

Campañas Experimentales de Vibración Forzada en Puentes en Concreto

Jeny Katerine Acevedo Pacheco

María Alexandra Sánchez Rodríguez

**Trabajo de Grado Presentado como Requisito para Optar al Título de Especialista en
Estructuras**

Director:

Álvaro Viviescas Jaimes

Ph. D. en Ingeniería de la Construcción

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Especialización en Estructuras

Bucaramanga

2017

Dedicatoria.

Agradecemos a Dios y a nuestros padres por ser el pilar fundamental en todo lo que somos, en toda la educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo durante este tiempo. A todos quienes impulsaron el desarrollo de nuestra formación profesional.

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Justificación	14
2. Objetivos	14
2.1 Objetivo General	14
2.2 Objetivos Específicos	15
3. Estudios sobre pruebas dinámicas para puentes en concreto	15
3.1 Métodos experimentales para la medición de vibraciones en puentes	16
3.2 Métodos para la excitación de la estructura	17
3.2.1 Pruebas de vibraciones ambientales	17
3.2.1.1 Ventajas de las pruebas de vibración ambiental	18
3.2.1.2 Desventajas de las pruebas de vibración ambiental	18
3.2.2 Excitación por desplazamiento	19
3.2.3 Pruebas de carga	19
3.2.3.1 Pruebas de diagnostico.	20
3.2.3.2 Pruebas de resistencia	20
3.2.3.3 Pruebas estáticas	20
3.2.3.4 Pruebas dinámicas	20
3.2.4 Excitación por vibradores.	21

3.2.5 Excitación por impacto	23
3.2.6 Excitación por cargas antrópicas	25
3.2.6.1 Grupos de personas	25
3.2.6.2 Trote y cargas vandálicas	25
4. Descripción de las principales campañas experimentales reportadas en la literatura	26
4.1 Campaña #1	26
4.2 Campaña #2	29
4.3 Campaña #3	32
4.4 Campaña #4	34
4.5 Campaña #5	36
4.6 Campaña #6	38
4.7 Campaña #7	40
4.8 Campaña #8	42
5. Conclusiones	46
Referencias Bibliográficas	48

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Pruebas Dinámicas de Puentes – Tipos de Pruebas, Técnicas de excitación, Parámetros modales obtenidos y sus Aplicaciones.....	21
Figura 2. Martillo de impacto	24
Figura 3: Sistema de impacto.....	24
Figura 4. Vista del puente Antonio Dovalí Jaime.....	27
Figura 5: Camiones cargados ubicados en el puente durante las pruebas de carga.....	28
Figura 6: Puente N°1.....	29
Figura 7: Puente N°2.....	30
Figura 8: Carga viva utilizada, puente N°1.....	31
Figura 9: Vista del puente sobre el rio Virilla, Febrero de 2014	33
Figura 10: Vistas Generales del Viaducto a) Vista lateral antiguo viaducto, b) apoyo intermedio y vista inferior lateral, c) Vista superior, d) Vista Superior lateral.....	35
Figura 11: Distancia entre cargas y grupos de cargas de la serie 333.....	36
Figura 12: Puente de Sanjiang	37
Figura 13: Puente Alfred Zampa Memorial Bridge.....	39
Figura 14: Puente Milnikek	41
Figura 15: Puente B14	43
Figura 16: Puente B15	44

Figura 17: Puente B13 45

Resumen

Título: Campañas experimentales de vibración forzada en puentes en concreto*

Autor: Maria Alexandra Sachez Rodriguez
Jeny Katerine Acevedo Pacheco**

Palabras Claves: Campañas Experimentales, Excitación Forzada, Caracterización Estructural, Esfuerzos Inducidos.

Descripción:

En el presente documento se exponen los diferentes métodos experimentales para la excitación forzada en puentes en concreto, permitiendo obtener respuestas dependiendo de la forma en que se excita la estructura. La selección del tipo de excitación depende de los requerimientos de instrumentación y manejo de la información que se tenga del puente y que se quiera obtener.

Aquí se abordan las diferentes campañas experimentales reportadas en la literatura y resultados de las mismas pruebas realizadas en diferentes puentes en concreto con estructuración y geometrías diferentes, permitiendo identificar un comportamiento que caracterice la estructura con sus modos de vibración, frecuencia y amortiguamiento. Se realiza una breve descripción de puentes en estudio, así como una inspección inicial de la estructura sometiénola a diferentes pruebas de excitación inducidas, las cuales permiten medir las deformaciones (esfuerzos dinámicos) presentes en los elementos de la superestructura que serán medidos y que pretenden realizar una caracterización.

Las mediciones realizadas en las pruebas permitieron cuantificar las magnitudes vibratorias y la deformación en varias secciones del puente, en condición de tránsito vehicular y sin servicio, donde los resultados experimentales obtenidos se comparan con el modelado analítico computacional de la estructura y de esta manera verificar y validar la capacidad y puesta en servicio de los principales elementos estructurales.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Especialización en Estructuras Director: Álvaro Viviescas Jaimes

Abstract

Title: Forced vibration testing in concrete bridges*

Authors: Maria Alexandra SaNCHEZ
Jeny Katerine Acevedo Pacheco**

Keywords: Vibration Testing, Forced Vibration, Structural Characterization, Induced Stresses.

Description:

In this paper we present the different experimental methods for the forced excitation in concrete bridges, allowing to obtain answers depending on the way in which the structure is excited. The selection of the excitation type depends on the requirements of instrumentation and management of the information that has of the bridge and that is wanted to obtain.

Here discuss the different experimental campaigns reported in the literature and the results of the same tests carried out on different bridges in concrete with different structures and geometries, allowing to identify a behavior that characterizes the structure with its modes of vibration, frequency and damping. A brief description of bridges under study is made, as well as an initial inspection of the structure by subjecting it to different induced excitation tests, which allow to measure the deformations (dynamic forces) present in the elements of the superstructure that will be measured and intended to be realized A characterization.

The measurements made in the tests allowed to quantify the vibrational magnitudes and the deformation in several sections of the bridge, in vehicular traffic condition and without service, where the obtained experimental results are compared with the computational analytical modeling of the structure and in this way verify and Validate the capacity and service of the main structural elements.

* Project of grade

** Faculty of Engineering Physicomecanicas, School of Civil Engineering. Specialization in Structures Director: Álvaro Viviescas Jaimes

Introducción

Los puentes vehiculares forman parte muy importante de la infraestructura de que disponen las distintas regiones o países para lograr un desarrollo económico que beneficie a su población. Por ello, resulta importante desarrollar procedimientos de análisis, diseño, evaluación y construcción que sean más eficientes respecto a los existentes y se adapten de mejor manera a los nuevos materiales, tipos de estructuración y condiciones de tráfico actuales (J. Valdés, 2008).

Los actuales reglamentos de diseño pueden considerarse confiables en la mayoría de los aspectos, sin embargo, es necesario monitorear el comportamiento de la estructura en sus condiciones de servicio.

En zonas de alta actividad sísmica suele enfocarse el monitoreo de puentes hacia sus propiedades dinámicas (frecuencias, formas modales y amortiguamiento). Para esto, se utilizan campañas de vibraciones forzadas.

Las campañas de vibración forzada permiten la medición de la respuesta de un puente sujeto a excitaciones predeterminadas sin causar cambios en la respuesta elástica de la estructura. Como una medida para identificar seguridad en puentes carreteros es recomendable la ejecución de estas pruebas que permitan identificar el buen funcionamiento de una estructura en la que los materiales y la ejecución hayan alcanzado la calidad prevista.

El análisis de la vibración de los puentes tiene fundamentalmente dos vertientes de aplicación. Por un lado, el modelar o medir la respuesta de los puentes ante ciertos tipos de excitaciones, puede servir para evaluar potenciales daños sufridos por este tipo de estructura, estimando con ello el

nivel de daño estructural e incluso, la posición en la que se presenta este debilitamiento estructural. Por otro lado, y al estar asociados los niveles de vibración de estas estructuras al nivel de esfuerzos en sus elementos, es posible identificar qué factores, asociados a los vehículos o al mismo puente, afectan de manera importante la respuesta del puente y los esfuerzos inducidos en éste (Carrión, 2014).

