAC, menor porcentaje de error relativo de frecuencia y magnitud pico de espectro de potencia para 2 y 3 repeticiones

| Vehículo | Parámetro | Velocidad [km/h] | | | Moda [km/h] / Repetición | | | | | | | | | |
|----------|-------------|------------------|----------|-----------|--------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | Modo 1-X | Modo 1-Z | Modo 1-RY | 10 | 10 | 20 | 20 | 40 | 40 | 60 | 60 | 80 | 80 |
| | | | | | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| V1 | MAC | 80-2rep | 10-2rep | 10-2rep | | | | | | | | | | |
| | %Error Frec | 80-3rep | 40-2rep | 80-3rep | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 |
| | Espc pot | 80-2rep | 40-2rep | 80-3rep | | | | | | | | | | |
| V2 | MAC | 80-2rep | 20-2rep | 40-2rep | | | | | | | | | | |
| | %Error Frec | 80-3rep | 40-2rep | 80-3rep | 0 | 0 | 1 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| | Espc pot | 80-2rep | 40-2rep | 20-3rep | | | | | | | | | | |
| V3 | MAC | 60-3rep | 20-2rep | 40-2rep | | | | | | | | | | |
| | %Error Frec | 60-3rep | 40-2rep | 60-3rep | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 0 | 0 |
| | Espc pot | 40-3rep | 60-2rep | 20-3rep | | | | | | | | | | |
| V4 | MAC | 60-3rep | 20-2rep | 40-2rep | | | | | | | | | | |
| | %Error Frec | 60-3rep | 40-2rep | 40-2rep | 0 | 0 | 2 | 0 | 3 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| | Espc pot | 40-3rep | 20-2rep | 60-3rep | | | | | | | | | | |
| V5 | MAC | 60-3rep | 20-2rep | 40-2rep | | | | | | | | | | |
| | %Error Frec | 60-3rep | 40-2rep | 40-2rep | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| | Espc pot | 60-2rep | 40-2rep | 40-3rep | | | | | | | | | | |
| V6 | MAC | 40-2rep | 20-2rep | 40-2rep | | | | | | | | | | |
| | %Error Frec | 60-3rep | 40-2rep | 60-3rep | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| | Espc pot | 60-2rep | 40-2rep | 40-3rep | | | | | | | | | | |

Fuente: elaboración propia

Etapa 3: Combinaciones de velocidad

Como punto de partida se tomaron las velocidades de la etapa 2 para proponer las combinaciones de velocidad de la Tabla 4 que surgían del método heurístico. Para analizar y comparar los resultados se

usó el mismo procedimiento de las etapas anteriores en cuanto al cálculo del índice MAC, porcentaje de error relativo de frecuencia y pico de espectro de potencia. En la Tabla 4 se muestran las combinaciones con mejores resultados para cada modo junto con la cantidad de repeticiones de cada combinación por vehículo. A primera vista, las pruebas FVT con vehículos livianos dan mejores resultados con un rango amplio de velocidades de 20 hasta 80km/h y en los vehículos más pesados como volquetas de 2 y 3 ejes entre 20 y 60km/h. Para el vehículo 1 la mejor combinación de velocidades es P5, para V2 es P5, para V3 es P5, para V4 a V6 es P3.

Tabla 4. Combinaciones de velocidad propuestas para cada vehículo

| Vehículo | Parámetro | Combinación velocidad | | | Moda Combinación de velocidad | | | | | | |
|----------|-------------|-----------------------|--------------|--------------|-------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| | | Modo 1-X | Modo 1-Z | Modo 1-RY | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 |
| V1 | MAC | P6: 40-80-80 | P1: 10-40-80 | P2: 20-40-80 | 1 | 2 | 0 | 0 | 3 | 3 | 0 |
| | %Error Frec | P2: 20-40-80 | P5: 10-40-80 | P5: 10-40-80 | | | | | | | |
| | Espc pot | P6: 40-80-80 | P5: 10-40-80 | P6: 40-80-80 | | | | | | | |
| V2 | MAC | P5: 40-80-80 | P6: 20-40-40 | P1: 20-40-80 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 | 3 | 0 |
| | %Error Frec | P5: 40-80-80 | P6: 20-40-40 | P1: 20-40-80 | | | | | | | |
| | Espc pot | P5: 40-80-80 | P6: 20-40-40 | P5: 40-80-80 | | | | | | | |
| V3 | MAC | P4: 40-60-60 | P3: 40-60 | P5: 40-40-60 | 1 | 0 | 1 | 3 | 3 | 0 | 1 |
| | %Error Frec | P4: 40-60-60 | P5: 40-40-60 | P7: 20-60-60 | | | | | | | |
| | Espc pot | P4: 40-60-60 | P5: 40-40-60 | P1: 20-60 | | | | | | | |
| V4 | MAC | P4: 40-60-60 | P1: 40-60 | P2: 20-40-60 | 1 | 1 | 3 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| | %Error Frec | P7: 20-60-60 | P3: 40-40-60 | P7: 20-60-60 | | | | | | | |
| | Espc pot | P4: 40-60-60 | P3: 40-40-60 | P3: 40-40-60 | | | | | | | |
| V5 | MAC | P1: 40-60 | P2: 20-40-60 | P3: 40-40-60 | 1 | 1 | 4 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| | %Error Frec | P4: 40-60-60 | P3: 40-40-60 | P4: 40-60-60 | | | | | | | |
| | Espc pot | P4: 40-60-60 | P3: 40-40-60 | P3: 40-40-60 | | | | | | | |
| V6 | MAC | P3: 40-40-60 | P1: 40-60 | P3: 40-40-60 | 2 | 0 | 5 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | %Error Frec | P3: 40-40-60 | P1: 40-60 | P4: 40-60-60 | | | | | | | |
| | Espc pot | P4: 40-60-60 | P3: 40-40-60 | P3: 40-40-60 | | | | | | | |

