



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**“Evaluación de la seguridad de puentes
peatonales”**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

VERÓNICA PÁRAMO CORTÉS

ASESOR:

DR. JOSÉ MANUEL JARA GUERRERO

MORELIA, MICHOACÁN.

DICIEMBRE DE 2015

DEDICATORIA

A Dios, porque todo lo que tengo y logro es gracias a Él.

A mi madre, por su confianza, paciencia y amor infinitos, por ser el mayor ejemplo de entrega, trabajo y esfuerzo.

A mi padre, por los valores que me inculcó.

A mis hermanos, por su apoyo, comprensión y amor incondicional.

A mis tías, que fueron un gran apoyo a lo largo de la etapa que termino.

A mi asesor, por su paciencia, por su apoyo y su cariño.

A mis maestros, por su pasión y amor por la docencia.

A mis amigos, por su aliento y cariño.

RESUMEN

En el presente trabajo se determinó la respuesta analítica y con vibración ambiental de dos puentes peatonales localizados en la ciudad de Morelia, Michoacán, con la finalidad de estimar sus características dinámicas. Para las mediciones de vibración ambiental de la estructura se utilizó un acelerómetro digital de 12 canales, colocando los sensores en diferentes posiciones de la estructura. Los registros obtenidos se procesaron para determinar desplazamientos, velocidades, aceleraciones, espectros de Fourier y funciones de transferencia. A partir de estas últimas se determinaron las frecuencias naturales de vibración.

PALABRAS CLAVE

Vibración ambiental, vibración en puentes peatonales, propiedades dinámicas, formas modales, seguridad.

ABSTRACT

The analytical and ambient vibration tests of two pedestrian bridges in Morelia City are presented as methods of measuring the dynamic characteristics. The ambient vibration was carried out using a digital recorder with twelve accelerometers placed in different locations of the structure. The records were processed to obtain displacements, velocities, accelerations, Fourier spectra and transfer functions. Based on these results, natural frequencies of vibration were assessed.

ÍNDICE

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN | i |
| 1.1 | ANTECEDENTES | i |
| 1.2 | Objetivo y alcance..... | iv |
| 2 | Mediciones de vibración ambiental en la seguridad de las estructuras..... | 1 |
| 2.1 | Instrumentación utilizada | 4 |
| 2.2 | Variables medidas en vibraciones..... | 6 |
| 2.3 | Procesamiento de señales | 8 |
| 2.3.1 | Análisis de señales en el dominio de la frecuencia..... | 9 |
| 3 | Descripción de tipos de puentes peatonales | 15 |
| 3.1 | Tipología de puentes peatonales..... | 17 |
| 3.1.1 | Por el material constitutivo | 17 |
| 3.1.2 | Según el tablero. | 20 |
| 3.1.3 | Según el funcionamiento mecánico..... | 24 |
| 4 | IMPORTANCIA DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS PUENTES | 31 |
| 5 | Modelos analíticos y medición de los puentes | 35 |
| 5.1 | Modelo analítico de la estructura | 36 |
| 5.2 | MEDICION CON VIBRACIÓN AMBIENTAL..... | 37 |
| 6 | EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD DE LOS PUENTES | 45 |
| | CONCLUSIONES | 47 |
| | REFERENCIAS | 49 |

1 INTRODUCCIÓN

Los puentes son estructuras muy importantes destinadas a salvar algún obstáculo entre dos puntos que se desean conectar a fin de asegurar un paso continuo y fluido ya sea de personas, vehículos, animales u otros elementos que así lo requieran.

Están constituidos principalmente de dos partes: la superestructura y la infraestructura.

- Superestructura. Se refiere a la construcción entre los apoyos que salva los claros y que recibe directamente la carga (losas o tableros, vigas y armaduras).
- Infraestructura. Es la parte encargada de transmitir los esfuerzos al suelo circundante. Está formada precisamente por los mencionados apoyos (pilas y estribos).