En este documento se describen los tipos de ensayos de vibración forzada que mejor respuesta presentan para caracterización dinámica de puentes en concreto en sección viga cajón de grandes luces, de acuerdo a la literatura científica disponible.

Las conclusiones que se obtienen del presente documento se relacionan con la importancia de tener el conocimiento acerca de la diversidad de técnicas que es posible emplear para el análisis de las vibraciones forzadas de los puentes, en donde aspectos relacionados con la instrumentación misma y los objetivos del estudio, estarían involucrados.

1. Justificación

Las pruebas experimentales en puentes permiten identificar sus propiedades estructurales, entre las más conocidas se tienen las pruebas de vibración ambiental las cuales han demostrado buenos resultados a nivel de los puentes. Sin embargo, esta excitación no es controlada, lo que produce un problema de estabilidad e incertidumbre de datos en el estado de las vibraciones.

Es por esto, que se emplean métodos de excitación inducida en los puentes los cuales permiten obtener parámetros tales como las frecuencias de los primeros modos de vibración, el amortiguamiento o la amplificación dinámicas que ayudan a detectar anomalías de carácter funcional en los puentes.

Estas pruebas permiten la medición de la respuesta de un puente sin causar cambios en la respuesta elástica de la estructura.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Identificar los principales tipos de ensayos de vibración forzada para caracterización dinámica de puentes en concreto.

2.2 Objetivos Específicos

- Clasificar los tipos de ensayos de vibración forzada para puentes en concreto.
- Registrar las principales campañas experimentales de vibración forzada realizadas en puentes en concreto.
- Proponer los tipos de ensayos de vibración forzada que mejor respuesta presentan para caracterización dinámica de puentes en concreto en sección viga cajón de grandes luces.

3. Estudios sobre pruebas dinámicas para puentes en concreto

En puentes, las pruebas de vibración forzada permiten medir la frecuencia de vibración y el amortiguamiento del elemento, parámetros dinámicos con los cuales se puede evaluar el comportamiento de la estructura; su importancia radica en calcular las condiciones físicas para determinar las necesidades de mantenimiento principalmente, sin embargo se distinguen tipos de pruebas de carga en puentes: de recepción de obra nueva, de puentes en servicio, pruebas de diagnóstico, pruebas de resistencia; todas estas se usan para establecer la capacidad máxima segura del puente, para determinar la respuesta de ciertas características como cargas, distribución de cargas o validar procedimientos analíticos o modelos matemáticos. Durante estas pruebas se aplican cargas suficientemente altas para propiciar un cambio en la respuesta del puente, pero sin afectar la integridad de la estructura.

La capacidad de carga de un puente se basa en las condiciones estructurales, propiedades de los materiales, cargas, condiciones del tráfico y de sitio, para su evaluación se puede utilizar las pruebas experimentales de vibración cada vez que se produzcan cambios en algunas de estas condiciones, pero es importante que exista claridad en el tipo de experimentación a realizar, pues cada prueba ayuda a proporcionar diferente información sobre el estado de la estructura y en este aspecto es que se pretende dar enfoque, en por qué y para qué se realiza una u otra prueba.

En primeras investigaciones las pruebas de vibración forzada o inducidas o de excitación artificial identificaron las principales propiedades dinámicas de estructuras (Input -Output), aunque la dificultad para aplicar vibración forzada o excitación a grandes estructuras civiles en forma controlada generó otros métodos de identificación de mayor aplicabilidad como los son las pruebas de vibración ambiental (AVT) (Araújo, Rondon, & Cho, 2010).

La excitación debida al ambiente normalmente no es controlada lo que produce una falta de estacionariedad o unos problemas de estabilidad del estado de las vibraciones, este no es el caso para las pruebas de vibración forzada (FTV), donde la vibración inducida a la estructura puede guardar estacionariedad (Araújo, Rondon, & Cho, 2010).

3.1 Métodos experimentales para la medición de vibraciones en puentes

Los estudios de vibraciones en puentes se están enfocando al análisis modal, empleando para ello funciones de transferencia en frecuencia. Estos estudios de sensibilidad y paramétricos requieren de un manejo, filtrado e interpretación adecuados de la señal registrada experimentalmente.

Cualquier técnica experimental para la medición de vibraciones en puentes considera los siguientes factores (Carrión, Lozano, Fabela, Vázquez, & Romero, 1999):

- I) Los métodos empleados para la excitación de la estructura.
- II) Los transductores usados para medir la vibración.
- III) Los procedimientos de prueba manejados.

3.2 Métodos para la excitación de la estructura

Las técnicas disponibles para efectuar la excitación de vibraciones en puentes son (Carrión, Lozano, Fabela, Vázquez, & Romero, 1999):

- Efectos ambientales.
- Desplazamiento.
- Liberación de cargas.
- Vibradores.
- Impacto.
- Cargas antrópicas.

3.2.1 Pruebas de vibraciones ambientales. Las pruebas de vibraciones ambientales (AVT) sobre una estructura no utilizan ninguna excitación artificial, por el contrario, la respuesta de la estructura es medida por la excitación producida por el ambiente; como el viento, el tráfico o los microsismos. Siendo los resultados de las pruebas mejores, si la excitación producida por el medio ambiente tiene un gran ancho de banda en frecuencia que permita excitar todas las frecuencias naturales de la estructura (Cunha, Caetano, Magalhaes and Moutinho, 2006).

3.2.1.1 Ventajas de las pruebas de vibración ambiental

- Una de las principales ventajas de una AVT es el no requerir una excitación artificial, de manera que sea comparativamente más económica que los métodos que utilizan vibraciones inducidas (FVT) (Araújo, Rondon, & Cho, 2010).
- las investigaciones con AVT pueden desarrollarse sin interrumpir el normal uso de las estructuras (Brinker, Andersen, 1999).
- La ejecución de las AVTs es sencilla y rápida.
- Trabajos presentados por Yao, Wang y Zhao el uso de las vibraciones ambientales en el desarrollo de monitoreo en tiempo real (on line) es un medio atractivo de excitación de la estructura (Zhi-yuan, Feng-yuan and Chang-sheng. 2005).
- Las excitaciones producidas por el ambiente como el viento, el tráfico y los microsismos son conocidas como de múltiples entradas dado que actúan sobre muchos puntos de la estructura al mismo tiempo. Por el contrario, en los métodos FVT la excitación es del tipo de una sola entrada. La anterior diferencia no es relevante en pequeñas estructuras, pero en las grandes y complejas, las investigaciones de Cantieni han demostrado que esta es una ventaja más en las pruebas AVT (Cantieni. 2004).

3.2.1.2 Desventajas de las pruebas de vibración ambiental

- La excitación debida al ambiente normalmente no es controlada lo que produce una falta de estacionariedad o un problema de estabilidad del estado de vibraciones (Araújo, Rondon, & Cho, 2010).
- En cuanto a la amplitud de la excitación producida por el ambiente ésta es significativamente diferente para cada toma de datos, por consiguiente, en los resultados puede existir cierta dispersión, es

decir, se pueden introducir pequeños cambios en las frecuencias naturales de la estructura (Araújo, Rondon, & Cho, 2010).

- Otra desventaja es la incertidumbre en los datos, ya que las variaciones operacionales y medioambientales, como la temperatura, humedad y condiciones de carga tienen una directa influencia sobre la respuesta dinámica de la estructura (Araújo, Rondon, & Cho, 2010).