Fuente: elaboración propia

Etapas 4: Fenómenos adicionales para las pruebas de vibración forzada con camiones – fuerzas de impacto y frenado

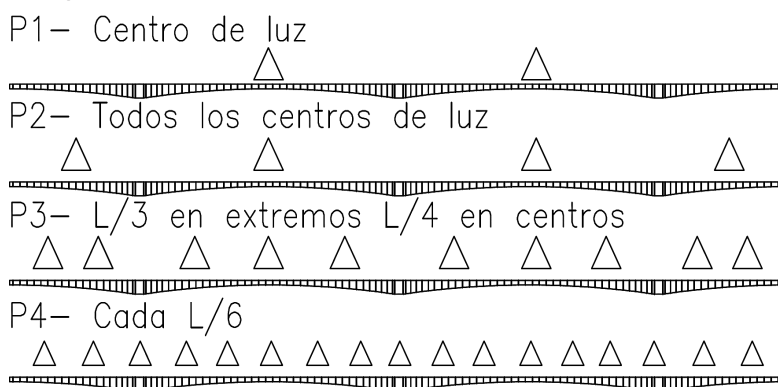
Investigaciones realizadas por [22,24,25] han considerado fenómenos como impacto y frenado en sus experimentos bajo la suposición que se mejoran los resultados de ciertos modos en la identificación dinámica. Cuando un vehículo pasa por determinado resalto, al caer genera un impacto sobre el tablero, lo que a primera vista podría relacionarse con el lanzamiento de un proyectil en tiro parabólico que requiere calcular la velocidad de caída y la altura máxima alcanzada. Al caer el eje del camión sobre el tablero se puede producir un rebote lo que lleva a considerar una disipación de energía mediante choques inelásticos, esta disipación viene dada por un coeficiente de restitución desconocido ya que depende de las propiedades mecánicas de la suspensión del camión. Sumado a esto, para calcular la fuerza de impacto se debe relacionar el trabajo con la energía potencial elástica por lo que es necesario conocer los valores de rigidez o deformación de la suspensión. En vista que resolver el problema de la fuerza de impacto involucra variables ajenas al control del experimento como las propiedades mecánicas de la suspensión donde los valores reales pueden diferir ampliamente de los datos propuestos se hizo una simplificación al problema

eliminando el rebote de la ecuación. Se tomó la altura del resalto de 5cm y la velocidad de circulación del camión sobre el tablero se limitó a 40km/h por cuestiones de seguridad para pruebas a escala real, esta a su vez coincide como velocidad dominante en las etapas anteriores. Dado que el ángulo formado entre la altura del resalto y la distancia entre ejes del vehículo de prueba es menor a 1° se tomó este valor como límite máximo para la prueba y usando las ecuaciones cinemáticas de movimiento se calculó la altura máxima alcanzada. Usando la ecuación de trabajo y energía [38] se tiene la fuerza de impacto donde d representa la penetración del objeto en el terreno.

$$F = \frac{mgh}{d} \quad (1)$$

En este caso, la penetración se relaciona con la deformación en conjunto del sistema suspensión y llantas del camión lo que deja este valor como variable desconocida ya que a priori no se puede calcular sin antes considerar la rigidez, amortiguamiento y presión de llantas del sistema mencionado. De nuevo, resultaría imposible calcular la fuerza de impacto sin tener algún valor de deformación pero teóricamente este no puede ser menor al peso del cuerpo que cae. Con esto en mente es posible simplificar el proceso de cálculo al declarar la fuerza de impacto como el mismo peso del eje. Teniendo el problema de la fuerza de impacto resuelto surge la pregunta ¿Dónde instalar los resaltos? Algunos investigadores han optado por instalarlos en los centros de luz del puente, algunos en el mismo lugar en se instalan los sensores, otros cada cierta distancia y al parecer no hay una tendencia clara de donde instarlos. En ese caso, se proponen 4 ubicaciones de resalto como lo muestra la Figura 4.