De acuerdo a la función principal que cumplen los puentes se pueden clasificar en vehiculares, peatonales y mixtos y por razones evidentes se puede afirmar sin duda que los puentes peatonales fueron los primeros en aparecer. A lo largo de la historia han constituido una construcción muy importante para el ser humano y siempre serán necesarios, es por esta razón que es de gran importancia el asegurarse de que cumplan su función y que proporcionen seguridad a los usuarios. A partir de estas premisas se vio la necesidad de evaluar el comportamiento de unos puentes peatonales que ayudan a cruzar el río de la Avenida Solidaridad en la ciudad de Morelia ya que a simple vista se podía determinar que tenían daños estructurales severos y que representaban un riesgo para quienes hacían uso de ellos

1.1 ANTECEDENTES

A ciencia cierta no se sabe, y tal vez no se sabrá, si los puentes se comenzaron a construir en épocas muy remotas debido a un simple accidente o por el desarrollo de la capacidad lógica de los primeros hombres, de acuerdo a Alberto Dallal, un crítico literario.

Como invento, éste ha demostrado la gran capacidad de la mente humana, porque hasta hoy día se siguen construyendo puentes que superan cada vez más los anteriores y muestran la genialidad del hombre.

Esos avances y mejoras pueden deberse a la curiosidad y a los experimentos con diversos métodos constructivos, ya sea porque el hombre no se ha cansado de probar hasta perfeccionar sus resultados o porque no ha parado de desarrollar hipótesis a partir de sus observaciones de manera que, haciendo uso de su raciocinio, ha conseguido establecer leyes o parámetros a seguir; de lo anterior puede decirse que el conocimiento empírico y el científico van de la mano pues uno lleva al otro, son interdependientes y ambos permiten que se alcance la exactitud.

Según Alberto Dallal, la construcción de los puentes comenzó en la prehistoria, tal vez con la ocurrencia de un antepasado de tirar un árbol sobre el cauce de un río para poder cruzar sobre él. Si esto ocurrió así, debido a la ejecución de una gran idea, el hombre no tuvo que esperar a que un evento fortuito le permitiera desarrollar una de las mejores invenciones. Cuando no había árboles disponibles, los homo sapiens llegaron a utilizar losas de piedra para pasar sobre las corrientes. La ciencia de construir puentes nació cuando se establecieron las leyes que hicieron posible elaborar cada elemento de los puentes de tal manera que fuera resistente a los esfuerzos provocados por las cargas aplicadas.

La edificación de puentes fue progresando conforme se requería más número de ellos y mejores resistencias; su primer gran desarrollo sucedió en la época gloriosa de Roma. Los romanos fueron quienes erigieron los primeros puentes de arco, los primeros puentes de piedra labrada, los primeros puentes hechos con un tipo de cemento llamado “puzolana”, consistente en agua, lima, arena y roca volcánica, y puentes de madera realmente resistentes. Muchos de esos puentes aún se conservan hoy en día. También, para el siglo XVI, en Sudamérica, la civilización inca ya construía los primeros puentes colgantes con cuerdas. Sin embargo, a la caída del imperio romano, la construcción de puentes se estancó o incluso se podría decir que retrocedió por más de 6 siglos, puesto que en la época medieval se comenzó a ver en los ríos una medida de seguridad para que los reinos no fueran invadidos, de manera que ya no se construían puentes para salvarlos e inclusive, se llegaron a derribar muchos de los ya construidos. Pero en los últimos años de la Edad Media revivió la construcción de ellos, especialmente gracias a la actividad de una rama benedictina denominada “Los Hermanos del Puente”. Esto causó que hombres como los hermanos Hans Ulrich y Johannes Grubenmann, de origen suizo y de oficio carpinteros y constructores de puentes, innovaran en los diseños de puentes

con vigas y arcos e incluso, que en 1716, Hubert Gautier, un ingeniero francés, escribiera el primer libro de ingeniería para la construcción de puentes.

A lo largo de más de 2000 años, desde la época de los romanos, la construcción de los puentes no había sufrido cambios notables alrededor del mundo. Los materiales más usados habían sido la madera y la piedra, y se utilizaban de forma muy parecida en el siglo XVII a como se hacía antes del siglo I a.C. Sin embargo, fue a finales del siglo XVIII, y gracias a la Revolución Industrial, que hubo accesibilidad económica al hierro colado y forjado para utilizarlo como material estructural, pues debido a sus altos costos antes sólo se usaba para fabricar utensilios y armas, con él se desarrollaron sistemas de celosía que permitieron la construcción de puentes cada vez más altos, aunque con la desventaja de que el hierro no tiene la capacidad elástica para soportar cargas muy grandes. Hasta poco más de medio siglo después se pudo fabricar industrialmente el acero y al adquirirse a precios accesibles se utilizó de inmediato en la construcción gracias que por su alto límite elástico se podían construir puentes muy largos. En el mismo siglo XIX ya se comenzó a utilizar el concreto junto con el acero para construir.