3.2.2 Excitación por desplazamiento La técnica de excitación por desplazamiento consiste en la aplicación de una fuerza estática al puente (normalmente al centro), la cual induce un desplazamiento estático. Posteriormente, la carga se libera de manera instantánea, y el puente tiende a recuperar su punto de equilibrio, de manera semejante a un resorte al que se le aplica una fuerza que lo estira y luego se libera esta fuerza, oscilando de manera libre el resorte alrededor de su punto de equilibrio (Carrión, Lozano, Fabela, Vázquez, & Romero, 1999).

Permite excitar modos distintos de vibración. Mientras que esta técnica hace posible medir con bastante precisión los coeficientes de amortiguamiento, su principal desventaja es que los mecanismos mediante los cuales se produce el desplazamiento resultan ser complicados y de alto costo, particularmente para pruebas en campo (Carrión, Lozano, Fabela, Vázquez, & Romero, 1999).

3.2.3 Pruebas de carga Las pruebas de carga permiten medir la respuesta de un puente de forma controlada y con cargas predeterminadas sin causar cambios en la respuesta elástica de la estructura.

Se usan para verificar tanto los componentes como el desempeño del sistema bajo cargas conocidas y es una metodología de evaluación alternativa para analizar la capacidad de carga del puente. Proveen suficientes datos para establecer de forma segura los niveles de carga viva para puentes antiguos (Ortiz Quesada & Carranza).

3.2.3.1 Pruebas de diagnostico. Utilizadas para determinar la respuesta de ciertas características como cargas, distribución de cargas o validar procedimientos analíticos o modelos matemáticos (Ortiz Quesada & Carranza).

3.2.3.2 Pruebas de resistencia Establecen la capacidad máxima segura del puente, cuando el comportamiento del puente se encuentra fuera del rango elástico (Ortiz Quesada & Carranza).

3.2.3.3 Pruebas estáticas Usan cargas estacionarias para evitar vibraciones en el puente, la intensidad y posición de la carga varía durante el ensayo. Las pruebas estáticas de diagnóstico sirven para verificar y ajustar los modelos analíticos de predicción (Ortiz Quesada & Carranza).

3.2.3.4 Pruebas dinámicas En la clasificación de las pruebas dinámicas de puentes, se pueden distinguir dos tipos de dichas pruebas (figura 1):

- Pruebas Operacionales: la identificación de la vibración parámetros de una estructura sometida a una carga específica (Zwolski, & Bien, 2011).
- Pruebas Modales: la identificación de los parámetros de la propia estructura del puente vibratorio, que independientemente del tipo de excitación (Zwolski, & Bien, 2011).

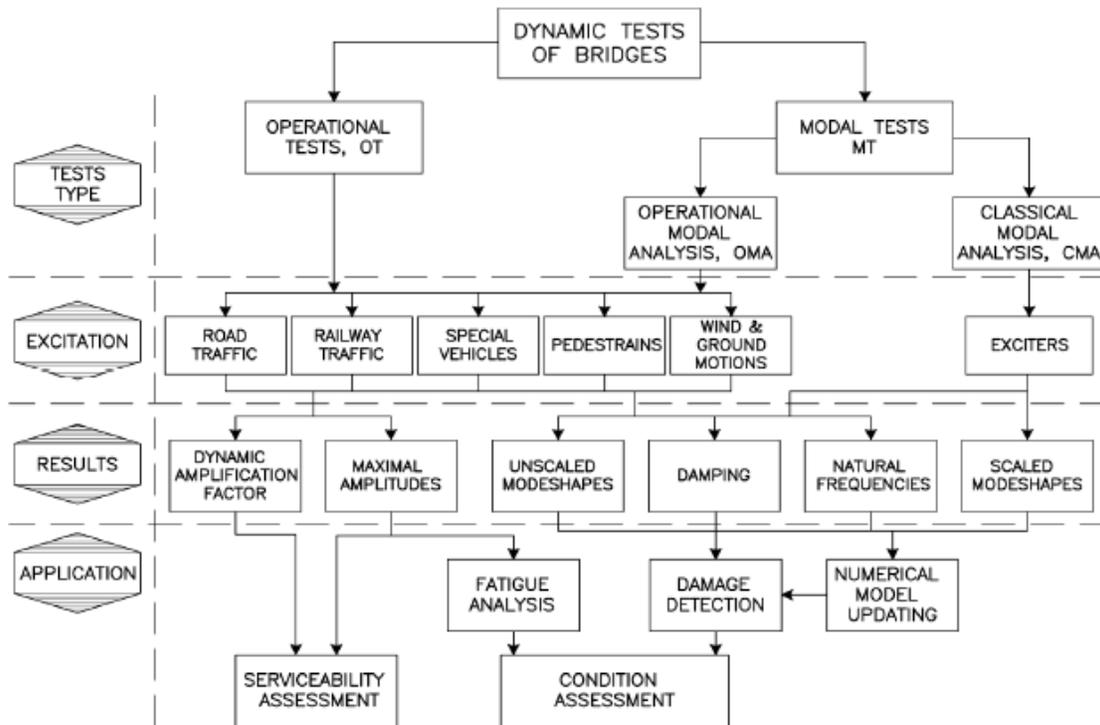


Figura 1. Pruebas Dinámicas de Puentes – Tipos de Pruebas, Técnicas de excitación, Parámetros modales obtenidos y sus Aplicaciones.

Adaptado de: Modal Analysis Bridge Structures by Means of Forced Vibration Test.

3.2.4 Excitación por vibradores. Los vibradores son una técnica muy empleada en las últimas fechas, debido a que permite tener un control sobre la señal de excitación. En este caso, es posible conocer la magnitud de la fuerza aplicada, empleando una señal de excitación predeterminada (senoidal, cuadrada, rectangular, etc.), ya sea a una frecuencia fija o efectuando un barrido en un rango de frecuencia preestablecido o bien, tener una señal aleatoria. Por lo general, los vibradores son dispositivos servo-hidráulicos o electromecánicos que, según su tamaño, permiten aplicar fuerzas máximas que varían entre 5 y 90 kN (Carrión, Lozano, Fabela, Vázquez, & Romero, 1999).

En el estudio de caracterización dinámica de un puente se recomienda emplear ya sea señales aleatorias o un barrido senoidal. Cuando se requiere estudiar con mayor detalle una frecuencia

natural del puente, es conveniente utilizar la señal a dicha frecuencia. Una de las ventajas que tiene este método es que es muy versátil y permite hacer análisis modal, así como determinar las funciones de respuesta en frecuencia o funciones de transferencia. La principal desventaja es su costo, además, la colocación y el manejo del vibrador son complicados. En todo caso, esta técnica requiere suspender el servicio del puente por un periodo importante de tiempo, tanto para la instrumentación como para la medición (Carrión, Lozano, Fabela, Vázquez, & Romero, 1999).

Un ejemplo particular del método de vibradores es cuando se utiliza un péndulo que cuelga del puente. Este péndulo puede variar su masa o longitud para variar la frecuencia de vibración, permitiendo estudiar las frecuencias naturales del puente de forma muy exacta y muy económica. Por otra parte, el péndulo no permite realizar un análisis de funciones de transferencia o un análisis modal completo (Carrión, Lozano, Fabela, Vázquez, & Romero, 1999).

Otro caso particular en relación a este método de excitación de estructuras, se deriva de utilizar vibradores con pulsos de corta duración. Para esto se puede aplicar el método del “chasquido” (*chirp*), propuesto por French y Gordon (Green, 1995). definiendo un chasquido como una señal de excitación armónica variante en el tiempo, la cual, siendo capaz de excitar los modos de vibración de interés, es lo suficientemente rápida como para que las amplitudes de cada modo de vibración sean de magnitud adecuada para ser medidas una vez que la excitación se ha detenido. Aunque este método puede resultar adecuado para medir coeficientes de amortiguamiento de estructuras, aún existen algunos aspectos por investigar en cuanto a la forma de la función de excitación, ya que se ha encontrado que los factores de escalamiento de cada modo de vibración dependen no tan sólo de dicha función, sino también del tipo de estructura en particular que se esté estudiando (Carrión, Lozano, Fabela, Vázquez, & Romero, 1999).