Figura 4. Ubicación esquemática de resaltos en el tablero



Fuente: elaboración propia

Para seleccionar la posición de resalto más adecuada se hicieron simulaciones para cada vehículo comparando el índice MAC dando mejores resultados para la posición 2 (todos los centros de luz), para los seis vehículos de prueba (Índice MAC prom: 0.86); los modos identificados en esta etapa presentan alta correlación en el modo vertical y baja para los modos longitudinal y rotacional.

La fuerza de frenado es considerada en etapa de diseño por la Norma Colombiana de Diseño de Puentes – LRFD – CCP 14 [39] - como el 25% del peso del eje del camión o el 5% del camión de diseño más carga de carril. También comenta que “basándose en principios de energía y suponiendo desaceleración uniforme, la fuerza de frenado determinada como una fracción del peso del vehículo es”

$$b = \frac{v^2}{2ga} \quad (2)$$

Donde b es la fracción de peso, v es la velocidad de circulación, g es la gravedad y a es la longitud de desaceleración uniforme. Usando esta ecuación podría calcularse dicha fuerza en función de la velocidad que lleva el vehículo y la distancia en la que se detiene. Esto presenta una gran incógnita ¿Cuál es la constante de desaceleración del vehículo? ¿cómo calcular esta distancia? Cada fabricante de autos y frenos tiene distancias de frenado calculadas para cada modelo, donde estos parámetros pueden diferir en términos del funcionamiento y mantenimiento del sistema de frenos lo que acarrea cierto nivel de incertidumbre; al no tener certeza de este parámetro y en otras ocasiones esta información no está explícita en todos los modelos por lo que se requiere consultar una fuente comúnmente aceptada para tomar ese dato. Siendo así, el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras [40], establece distancias de visibilidad de parada en función de la velocidad del vehículo, definiendo esta distancia como “la distancia necesaria para que el conductor de un vehículo pueda detenerlo antes de llegar a un obstáculo que aparezca en su trayectoria al circular a la velocidad específica del elemento” por tanto, para la velocidad de 40km/h se tiene una distancia de parada de 50m.

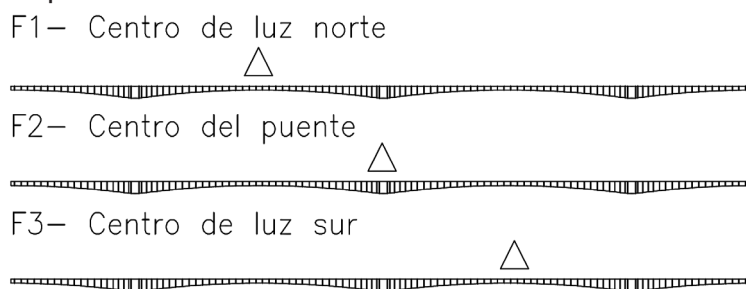
El factor de frenado, b , varía a medida que se reduce la velocidad y la distancia de frenado, por tanto se tendrían infinitos puntos de cálculo de dicho factor. Para simplificar el proceso, se calculó para distancias cada 5 m. Es importante anotar que dentro de la concepción del fenómeno del frenado no se consideró que el vehículo frenada completamente, sino que redujera la velocidad a 10km/h, siendo 10km/h la velocidad mínima del estudio, y acelerara de nuevo a 40km/h hasta salir del puente. De nuevo, la habilidad del conductor del vehículo será determinante a la hora de ejecutar la prueba en tanto frene en el lugar indicado y fuerza en el pedal adecuada. La siguiente tabla muestra el factor de frenado en función de la velocidad, para velocidades cercanas a 10km/h el factor es menor al 5% del peso del eje del vehículo. Esto conlleva a distribuir uniformemente las fuerzas de frenado en tramos de 5m para cada factor después del punto de parada agregando fuerzas longitudinales (Dir: X) sobre el tablero. Asumiendo que la constante de aceleración es igual a la de frenado se eliminan las fuerzas de frenado y se aumenta gradualmente la velocidad de circulación. Ambos casos de carga están coordinados en tiempo y espacio, es decir, trabajan al unísono. Técnicamente, el vehículo puede frenar en cualquier coordenada del puente, pero por cuestiones prácticas se seleccionaron 3 puntos de frenada, los vanos centrales y el centro del puente como se muestra en la Figura 5. La Tabla 5 contiene el factor de fuerza de frenado para determinada velocidad de circulación sobre el tablero del modelo FEM.