Desde la antigüedad ya se buscaba que estas estructuras fueran resistentes a fenómenos naturales como los sismos y las inundaciones, de manera que los procesos constructivos y los materiales evolucionaron hasta obtener puentes más duraderos y resistentes, lo cual seguirán haciendo con toda seguridad en el futuro.

Con la aparición de la locomotora de vapor comenzó una nueva etapa para los medios y las vías de comunicación terrestres, cambio experimentado de igual manera por los puentes a los que ahora se les pedía más solidez y resistencia, lo cual pudo ser sustentado por el aumento de la actividad económica promovido por la Revolución Industrial, la cual requería una mayor movilidad vial. Finalmente, la invención del automóvil promovió una demanda nunca antes vista de puentes.

Todas las innovaciones que se fueron desarrollando con gran rapidez desde la Revolución Industrial no sólo trajeron la construcción de los primeros puentes vehiculares sino también grandes mejoras en los puentes peatonales, tantas y tan grandes que hoy en día podemos ver puentes peatonales que salvan grandes distancias, que tienen diseños muy modernos y novedosos y sobre todo, que manifiestan la gran experiencia de todos esos siglos de construcción al hacer uso de los materiales y técnicas más adecuados para asegurar eficiencia y seguridad.

Los puentes peatonales actuales son estructuras cada vez más esbeltas atendiendo a la estética y gracias al incremento en la resistencia de los materiales modernos. Con

esto, sus claros y flexibilidades han aumentado mientras que las masas se ven disminuidas por lo que se hacen más sensibles a las cargas dinámicas, de manera que el paso constante de las personas, bicicletas e incluso motocicletas causa vibraciones que pueden llegar a ser excesivas, como es el caso de los puentes objeto de estudio de este trabajo. Como consecuencia de esto los criterios de diseño de estas estructuras se ven regidos por las condiciones de servicio ante las vibraciones. (Jhon Anderson Sánchez)

El diseño sísmico de puentes en México tiene la deficiencia de una normatividad no muy aplicada en la práctica, en muchos casos los métodos de análisis empleados son estáticos que consideran fuerzas laterales aplicadas en algún punto que representan una fracción del peso de la superestructura, lo cual nos lleva a diferencias entre los valores que usan diferentes calculistas, esto tal vez debido a la dificultad que el análisis dinámico puede representar. (IMT)

Sin embargo, la disponibilidad de computadoras con mayores capacidades en la actualidad, permite efectuar análisis dinámicos más precisos de grandes estructuras y en menor tiempo.

El incremento en los problemas de vibración en los puentes demuestra que éstos no deben ser diseñados únicamente para cargas estáticas.

1.2 Objetivo y alcance

En el presente trabajo se pretende analizar el comportamiento de dos puentes peatonales ubicados sobre la Av. Solidaridad (uno en la calle Jacona y otro en la calle Ocampo), para conocer la vibración de éstos debida al paso de peatones y al paso de los automóviles que transitan sobre la Avenida, de tal manera que se pueda identificar si los puentes son óptimos para su uso y si serán capaces de resistir las cargas a las que se pudieran llegar a someter para cumplir íntegramente con su función.

Se busca analizar modelos de los puentes realizados en el SAP con el fin de conocer sus propiedades dinámicas, como lo son la frecuencia y el período de retorno, y comparar dichos parámetros con los obtenidos de la realidad, mediante el procesamiento de los resultados de la medición física de la vibración de los puentes, de forma que podamos validar o no su seguridad. En caso de que la evaluación arroje un resultado negativo, se podrá formular una solución al problema.

2 MEDICIONES DE VIBRACIÓN AMBIENTAL EN LA SEGURIDAD DE LAS ESTRUCTURAS

La dinámica estructural es la ciencia que se encarga de analizar los sistemas estructurales como se presentan en la realidad: con acciones y respuestas que son función del tiempo, así como con fuerzas de inercia, de amortiguamiento y de recuperación.