3.2.5 Excitación por impacto En las pruebas de impacto por lo general se golpea al puente con una masa proporcionada al tamaño del mismo, y la masa normalmente forma parte de un martillo de impacto. En el caso de puentes cortos, esta técnica resulta ser muy eficiente, ya que el martillo es de bajo costo, fácil de utilizar y portátil (Carrión, Lozano, Fabela, Vázquez, & Romero, 1999).

Idealmente, la fuerza de excitación se mide mediante un transductor de fuerza colocado en la punta del martillo, con la desventaja de que no es fácil conocer la masa efectiva del martillo y, por lo tanto, la estimación de la fuerza puede ser poco exacta. Como una variante de esta técnica se han utilizado acelerómetros que colocados sobre el otro extremo de la punta del martillo, miden directamente la aceleración de la excitación, presentando como desventaja que debido al registro de las frecuencias naturales de vibración del brazo del martillo, algunos errores son involucrados. Por lo anterior es que se recomienda utilizar conjuntamente el transductor de fuerza y el acelerómetro, sirviendo este último para medir la fuerza de inercia de la masa fuera del plano del primer transductor (Carrión, Lozano, Fabela, Vázquez, & Romero, 1999).

Para el diseño de los martillos de impacto se tienen dos conceptos. El primero, ejemplificado en la Figura 2, ha sido utilizado en experimentos con puentes cortos con claros entre 20 m y 100 m, donde las masas de los martillos han sido entre 20 Kg y 60 Kg. A medida que el tamaño del puente es mayor, la masa del martillo se incrementa y, por lo mismo, el empleo de esta técnica se vuelve más complicado. En general, se recomienda el uso de este método para puentes menores de 30 m.

El otro concepto para el diseño de un equipo de impacto fue propuesto por (Agardh, 1994). (Figura 3), el cual incluye pesos, una celda de carga, amortiguadores y una interfase. En este caso, el amortiguador absorbe la energía de impacto, aumentando con ello el tiempo de duración del impulso de excitación, el cual puede ser de 10 a 20 mts. La interfase debe ser de material suave

para evitar el rebote de la masa, para lo cual se sugiere el uso de una cubierta de hule de 25 mm de espesor, colocada sobre una tela de 10 a 20 mm de espesor. Aunque este segundo principio de operación ha sido aplicado con éxito, presenta la desventaja de que es más costoso que el primero, aparte de las complicaciones de tener que controlar de manera precisa el tiempo de duración del pulso (t_0). Este control de la duración del pulso tiene la finalidad de que se exciten las frecuencias importantes del puente, al emplear la siguiente relación (Green, 1995).

$$t_0 \leq 0.44/f_{\text{máx.}}$$

donde $f_{\text{máx.}}$ es la frecuencia más alta que se desea excitar, en Hz.

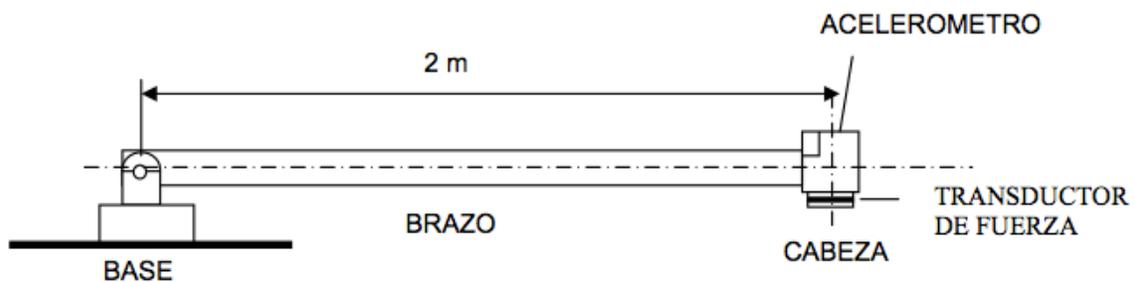


Figura 2. Martillo de impacto

Adaptado de: "Modal Test Methods for Bridges: A Review." (Green, 1995).

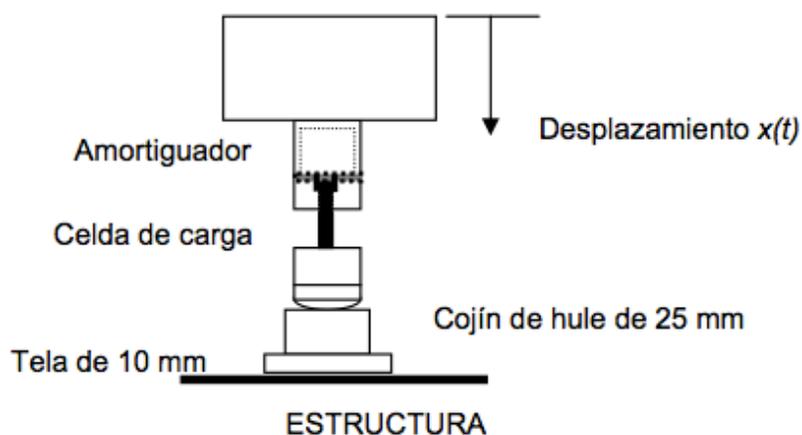


Figura 3: Sistema de impacto.

Adaptado de: "Impact Excitation of Concrete Highway Bridges." (Agardh, 1994).

3.2.6 Excitación por cargas antrópicas Las cargas dinámicas producidas por las personas pueden ser clasificadas en dos categorías generales, in-situ y móviles (Sánchez, 2012). El salto periódico debido a la música, el ponerse de pie rápidamente y movimientos aleatorios en el mismo lugar son ejemplos de actividades in-situ. Caminar y correr son ejemplos de actividades móviles (Figueiredo, Da Silva, De Lima, Vellasco, and Andrade, 2007).

3.2.6.1 Grupos de personas Diferentes modelos han sido desarrollados para estimar la respuesta dinámica de puentes peatonales ante cargas producidas por multitudes de personas. Algunos de estos modelos son basados en factores de multiplicación, otros en simulaciones Monte Carlo y otros más en modelos en el dominio de frecuencias (Brownjohn, Zivanovic, and Pavic, 2008).

Aunque los modelos determinísticos de carga son los más usados en las diferentes guías de diseño y códigos internacionales, en los últimos años un nuevo enfoque para modelar las fuerzas producidas por el caminar de las personas ha sido planteado. Este enfoque considera modelos en el dominio de frecuencias, que tienen en cuenta el ancho de banda en el que se encuentran dispersas las fuerzas producidas por las personas, siendo representadas por densidades espectrales de potencia (Brownjohn, Zivanovic, and Pavic, 2008).

3.2.6.2 Trote y cargas vandálicas El trotar o saltar, a diferencia del caminar, está compuesto por un tiempo de contacto y un tiempo de no contacto. En consecuencia, a menudo estas cargas son modeladas por media función seno para el tiempo de contacto y cero para el tiempo de no contacto (Elsa, Cunha, and Moutinho, 2011). Varios autores dicen que no es posible que las cargas antrópicas generen daños estructurales a un puente peatonal. Sin embargo, considerando la poca masa de estas estructuras en comparación con otras estructuras civiles y el poco amortiguamiento

que caracteriza a los puentes peatonales modernos, es posible que un grupo de personas pueda afectar la integridad estructural de un puente peatonal. Un ejemplo de esto sucedió en China en 1994, cuando un grupo de estudiantes provocó serias fallas estructurales en un puente peatonal al excitarlo por diversión, causando la muerte de 38 personas (Elsa, Cunha, and Moutinho, 2011):

Las cargas inducidas al correr o saltar (cargas vandálicas o "*vandal loads*") tienen amplitudes mucho mayores que las inducidas al caminar. Frecuencias típicas para estas actividades están entre 2.5 Hz a 3.2 Hz para trote y entre 1.3 Hz a 2.4 Hz para saltos (Brownjohn, Zivanovic, and Pavic, 2008).