Tabla 5. Factores de fuerza de frenado en función de la velocidad

| Vel [Km/H] | Factor |
|------------|--------|
| 40 | 0.1258 |
| 36 | 0.1133 |
| 32 | 0.1007 |
| 28 | 0.0881 |
| 24 | 0.0755 |
| 20 | 0.0629 |
| 16 | 0.0503 |
| 10 | 0.0314 |

Fuente: elaboración propia

Figura 5. Ubicación esquemática de resaltos en el tablero



Fuente: elaboración propia

Para seleccionar la posición de frenada se comparó el índice MAC y el porcentaje de error para cada ubicación propuesta. La consistencia modal para cada vehículo de prueba difería para cada posición de frenada por lo que no se puede generalizar una sola posición, en general, se tiene una reducción de hasta 10% en la consistencia modal respecto los casos de carga de combinación de velocidades.

Etapa 5: Combinación de fenómenos: velocidad, impacto y frenado

En vista que usar fuerzas de impacto y frenado en todas las posiciones (configuraciones) de sensores resultó contraproducente surgió la idea de mejorar la correlación de las formas modales de interés combinando de forma gradual los fenómenos antes mencionados. Para esto, se tomó un vehículo de prueba para reducir el tiempo de cómputo (posiblemente no garantiza la extrapolación de resultados a los demás vehículos) seleccionando la volqueta de 3 ejes de 32Ton (V6) y tomando los mejores casos de carga (combinación de velocidades índice MAC 0.97; impacto en posición 2 índice MAC 0.86; frenado en centro luz acceso sur índice MAC 0.926) para finalmente combinar los tres fenómenos. El objetivo de esta etapa consistía en superar los valores de referencia de las etapas 3 y 4 mediante la combinación de los fenómenos de velocidad, impacto y frenado de tal forma que solo en ciertas ubicaciones de sensores estuviera presente la fuerza de frenado y/o impacto considerando que estas solo pueden ser aplicadas con el vehículo en movimiento. Con la intención de reducir la cantidad de combinaciones entre los diferentes parámetros involucrados, se implementó un algoritmo de prueba y error, es decir, se tomaron como registros de aceleración base las configuraciones de sensores correspondientes a combinación de velocidad, luego se sustituía la primera configuración de sensores del registro base por la correspondiente configuración de sensores para registros de aceleración de frenado y/o impacto, posteriormente se calculaba el índice MAC y en el siguiente paso se sustituía la segunda configuración adicional (impacto o frenado) de tal forma que se conservaran ocho registros de aceleración para combinación de velocidades y un registro para fuerzas de impacto y/o frenado. Al tener alguna configuración de casos de carga que superara los valores de referencia, este nuevo registro se tomaba como configuración base y se repetía el proceso sustituyendo de a una configuración por prueba; en caso tal que no mejorara el índice MAC se detenía el proceso.

Etapa 5-1: combinación de velocidad e impacto

Para el conjunto de combinaciones propuestas (para la primera prueba) el valor más alto en la combinación 3. Luego dejando esta configuración de sensores de referencia se adicionaron las demás configuraciones dando los mejores resultados en las combinaciones 3 y 9 como lo muestra la Tabla 6. Estos resultados

mejoran en gran medida los tenidos en las pruebas de impacto, esto indica que no es necesario usar fuerzas adicionales en todas las configuraciones, con algunas de ellas se pueden tener resultados acertados.

Tabla 6. Índice MAC para combinaciones propuestas de velocidad - impacto

| SET UP | Prueba 1 | Prueba 2 |
|--------|----------|----------|
| 1 | 0.9327 | 0.9302 |
| 2 | 0.9583 | 0.9495 |
| 3 | 0.9644 | REF |
| 4 | 0.9585 | 0.9530 |
| 5 | 0.9583 | 0.9525 |
| 6 | 0.9585 | 0.9528 |
| 7 | 0.9468 | 0.9483 |
| 8 | 0.9379 | 0.9435 |
| 9 | 0.9629 | 0.9584 |

Fuente: elaboración propia

Etapa 5-2: combinación de velocidad y frenado

Con un procedimiento similar al desarrollado en la anterior sección se obtuvieron los resultados de la Tabla 7 donde los resultados superan a simple vista los datos de referencia objetivo. En este caso, las mejores combinaciones son la 5 y 3 por orden de prueba, de nuevo, con pocas configuraciones de frenado se tienen buenos resultados en coherencia de las formas modales. En general, a medida que se adicionan configuraciones de sensores en cada combinación los valores de índice MAC tienden a disminuir.

Tabla 7. Índice MAC para combinaciones propuestas de velocidad - frenado

| Set Up | F-1 | F-2 |
|--------|--------|--------|
| 1 | 0.9248 | 0.9217 |
| 2 | 0.9414 | 0.9401 |
| 3 | 0.9572 | 0.9705 |
| 4 | 0.9682 | 0.9602 |
| 5 | 0.9737 | Ref |
| 6 | 0.9614 | 0.9636 |
| 7 | 0.9541 | 0.9634 |
| 8 | 0.9560 | 0.9649 |
| 9 | 0.9575 | 0.9644 |

Fuente: elaboración propia

Etapa 5-3: combinación de velocidad, impacto y frenado

En esta etapa final se consideran ambos fenómenos tomando como referencia las combinaciones 3 y 5 para impacto y frenado respectivamente para luego adicionar las configuraciones del fenómeno complementario según sea el caso, es decir, teniendo el nuevo registro de aceleraciones base para ocho configuraciones de velocidad y un registro de impacto o frenado, se sustituía un registro de combinación de velocidad por uno de impacto y/o frenado teniendo así una relación de siete registros de combinación de velocidades por dos

registros de fuerzas adicionales. Finalmente, se presentan los resultados (Tabla 8) del índice MAC para las combinaciones descritas en la tabla anterior. De estas simulaciones, 2 de ellas muestran buenos resultados (R3-F5 y F5-R9).

Tabla 8. Esquema de combinaciones para velocidad, impacto y frenado

| FENOMENO | SET UP | F-1 |
|----------|--------|--------|
| RESALTO | R3-F1 | 0.9038 |
| | R3-F2 | 0.9214 |
| | R3 | REF |
| | R3-F4 | 0.9490 |
| | R3-F5 | 0.9677 |
| | R3-F6 | 0.9552 |
| | R3-F7 | 0.9499 |
| | R3-F8 | 0.9573 |
| | R3-F9 | 0.9383 |
| FRENADO | F5-R1 | 0.9396 |
| | F5-R2 | 0.9549 |
| | F5-R3 | 0.9677 |
| | F5-R4 | 0.9573 |
| | F5 | REF |
| | F5-R6 | 0.9632 |
| | F5-R7 | 0.9553 |
| | F5-R8 | 0.9563 |
| | F5-R9 | 0.9737 |

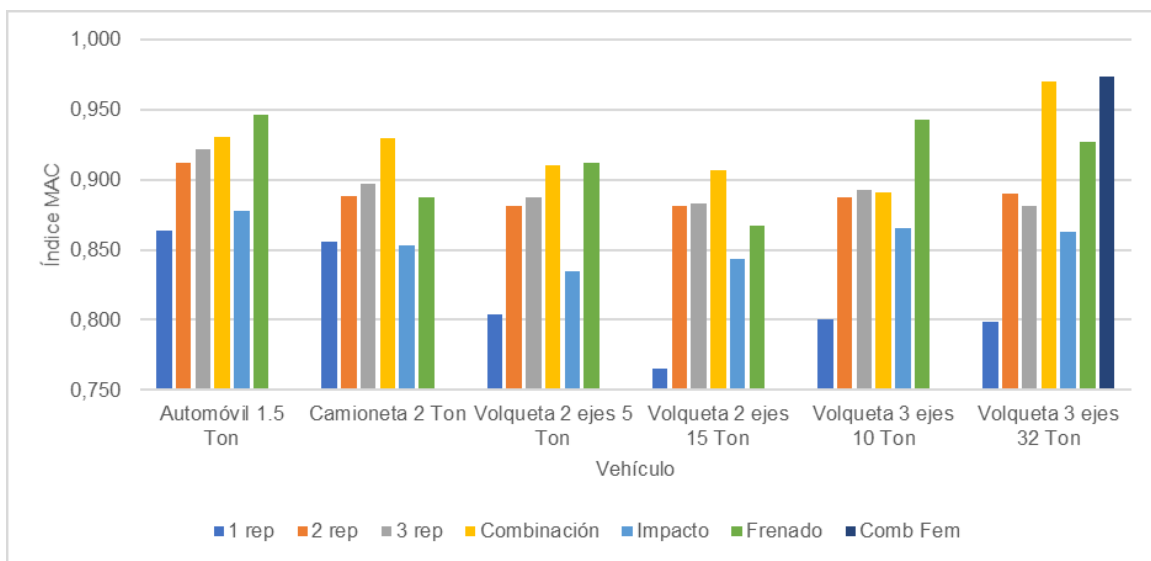
Fuente: elaboración propia

Discusión de resultados

Se ha implementado un método heurístico de prueba y error para cada etapa planteada en la investigación. En primera instancia se definieron los vehículos de prueba y parámetros en el procesamiento de las señales a partir de los documentos referenciados [8,9,10,11], [14,15,16,17,18,19]. Luego se analizaron y organizaron los resultados buscando el mejor ajuste de las propiedades identificadas numéricamente respecto los valores de referencia del modelo FEM inicial lo que permitió detectar combinaciones óptimas para cada vehículo de prueba. Los valores del índice MAC para las 3 formas modales identificadas en los casos de carga de mayor moda para cada vehículo fueron promediados para analizar, en conjunto, las 3 etapas estudiadas graficando los resultados para cada vehículo de prueba. Las siguientes figuras muestran el índice MAC promedio de las 3 formas modales identificadas en cada etapa por vehículo. [22,23,24,25,26,27,28,29,30,31] En general, los mejores resultados se tienen para los casos de carga donde se combinan velocidades respecto a aquellos que manejan una sola velocidad. El porcentaje de error relativo en frecuencia disminuye a medida que se aumentan las repeticiones y se combinan velocidades siendo una tendencia en los 6 vehículos de prueba. A pesar del aumento del tiempo de medición, similar al de campañas de vibración ambiental por configuración [15] se observa una mejoría de hasta el 15% en formas modales y 296% en frecuencias naturales (porcentaje de error relativo) para los casos de carga que presentan combinación de velocidades. En general, los mejores resultados, respecto a las propiedades dinámicas de referencia (modelo numérico), se tienen para vehículos livianos que con un rango amplio de velocidades de circulación, aunque esto queda sujeto a verificación experimental. El uso adicional de fuerzas de impacto