4. Descripción de las principales campañas experimentales reportadas en la literatura

4.1 Campaña #1

Evaluación de la capacidad de carga del puente Antonio Dovalí Jaime, mediante el uso de pruebas de carga estáticas y dinámicas.

Localización: Sur de la república mexicana

Longitud: 1170 m

Tipo: Puente Atirantado

Año puesta en servicio: 1984



Figura 4. Vista del puente Antonio Dovalí Jaime.

Adaptado de: Ortiz, o., a. patrón, e. r., ruiz-sandoval, m., & cremona., c. (julio - diciembre de 2010). Evaluación de la capacidad de carga del puente antonio dovalí jaime, mediante el uso de pruebas de carga estáticas y dinámicas. concreto y cemento, vol. 2 núm. 1.

Objetivo de la prueba: Evaluar el fenómeno de fallas ante cargas repetidas.

Descripción de la prueba: Se decidió llevar a cabo una campaña de pruebas de vibración forzada, en donde se mide la respuesta dinámica de la estructura bajo sollicitaciones como son el paso de vehículos y oscilaciones ocasionadas por el viento.

Los vehículos empleados en las pruebas fueron 8 camiones de tres ejes cargados (“góndolas”), con un peso total de 30 ton cada uno.



Figura 5: Camiones cargados ubicados en el puente durante las pruebas de carga

Adaptado de: Evaluación de la capacidad de carga del puente Antonio Dovalí Jaime, mediante el uso de pruebas de carga estáticas y dinámicas (Ortiz, Patrón, Ruiz-Sandoval, & Cremona, 2010).

Las mediciones durante la campaña de pruebas dinámicas fueron hechas usando acelerómetros de la marca PCB modelo 393B31, que tienen una sensibilidad de 10 V/g (Ortiz, Patrón, Ruiz-Sandoval, & Cremona, 2010).

Resultados: Estos resultados permitieron validar y calibrar un modelo de elementos finitos detallado del puente. Dicho modelo matemático fue a su vez empleado para evaluar las solicitaciones en los diferentes elementos que componen el puente bajo cargas de servicio y accidentales. Con estos resultados fue verificada la capacidad de servicio de los principales elementos estructurales permitiendo concluir que el puente Antonio Dovalí Jaime continúa siendo apto para prestar servicio.

Las pruebas de carga son una herramienta fundamental para la reevaluación de la capacidad de carga de grandes estructuras existentes, pues permiten reducir considerablemente las incertidumbres ligadas al modelado matemático, la evaluación de su capacidad de carga y el dictamen sobre su seguridad estructural (Ortiz, Patrón, Ruiz-Sandoval, & Cremona, 2010).

4.2 Campaña #2

ANÁLISIS DE LA AMPLIFICACIÓN DINÁMICA DE LA CARGA VIVA EN PUENTES CON BASE EN PRUEBAS EXPERIMENTALES

Puente N°1

Localización: Zona Urbana de la Ciudad de Toluca

Longitud: Claro seleccionado 29 m

Tipo: Trabes de concreto presforzado tipo cajón con aletas simplemente apoyadas en ambos extremos

Año puesta en servicio: 2005



Figura 6: Puente N°1

Adaptado de: J. Valdés, J. de la Colina. (2008). Análisis de la amplificación dinámica de la carga viva en puentes con base en pruebas experimentales. *Tecnológica ESPOL, VOL 1*, 149-156.

Puente N°2

Localización: Carretera Mexico – Toluca

Longitud: Claro de mayor longitud 19.5 m

Tipo: Trabes I de concreto presforzado DE 1300 mm de peralte simplemente apoyadas en ambos extremos.

Año puesta en servicio: 2004



Figura 7: Puente N°2

Adaptado de: J. Valdés, J. de la Colina. (2008). Análisis de la amplificación dinámica de la carga viva en puentes con base en pruebas experimentales. *Tecnológica ESPOL*, vol 1, 149-156.

Objetivo de la prueba: Medir la respuesta del puente ante las cargas dinámicas aplicadas.

Descripción de las pruebas: Se colocaron acelerómetros en el centro, en el cuarto y en el tercio de luz y en uno de sus extremos, 7 acelerómetros en total de balance de fuerzas uniaxial los cuales registran movimientos en un rango de frecuencias de 0 a 200 Hz y aceleraciones de hasta 64g.

Cargas: Los camiones que se utilizaron en las pruebas para el puente N°1 corresponden a vehículos de dos ejes, cuyo detalle de geometría y peso se observan en la figura 5. Las condiciones mecánicas y de mantenimiento de estos camiones eran malas.

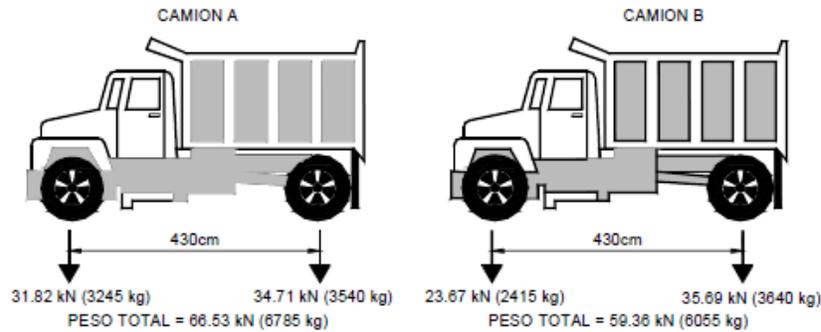


Figura 8: Carga viva utilizada, puente N°1

Para el puente N°2 se utilizaron dos camiones de 5530kg y 7985 kg, sus condiciones mecánicas y de mantenimiento eran buenas.

También se realizaron algunas pruebas con vehículos de características diferentes (un sedán y un camión que transporte concreto premezclado)

Las pruebas se llevaron a cabo haciendo circular los vehículos a distintas velocidades y en diferentes posiciones transversales. Gran parte de estas pruebas se realizaron con un solo vehículo, sin embargo, también se realizaron pruebas en la que circulaban dos carros en el mismo sentido o en dos carriles distintos. También se realizaron pruebas donde un vehículo quedaba estacionado en el centro mientras los demás circulaban a distintas velocidades (Valdés, 2008).

Resultados: Se observa que la amplificación dinámica de la carga viva en puentes, es un problema complejo que depende de distintas variables.

Entre ellas, 1. La característica dinámica del puente, las cuales dependen de la geometría, masa y propiedades de los materiales)

2. Las características de la carga viva (peso y velocidad).

También se aprecia una contribución importante de las condiciones mecánicas de los vehículos (suspensión y amortiguamiento).

Se entiende entonces que el problema de la amplificación dinámica de la carga viva en puentes queda resuelto en la medida que se desarrollen modelos que permitan una estimación más realista y confiables de ambos tipos de frecuencias (de la estructura y de la aplicación de la carga viva). Por ello se recomienda abordar el problema a partir de estos dos tipos de estudio (Valdés, 2008).

4.3 Campaña #3

MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL PUENTE VIRILLA, RUTA NACIONAL N°1

Localización: Ruta nacional N°1, en el distrito la Uruca , del cantón de San Jose en la Provincia de San Jose.

Longitud: 160m

Tipo: Posee siete superestructuras (seis de vigas I de acero y una de cercha), dos bastiones y dos pilas.

Año puesta en servicio: 1960



Figura 9: Vista del puente sobre el río Virilla, Febrero de 2014

Adaptado de: Francisco Navarro-Henríquez, D. U.-M. (Abril-Junio 2015). Mediciones y análisis de vibraciones en el puente Virilla, ruta nacional N° 1. Tecnología en Marcha,, Vol. 28, N.° 2.

Objetivo de la prueba: Inspección general de la estructura cuantificando las magnitudes vibratorias y la deformación en varias secciones del puente, en condición de vehículos en servicio.