y frenado en todas las configuraciones de sensores modifica la distribución del contenido energético de la señal dándole mayor participación a aquellos modos de dirección dominante igual a la aplicación de la fuerza, esto podría justificar la reducción del valor del índice MAC del modo RY para los casos de carga con adición de fuerzas como impacto y frenado. En cambio, usar en pocas configuraciones de sensores fuerzas de impacto y frenado adicionales a las generadas por el paso del vehículo a velocidad (Etapa 5) mejora la identificación del modo longitudinal y rotacional. La disminución en la correlación de las formas modales está en el rango de 4 a 17% y las mejorías son del orden de 0.05 a 0.85% tomando como caso de carga base la combinación de velocidades. Aunque la mejoría no supera el 1% es un indicativo de como varían los resultados en función de cantidad de configuraciones de sensores con fuerzas adicionales. Los resultados acá presentados pueden diferir de aquellos obtenidos en pruebas a escala real a razón de ruido ambiental que posiblemente dificulte la identificación de formas modales con picos de energía de baja amplitud. Los datos identificados numéricamente indican que la identificación dinámica, usando vehículos pesados, depende de factores como la velocidad, peso y distribución de los ejes del vehículo lo que sustenta que para cada vehículo probado las combinaciones adecuadas de velocidad son distintas. La validación final del modelo numérico estará dada por la ejecución de las campañas experimentales ya sea con pruebas de vibración ambiental o forzadas, aunque a primera vista, el modelo básico representa la mejor opción en cuestión de costo computacional y tiempo de programación.

Figura 6. Índice MAC promedio para etapas 1 a 5



Fuente: elaboración propia

Conclusiones

El conjunto de resultados obtenidos a través de las simulaciones numéricas planteadas permitió validar las suposiciones y preguntas formuladas en las etapas iniciales de la investigación en lo referente:

A pesar de la idea generalizada del uso de vehículos pesados tipo volqueta como fuentes de excitación los resultados numéricos en cuanto coherencia de formas modales y frecuencias naturales indican que vehículos livianos del orden de 1 a 5Ton mejoran en algunas situaciones los resultados (índice MAC) obtenidos con vehículos pesados (Figura 6).

Aumentar la cantidad de repeticiones, independiente del tipo de vehículo y velocidad de circulación mejora sustancialmente la identificación dinámica. Sumado a esto, ejecutar casos de carga en los que se combinen velocidades mejora la consistencia de las formas modales (Figura 6) y reduce el porcentaje de error relativo de las frecuencias identificadas.

Para el puente bajo estudio, los mejores resultados, en cuanto índice MAC y error relativo de frecuencias, se tiene para velocidades entre 20 – 60km/h para vehículos pesados siendo dominante circular a 40km/h lo que resulta consistente con normativas como [32], [33]. En el caso de vehículos livianos, estos manejan un rango más amplio de velocidad optima llegando hasta 80km/h. Cabe resaltar que la identificación dinámica está estrechamente relacionada con el contenido energético de la señal de entrada, por lo tanto, para los vehículos livianos se requiere un rango amplio de velocidad y en vehículos pesados velocidades “bajas”.

A pesar de no haber considerado las propiedades mecánicas de la suspensión ni presión de llantas en los modelos numéricos fue notorio la influencia de variables como el peso y separación de ejes de los distintos vehículos de prueba como se muestra en la Figura 6 donde los vehículos V5-V6 con distinto peso e igual separación de ejes difieren en el índice MAC registrado, en los demás vehículos se aprecia una tendencia similar dada la diferencia de pesos y separación de ejes. Es importante mencionar que estos resultados no consideran el efecto de distorsión por ruido ambiental.

En los casos de carga en los que se consideraron fuerzas adicionales como impacto y frenado se notó una disminución en los valores de los parámetros de control cuando se adicionaban estas fuerzas en todas las configuraciones de “sensores” (nodos). Se tienen mejores resultados cuando estas se adicionan a un par de configuraciones (Tabla 8). Un factor importante por considerar es el tiempo de medición por posición del sensor ya que este depende directamente de las habilidades del conductor del camión y sincronización de tiempos con el director de la prueba.

Recomendaciones

Como paso siguiente de la investigación se recomienda validar en campo las combinaciones de velocidad propuestas en este artículo con vehículos con características similares a las usadas en el presente artículo. En la etapa de modelamiento numérico, la sección transversal es simulada mediante un elemento tipo BEAM en la que los registros de aceleraciones son calculados en el centroide de la sección lo que elimina afectaciones en los registros por formas modales locales de la sección; en el caso de ejecución de pruebas a escala real se recomienda ubicar los acelerómetros en los tabiques de la sección transversal, ya que estos resultan ser los elementos de la sección con mayor inercia a flexión (segundo momento de área I_y) lo que reduce la participación de formas modales locales en los registros de aceleraciones.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración e información suministrada por la Gobernación de Santander y el financiamiento de la Universidad Industrial de Santander a través del proyecto 2437 – Estudio de deformaciones a largo plazo de puentes viga cajón construidos por voladizos sucesivos - de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión. De igual forma a la Universidad de Antioquia, como entidad coejecutora del proyecto de investigación.

Referencias Bibliográficas

1. E. Muñoz, R. Hernández, E. Valbuena, L. Trujillo, and L. Santacruz, "Rehabilitación de los puentes de la Red de carreteras de Colombia, basados en inspecciones visuales, estudios especializados y estrategias de reparación.," *Rev. Ing. Constr.*, vol. 20, no. 1, pp. 159–182, 2005.
2. A. Gastineau, T. Johnson, and A. Schultz, "Bridge Health Monitoring and Inspections Systems - A Survey of Methods," University of Minnesota, Minnesota, 2009.
3. A. C. de I. S. AIS, "SECCIÓN 4: Análisis y evaluación estructural," in *Norma Colombiana de Diseño de Puentes, CCP 14*, 1st ed., Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2014, p. 83.
4. Z. P. Bazant, Q. Yu, G.-H. Li, G. J. Klein, and V. Kristek, "Excessive deflections of record-span prestressed box girder," *ACI Concr. Int.*, vol. 32, no. 6, pp. 44–52, 2010. DOI: <https://doi.org/10.15554/pcij.05011994.66.80>.
5. Mohamed Abdel-Basset Abdo, *Structural Health Monitoring History , Applications and Future*, no. September. 2015.
6. S. Kashif Ur Rehman, Z. Ibrahim, S. A. Memon, and M. Jameel, "Nondestructive test methods for concrete bridges: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 107, pp. 58–86, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011>.
7. A. Devin, P. Fanning, C. Middleton, and A. Pavic, "Structural dynamic parameter identification and effect of test techniques," in *Topics in Dynamic of Civil Structures*, 2013, vol. 4, pp. 175–181. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6555-3_20.
8. J. M. W. Brownjohn, F. Magalhaes, E. Caetano, and A. Cunha, "Ambient vibration re-testing and operational modal analysis of the Humber Bridge," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 8, pp. 2003–2018, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.02.034>.
9. B. Sevim, A. Bayraktar, and A. C. Altunişik, "Finite element model calibration of berke arch dam using operational modal testing," *JVC/Journal Vib. Control*, vol. 17, no. 7, pp. 1065–1079, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1177/1077546310377912>.
10. R. Cantieni, "Experimental methods used in system identification of civil engineering structures," *Proc. 1st Int. Oper. Modal Anal. Conf. IOMAC 2005*, pp. 10–11, 2005.
11. C. Kramer, C. A. de Smet, and B. Peeters, "Comparison of ambient and forced vibration testing of civil engineering structures," *Shock Vib. Dig.*, vol. 32, no. 1, p. 58, 2000.
12. M. F. Green, "Modal test methods for bridges: A review," *Conf. 1995 IMAC XIII – 13th Int. Modal Anal. Conf.*, pp. 552–558, 1995.
13. C. R. Farrar, T. A. Duffey, P. Cornwell, and S. W. Doebling, "Excitation methods for bridge structures," *Shock Vib. Dig.*, vol. 32, no. 1, p. 26, 2000.
14. S. W. Doebling, C. R. Farrar, and P. Cornwell, "Statistical comparison of impact and ambient testing results from the Alamosa Canyon Bridge," *Proc. Int. Modal Anal. Conf. - IMAC*, vol. 1, no. September 2015, pp. 264–270, 1997.
15. A. Viviescas Jaimes, W. J. Carrillo León, and L. A. Vargas Carvajal, "Structural health monitoring baseline of Gómez Ortiz bridge using ambient vibration tests," *Inge Cuc*, vol. 14, no. 1, pp. 52–65, 2018. DOI: <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.05>.
16. P. Reynolds and A. Pavic, "Comparison of forced and ambient vibration measurements on a bridge," *Proc. Int. Modal Anal. Conf. - IMAC*, vol. 1, no. January, pp. 846–851, 2001.