Descripción de las pruebas: Las mediciones experimentales de vibración y esfuerzo dinámico se llevaron a cabo permitiendo la circulación vehicular normal en servicio sobre el puente en ambas direcciones

Se establecieron tres puntos de medición sobre el puente en donde se cuantificaron las magnitudes vibratorias y deformación (Francisco Navarro-Henríquez, 2015).

Cargas: Vehículo de prueba de diseño.

Resultados: De las mediciones de frecuencias en sitio se determinó que, ante excitaciones dinámicas debido al tránsito regular de vehículos, el puente experimenta aceleraciones altas simultáneas en las tres direcciones (situación que se observó en sitio), lo cual no es normal en este tipo de estructuras.

El comportamiento deducido del modelo de análisis teórico es similar y comparable al obtenido de los datos recopilados en sitio. Así, las frecuencias obtenidas en sitio se validan con el modelo estructural, las diferencias porcentuales son aceptables ya que en el modelo estructural no se puede reflejar en su totalidad el estado de rigidez actual del puente (Francisco Navarro-Henríquez, 2015).

4.4 Campaña #4

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN VIADUCTO FERROVIARIO SOBRE EL CAÑO EL ÁGUILA

Localización: Línea de alta velocidad Sevilla - Cádiz

Longitud: 58.3m

Tipo: Dos cajones monocelulares de hormigón pretensado



Figura 10: Vistas Generales del Viaducto a) Vista lateral antiguo viaducto, b) apoyo intermedio y vista inferior lateral, c) Vista superior, d) Vista Superior lateral

Adaptado de: GARRIDO, L. D. (s.f.). Análisis del comportamiento dinámico de un viaducto ferroviario sobre le caño el águila, *situado en la línea de velocidad Sevilla - Cádiz.*, Septiembre de 2013, Madrid.

Objetivo de la prueba: El objetivo de la prueba dinámica es la obtención de parámetros tales como las frecuencias de los primeros modos de vibración, el amortiguamiento o la amplificación dinámica.

Descripción de las pruebas:

La fuente de excitación será una locomotora que recorrerá el puente por una de las vías a diferentes velocidades:

Velocidad lenta, aproximadamente 5 km/h

Velocidad media: alrededor de 30 km/h

Velocidad máxima: Locomotora a la máxima velocidad posible y frenado justo sobre el tablero
(Garrido, 2013).

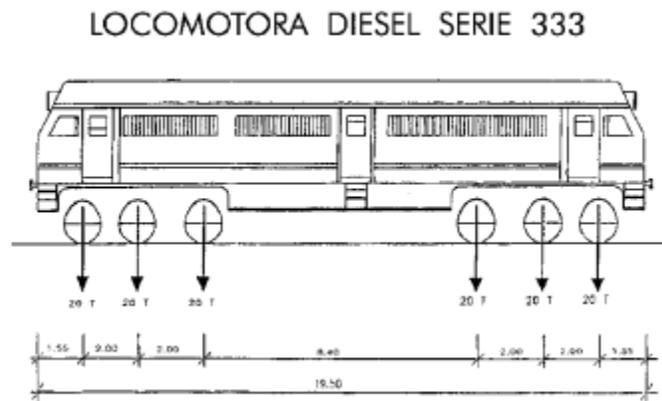


Figura 11: Distancia entre cargas y grupos de cargas de la serie 333

Fuente: GARRIDO, L. D. (s.f.). Análisis del comportamiento dinámico de un viaducto ferroviario sobre le caño el águila, *situado en la línea de velocidad Sevilla - Cádiz*. Universidad Politecnica Madrid, Madrid, Septiembre de 2013.

Resultados: En puentes continuos raramente se observan picos marcados de resonancia en este caso no existen efectos resonantes significativos.

La aceleración y deformación vertical del tablero están dentro de las limitaciones respectivamente para la máxima velocidad de operación de la línea de alta velocidad (Garrido, 2013).

4.5 Campaña #5

ANÁLISIS DE LA PRUEBA DE VIBRACIÓN FORZADA PUENTE SANJIANG

Localización: Zona de Yichang en Hubei

Longitud: 1117 m

Tipo: Vigas de hormigón suspendidas pretensadas

Año puesta en servicio: 2007



Figura 12: Puente de Sanjiang

Adaptado de: Junfeng Shi, T. Y. ([2007]582). Analysis on Forced Vibration Test of Sanjiang Bridge. *Sponsored by Hubei Communication Department.*

Objetivo de la prueba: Se realiza una prueba de vibración para medir la amplitud y el impacto en la estructura.

Descripción de las pruebas: La prueba de vibración forzada incluye prueba de funcionamiento del vehículo, prueba del freno y prueba del salto del vehículo.

En la prueba del vehículo en funcionamiento, un vehículo de 30 toneladas velocidades uniformes de 10 ~ 40km / h colocadas sobre el puente para medir la amplitud vertical y transversal y el impacto coeficiente. En la prueba de frenado, un vehículo de 30 toneladas Velocidad de 10km / h frenada en la mitad del tramo de medio suspendido Viga y el punto con una distancia de 32m a la parte superior del muelle.

La prueba de vehículo de salto dejó que un vehículo saltara sobre una barrera que incluye salto en movimiento y salto in situ. En el Prueba de vehículo en movimiento, un vehículo de 30 toneladas Velocidad de 10 km / h saltó sobre un triángulo de madera de 10 cm de alto bloqueado y luego se detuvo a la mitad del tramo de suspensión. Posteriormente, el vehículo siguió funcionando a una velocidad de 20 km / h para saltar sobre un bloque de madera de triángulo de 10 cm (Junfeng Shi, 2007).

Resultados: En la prueba de vehículo en funcionamiento del puente principal, las máximas amplitudes verticales y transversales fueron de 1,00 mm y 1,35 mm.

En el ensayo de vehículo en marcha del puente principal, el valor medio del coeficiente de impacto de la viga suspendida es de 0,1, que es ligeramente inferior al del criterio. Entre todos los valores, la más grande es de 0,15, que es ligeramente mayor que la del mayor criterio.

Sin embargo, en el enfoque con viga de 30 m, la media valor de los coeficientes de impacto es 0,21, que es mayor que el valor 0,11 del criterio. Significa el rendimiento dinámico de viga de 30m es baja (Junfeng Shi, 2007).

4.6 Campaña #6

PRUEBAS DINÁMICAS DEL PUENTE CONMEMORATIVO ALFRED ZAMPA JOEL

Localización: Noreste de San Francisco (Estados Unidos)

Longitud: 1056 m

Tipo: Puente colgante

Año puesta en servicio: 2003



Figura 13: Puente Alfred Zampa Memorial Bridge

Adaptado de: Joel p. conte, m., he, x., moaveni, b., masri, s. f., caffrey, j. p., & wahbeh, m. (june, 2008). Dynamic testing of alfred zampa memorial bridge. *Journal of structural engineering* © asce, 134(6): 1006-1015.

Objetivo de la prueba: Determinar las propiedades modales dinámicas del puente en su condición de línea de base tal como se ha construido sin cargas de tráfico o sísmica.

Descripción de las pruebas:

Se utilizaron tres tipos de fuentes de excitación para el campo dinámico pruebas realizadas en el AZMB: Cargas de tráfico controladas, vehículos de cargas de impacto y viento. Las cargas de tráfico controladas consistieron en dos camiones pesados de 405 kN Camiones A y 409 kN Camión B, respectivamente, atravesando el puente.

La excitación de impacto inducida por el vehículo fue una respuesta de vibración libre significativamente más alta que la respuesta de vibración inducida por el viento y la respuesta a las cargas de tráfico controladas.

Se definieron cuatro patrones para la carga de tráfico

- Dos camiones que cruzan el puente en paralelo

- Dos camiones cruzando el puente en dirección opuesta
- Un camión que cruza el puente
- Dos camiones que cruzan el puente siguiendo el mismo carril de tráfico

Los camiones sólo podían utilizar los dos carriles medios de tráfico durante las pruebas (Conte, he, moaveni, masri, caffrey, & wahbeh, 2008).