17. G. W. Chen, S. Beskhyroun, and P. Omenzetter, "Ambient and forced vibration testing of an eleven-span motorway off-ramp bridge," *Proc. Int. Conf. Struct. Dyn. , EURODYN*, vol. 2014-Janua, pp. 2427–2434, 2014. DOI: <https://doi.org/10.13140/2.1.2528.9281>.
18. W.-H. P. Yen, T. T. Baber, and F. W. Barton, "Ambient and forced vibration tests on a cable-stayed bridge," in *Nondestructive Testing Methods for Civil Infrastructure*, 1995, pp. 109–123.
19. O. S. Salawu and C. Williams, "Bridge assessment using forced-vibration testing," *J. Struct. Eng. (United States)*, vol. 121, no. 2, pp. 161–173, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:2\(161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:2(161)).
20. Á. Cunha and E. Caetano, "From input-Output to Output-Only modal identification of civil engineering struct," *Proc. 1st Int. Oper. Modal Anal. Conf. IOMAC 2005*, 2005.
21. O. S. Salawu and C. Williams, "Review of full-scale dynamic testing of bridge structures," *Eng. Struct.*, vol. 17, no. 2, pp. 113–121, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(95\)92642-L](https://doi.org/10.1016/0141-0296(95)92642-L).
22. R. Cantieni, "Dynamic load tests on highway bridges in Switzerland - 60 years of experience.," Swiss Fede., vol. 211, no. 211. Dübendorf: Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, 1983.
23. Y. B. Yang and J. P. Yang, *State-of-the-Art Review on Modal Identification and Damage Detection of Bridges by Moving Test Vehicles*, vol. 18, no. 2. 2018.
24. J. P. Conte, S. F. Masri, J. P. Caffrey, and B. Moaveni, "Dynamic Testing of Alfred Zampa Memorial Bridge," *J. Struct. Eng.*, vol. 134, no. 6, 2008. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134).
25. T. Argentini, M. Belloli, L. Rosa, E. Sabbioni, A. Zasso, and M. Villani, "Modal Identificaiton of a Cable-Stayed Bridge by Means of Truck Induced Vibrations," *Conf. Proc. Soc. Exp. Mech. Ser.*, vol. 1, pp. 389–400, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2413-0>.
26. R. Cantieni, "Dynamic Load Testing of Highway Bridges.," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2, pp. 141–148, 1984.
27. D. Cantero, P. McGetrick, C. W. Kim, and E. OBrien, "Experimental monitoring of bridge frequency evolution during the passage of vehicles with different suspension properties," *Eng. Struct.*, vol. 187, no. June 2018, pp. 209–219, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.065>.
28. D. Cantero, D. Hester, and J. Brownjohn, "Evolution of bridge frequencies and modes of vibration during truck passage," *Eng. Struct.*, vol. 152, pp. 452–464, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.039>.
29. Y. B. Yang, B. Zhang, T. Wang, H. Xu, and Y. Wu, "Two-axle test vehicle for bridges: Theory and applications," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 152, no. June 2018, pp. 51–62, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.12.043>.
30. J. Valdés and J. D. la Colina, "Análisis de la amplificación dinámica de la carga viva en puentes con base en pruebas experimentales," *Rev. Tecnológica-ESPOL*, vol. 21, no. 1, pp. 149–156, 2008, [Online]. Available: <http://learningobjects2006.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/150>.
31. Q. fei Gao, Z. lin Wang, J. Li, C. Chen, and H. yu Jia, "Dynamic load allowance in different positions of the multi-span girder bridge with variable cross-section," *J. Vibroengineering*, vol. 17, no. 4, pp. 2025–2039, 2015.
32. Dirección General de carreteras, *Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera*, Primera., vol. 1, no. 1. Madrid: Centro de publicaciones, 1999.
33. service d'Etudes techniques des routes et Autoroutes, *Technical Guide Loading tests on road bridges and footbridges*, 1st ed., no. october. Bagneux: SETRA, 2006.

34. American Association of State Highway and Transportation Officials, *The Manual for Bridge Evaluation*, Second Edi. Washington, 2016.
35. R. Brincker, L. Zhang, and P. Andersen, "Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition," in *18 International Modal Analysis Conference IMAC*, 2000, no. 18.
36. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, "Titulo A - Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente," *Nsr-10*, vol. Titulo A, pp. 1–174, 2010.
37. J. D. Cryer, J. S. Bendat, and A. G. Piersol, *Random Data. Analysis and Measurement Procedures*, 4th ed., vol. 82, no. 400. New Jersey: Wiley, 2010.
38. M. Olmo and R. Nave, "Energy of falling object," *Fuerza de impacto en la caída de Objetos*, 2020. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/flobi.html#c1%22> (accessed Jun. 04, 2020).
39. A. C. de I. S. AIS, "SECCION 3: Cargas y Factores de Carga," in *Norma Colombiana de Diseño de Puentes, CCP 14*, 1st ed., Bogotá: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, 2014, p. 140.
40. Instituto Nacional de Vías, *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*, 1st ed., vol. 84. Bogotá: INVIAS, 2008.