Resultados: Estas pruebas proporcionaron una oportunidad única para obtener las propiedades dinámicas del puente en su estado sin previa carga de tráfico o excitación sísmica. Las pruebas de campo dinámicas incluyeron pruebas de vibración forzada e inducida, basadas en cargas de tráfico y cargas de impacto inducidas por el vehículo.

Se ha encontrado que los modos de amortiguamiento presentan intervalo de 0,1-0,3%.

Sin embargo, estos bajos valores de amortiguación identificados son coherentes con los resultados de la identificación previa del sistema estudios de puentes colgantes de largo alcance basados en datos de vibración (Conte, he, moaveni, masri, caffrey, & wahbeh, 2008).

4.7 Campaña #7

PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA DINÁMICA PARA PUENTES DE CARRETERA USANDO CARGAS DE TRÁFICO

Localización: Provincia de Quebec, Canadá

Longitud: Luz de estudio 91.44m

Año puesta en servicio: 1995



Figura 14: Puente Milnekey

Adaptado de: By Patrick Paultre, M. A. (J. Struct. Eng., 1995). Dynamic Testing Procedures for Highway. *Journal of Structural Engineering*, 121(2): 362-376 .

Objetivo de la prueba: Evaluar el factor de amplificación dinámica utilizando vehículos de prueba con diversas configuraciones de carga y tráfico normal; evaluar las propiedades dinámicas de los puentes; cuando sea posible, para evaluar el efecto del refuerzo estructural.

Descripción de las pruebas: Se realiza un total de 30-40 carreras de vehículos sobre el tablero. La mayoría de las pruebas se realizan a alta velocidad (90-100 km / h) a lo largo de la línea central del puente y en un lado de éste, cerca de la pared de la barrera o de la acera.

Se hacen algunas pruebas a una velocidad de arrastre (15 km / h) para obtener una respuesta de carga y los datos también se registran con cargas aleatorias de tráfico.

El MTQ proporciona una tripulación de control de tráfico y conductores para todas las pruebas. Este equipo se mantiene en constante comunicación por radio con los conductores de camiones. Para cada ejecución se realiza la siguiente secuencia de eventos: (1) El operador del sistema señala al supervisor que comience la prueba; (2) el supervisor pide el cierre del tráfico; (3) Se

inicializa el sistema de monitoreo; (4) el supervisor señala a los conductores del camión que comiencen su carrera a una velocidad y posición determinadas en el puente; (5) El monitoreo de datos se activa antes de que los vehículos lleguen al puente; (6) cuando los vehículos salen del puente y se completa el monitoreo y el supervisor permite que el tráfico se libere mientras se instruye a los conductores a prepararse para la siguiente prueba (Patrick Paultre, 1995).

Resultados:

Las pruebas dinámicas deben ser una combinación de tráfico controlado y normal (al azar), utilizando al menos dos vehículos de prueba.

Los modos de torsión son a menudo difíciles de separar experimentalmente, ya que para las estructuras flexo - torsión, los instrumentos de medición deben colocarse a ambos lados. Cuando el uso de transductores de desplazamiento no es práctico, los datos de aceleración pueden ser Integrados para aproximar la medida de desplazamiento (Patrick Paultre, 1995).

4.8 Campaña #8

ENSAYOS DINÁMICOS DE PUENTES DE HORMIGÓN PRETENSADO Y VERIFICACIÓN NUMÉRICA

Puentes B14, B15 Y B13:

El puente B14 está situado entre los pueblos de Peutie y Melsbroek. Construido en 1971, tiene una longitud total de 89 m, y un ancho de 13 m, y dos carriles de tráfico.

La superestructura consta de 4 Vigas principales en dirección longitudinal y 11 vigas transversales. Se aplica un pretensado longitudinal; la cubierta es una losa de hormigón de 0,18 m de espesor y las vigas tienen una profundidad que varía de 1,0 a 2,1 m. La superestructura es

apoyada en cojinetes de neopreno, que permiten movimientos laterales en los dos pilares exteriores.



Figura 15: Puente B14

Adaptado de: Roeck, B. M. (NOVEMBER 1998). Dynamic Testing of Prestressed Concrete Bridges and Numerical Verification. *Journal of Bridge Engineering*, 159-169.

El segundo puente considerado es B15, situado entre Los pueblos de Peutie y Perk. Se muestra el puente B15 en la Fig. 13, tiene casi la misma edad que B14. Tiene una longitud total de 124,6 m, el cajón es de 9,4 m de ancho y varía en altura de 1,0 m a 2,5 m.

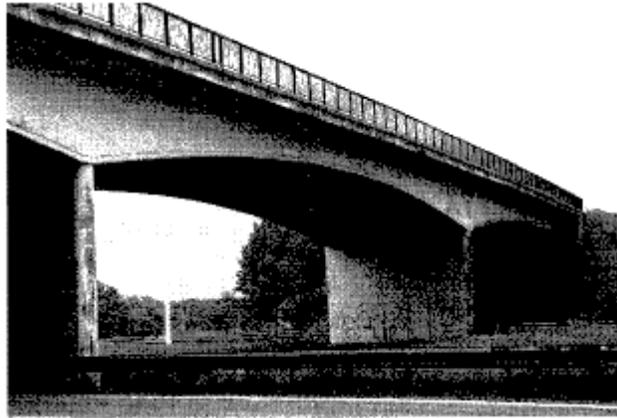


Figura 16: Puente B15

Adaptado de: Roeck, B. M. (NOVEMBER 1998). Dynamic Testing of Prestressed Concrete Bridges and Numerical Verification. *Journal of Bridge Engineering*, 159-169.

El tercer puente, B13, se encuentra entre los pueblos de Vilvoorde y Melsbroek. La longitud total del puente es 102,37 m y ancho de 26 m.

La superestructura consta de 5 vigas principales en dirección longitudinal y 20 vigas transversales distribuidas en los tres tramos en la dirección transversal. La cubierta es una losa de hormigón con un espesor de 0,18 m, mientras que la profundidad de las vigas varía entre 1,1 y 2,46 m. La superestructura de B13 está soportada por cuatro pilares.

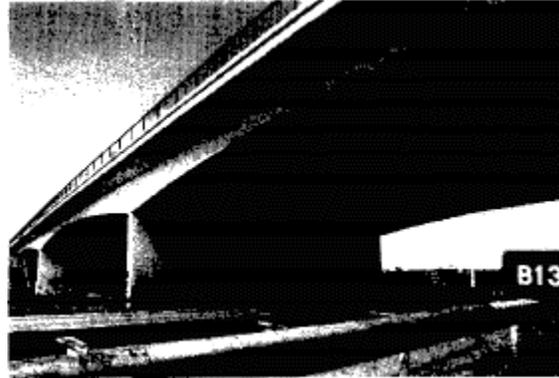


Figura 17: Puente B13

Adaptado de: Roeck, B. M. (NOVEMBER 1998). Dynamic Testing of Prestressed Concrete Bridges and Numerical Verification. *Journal of Bridge Engineering*, 159-169.

Objetivo de la prueba: Describir diferentes ensayos dinámicos realizados en tres puentes, B14, B15 y B13, sobre la carretera E19, que conecta Bruselas y Antwerpen en Bélgica, determinando los parámetros modales entre lo medido y lo calculado.

Descripción de las pruebas:

Las estructuras son excitadas por medios artificiales tales como sacudidores o pesos de caída.

La desventaja de este método es que el tráfico tiene que ser cerrado durante un tiempo bastante largo.

Se aplicó una fuerza de impacto a los tres puentes utilizando un peso de 120 kg que cae desde una altura de aproximadamente 1,0 m (figura 7). La colocación de este peso se eligió de acuerdo con los resultados de elementos finitos de cada puente.

Durante la configuración general de la prueba. No fue posible cerrar los puentes B15 y B13 debido a su tráfico pesado. Por lo tanto, el peso de impacto y los acelerómetros fueron colocados en la acera.

Vale la pena mencionar que durante la medición de B13, no podían evitar completamente la perturbación causada por los vehículos pasando sobre el puente porque no era posible detener el

tráfico. Por lo tanto, la calidad de la prueba de se espera que este puente sea menor que el de los otros dos.

Como se indicó anteriormente, debido a las consideraciones de tráfico, el camión de prueba sólo se pudo realizar en B14. Se utilizó un camión como excitación natural para excitar el puente. El eje delantero del camión fue 7.140 kg, mientras que el eje trasero fue de 10.000 kg. El camión recorre un carril con una velocidad de 60 km/h luego el camión gira y vuelve a funcionar con una velocidad de 40Km / h (Roeck, 1998).

Resultados: Las pruebas de impacto presenta frecuencias naturales idénticas (la diferencia es en general menor al 1,5%). La primera forma de modo se obtiene a partir del elemento finito, se pueden identificar las siete formas de modo.

Sólo un cuarto del puente es trazado para los resultados de los elementos y de los ensayos de impacto, mientras que el puente completo se traza para el camión.

Para la prueba de peso de impacto, se hace una comparación entre las formas de modos medidas en los puntos seleccionados y los calculados en el modelo de elementos finitos. Esta comparación muestra un buen acuerdo entre las formas de modo medido y calculado (Roeck, 1998).

5. Conclusiones

- En la caracterización de un puente luego de diversas pruebas estudiadas, se puede decir que, para la apropiada identificación de las principales propiedades dinámicas de estas estructuras, es importante combinar los resultados experimentales con la modelación analítica, ya sea que se

realice una prueba de impacto o de carga, una prueba antrópica o de desplazamiento o finalmente con el uso directo de vibradores.

-Las principales campañas registradas están directamente relacionadas con la aplicación de análisis modal, en el cual el puente se excita por medios artificiales. Se presentan métodos de estudio donde las fuerzas de impacto son basadas en cargas de tráfico controladas y en vehículos a distintas velocidades y en diferentes posiciones.

- En cuanto a otras aplicaciones de las pruebas dinámicas en puentes, se destacan las caídas de pesos (casos de impacto dinámico). Estos resultados obtenidos permiten validar y calibrar un modelo de elementos finitos detallado de cada uno de los puentes en ensayo. Con estos resultados es verificada la capacidad de servicio de los principales elementos estructurales permitiendo concluir si un puente es apto para prestar servicio.

- En puentes grandes y flexibles es costoso y difícil proporcionar un control de excitación para dar una respuesta significativa.

- Los trabajos realizados que presentan mejor respuesta y caracterización dinámica en puentes en concreto en sección viga cajón de grandes luces, son los ejecutados con vehículos de prueba cargados en movimiento y circulando en diferentes posiciones; estos resultados experimentales muestran que, aunque se utilice poca instrumentación, se puede obtener información detallada del comportamiento de los mismos.

Referencias Bibliográficas

- A. Cunha, E. Caetano, F. Magalhaes and C. Moutinho. (2006). From input – output to output-only modal identification of civil engineering structures, 1st International Operational Modal Analysis Conference IOMAC, Copenhaga, Dinamarca.
- Araujo, I. G., Rondón, E. M., & Cho, G. C. (2010). Pruebas de vibración ambiental en puentes, Ambient vibrations testing on bridges. *Uis Ingenierías*, 9(1), 55-68.
- Brownjohn, J., Zivanovic, S. and Pavic, A., (2008). Crow Dynamic Loading on Footbridges, Footbridge2008. Third International Conference. Porto, Portugal.
- Carrión, F. J. (15 de julio de 2014). Evaluación de puentes mediante el análisis de vibraciones: investigaciones recientes. Sanfandila, ISSN 0188-7297.
- Carrión, F. J., Lozano, A., Fabela, M., Vázquez, D. & Romero J. (1999). Evaluación de puentes mediante el análisis de vibraciones. Instituto Mexicano del Transporte Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Publicación Técnica No. 132, Sanfandila, Qro.
- C. R. Farrar y G. H. James III. (1997). System identification from ambient vibration measurement on a bridge, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 205(1), pp. 1–18.
- Elsa, C., Cunha, A. and Moutinho, (2011). C., Vandal loads and induced vibrations on a footbridge, *Journal of Bridge Engineering*, vol. 16, (3), pp. 375-382.
- Figueiredo, F.P., Da Silva, J.G., De Lima, L.R., Vellasco, P.C. and Andrade, S.A., (2007). A Parametric Study of Footbridge Under Pedestrian Walking Loads, *Engineering Structures*, pp. 605-615.
- Francisco Navarro-Henríquez, D. U.-M. (Abril-Junio 2015). Mediciones y análisis de vibraciones en el puente Virilla, ruta nacional N° 1. *Tecnología en Marcha*, Vol. 28, N.º 2.

- Garrido, L. D. (s.f.). (2013). Análisis del comportamiento dinámico de un viaducto ferroviario sobre le caño el águila, situado en la linea de velocidad Sevilla – Cádiz , Madrid.
- J. Valdés, J. de la Colina. (2008). Análisis de la amplificación dinámica de la carga viva en puentes con base en pruebas experimentales. Tecnológica ESPOL, VOL 1, 149-156.
- Joel p. conte, m., he, x., moaveni, b., masri, s. f., caffrey, j. p., & wahbeh, m. (june, 2008). Dynamic testing of alfred zampa memorial bridge. Journal of structural engineering © asce, 134(6): 1006-1015.
- Junfeng Shi, T. Y. ([2007]582). Analysis on Forced Vibration Test of Sanjiang Bridge. Sponsored by Hubei Communication Department.
- L. Agardh, (1994). “Impact Excitation of Concrete Highway Bridges.”, Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference, Honolulu, Hawaii, 31 Jan - 3 Feb.
- M. French and B. Gordon. (1995). “Short Time Period Excitation of Structures.” Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference, Nashville, Tennessee, February 13-16.
- M. F. Green. (1995). “Modal Test Methods for Bridges: A Review.” Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference, Nashville, Tennessee, February 13-16.
- Ortiz, O., A. Patrón, E. R., Ruiz-Sandoval, M., & Cremona., C. (Julio - diciembre de 2010). Evaluación de la Capacidad de Carga del Puente Antonio Dovalí Jaime, Mediante el Uso de Pruebas de Carga Estáticas y Dinámicas. Concreto y Cemento, VOL. 2 Núm. 1.
- Patrick Paultre, M. A. (J. Struct. Eng., 1995). Dynamic Testing Procedures For Highway. Journal of Structural Engineering, 121(2): 362-376.
- R. Brinker, P. Andersen, (1999). Ambient response analysis modal for large structures, Sxith international, congress on sound and vibration, 5-8, Copenhagen, Denmark, 1999.
- R. Cantieni. (2004). Experimental methods used in system identification of civil engineering structures, 2° Workshop: Problemi di vibrazioni nelle strutture civili e nelle costruzioni meccaniche, Perugia, pp. 10-11, Giugno.

Roeck, B. M. (NOVEMBER 1998). Dynamic Testing of Prestressed Concrete Bridges And Numerical Verification. *Journal of Bridge Engineering*, 159-169.

Sánchez, J. A., (2012). Análisis de la Interacción Humano-Estructura en Puentes Peatonales de Santiago de Cali, [Proyecto de grado en Ingeniería Civil], Univesidad del Valle, Cali, Colombia.

Y. Zhi-yuan, W. Feng-yuan and Z. Chang-sheng. (2005). A method of online damage identification for structures based on ambient vibration, *Applied Mathematics and Mechanics*, English Edition, Vol. 26, No. 2, pp 269-276.

Zwolski, J., & Bien, J. (2011). Modal analysis of bridge structures by means of forced vibration tests. *Journal Of Civil Engineering And Management*, 17(4), 590-599. doi:10.3846/13923730.2011.632489