En muchas ocasiones las estructuras diseñadas son muy vulnerables ante la acción de cargas dinámicas por lo que se vuelve muy necesario tener mucho cuidado en el diseño por los estados límite de servicio y de falla. Sin embargo, los criterios empleados en la elaboración del modelo para diseño distan de ser uniformes en la práctica. Las variaciones en dichos criterios pueden llevar a diferencias de hasta más del cien por ciento en los resultados de los analistas, aún y cuando se empleen las mismas herramientas matemáticas, por estas razones resulta necesario llevar a cabo un estudio minucioso para determinar las propiedades dinámicas de las estructuras (Olivares, 2001).

Para determinar las propiedades dinámicas de las estructuras se pueden utilizar dos técnicas de identificación:

- a) Técnicas paramétricas. En éstas se elaboran modelos matemáticos simplificados y se estiman los valores de los parámetros estructurales necesarios para producir una buena correlación entre los datos medidos y los datos calculados.
- b) Técnicas no paramétricas. Éstas consisten en análisis espectrales convencionales de pruebas de vibración ambiental con el objetivo de determinar las características de los sistemas estructurales.

En la actualidad existen tres tipos de pruebas no paramétricas o experimentales, para determinar las características dinámicas de las estructuras en escala real (León, 2009) y las tres son utilizadas en nuestro país, éstas son:

1. Pruebas de Vibración Ambiental. Están basadas en las vibraciones del tránsito de vehículos, de las acciones del viento y del uso de la estructura.

2. Pruebas de Vibración Forzada. Consisten en excitar las estructuras con una vibración constante de uno o más motores de vibración con control de velocidad preciso.
3. Pruebas con Registros Sísmicos. Hacen uso de acelerógrafos para registrar los movimientos provocados por sismos.

La diferencia principal entre las tres pruebas anteriores consiste en la amplitud del movimiento utilizada para determinar las propiedades dinámicas. Así mismo, la inversión económica en cada una de ellas es altamente diferente debido a la instrumentación y tiempo requeridos.

En el presente trabajo se hablará de las pruebas de vibración ambiental como método para validar los resultados analíticos fruto de la modelación matemática.

Los métodos de prueba dinámicas sin ningún tipo de control en la excitación inducida y de baja magnitud, se clasifican como pruebas de vibración ambiental. Ésta técnica hace uso de acelerómetros de alta resolución que registran las vibraciones producidas en las estructuras bajo las condiciones normales del ambiente al que están sometidas. Es una técnica simple y rápida para obtener datos, que tiene la ventaja de no interferir con las actividades normales que se realizan en las estructuras. Las señales captadas por los acelerómetros se transmiten a unos acondicionadores donde se amplifican y se filtran con el objeto de lograr registros claros y adecuados. Si se emplean ciertos arreglos de acelerómetros en puntos localizados de medición, se pueden determinar fácilmente las propiedades dinámicas de las estructuras.

Los estudios de vibración ambiental se han usado con éxito desde hace más de 35 años para la identificación de las características dinámicas de las edificaciones y se ha demostrado que este tipo de estudios permiten además, validar los modelos analíticos que predicen la respuesta de las estructuras. Otra aplicación de importancia de este método es observar el comportamiento de las estructuras antes y después del refuerzo sismo-resistente. También se ha intentado la calibración de modelos analíticos con los registros de estas pruebas para analizar en tiempo real las formas modales de las edificaciones, a fin de estimar la existencia, ubicación y magnitud de posibles daños (Huerta, 2010).

La popularidad de los estudios de vibración ambiental radica en la factibilidad de medir la respuesta de la estructura mientras se encuentra sometida a cargas de servicio, así como por su facilidad de ejecución y su costo más bajo que el requerido

para elaborar un modelo estructural refinado, que no siempre es comprobable, o de los de otro tipo de excitaciones, como la vibración forzada, esto aún a pesar del hecho de que sus resultados sean restringidos al rango elástico (que es real para la mayoría de métodos de caracterización estructural); sin embargo éstos son muy buenos y válidos cuando se requieren estimaciones rápidas del comportamiento estructural en investigaciones preliminares o identificación de vulnerabilidades, o bien, cuando un modelo computacional más refinado necesita ser adaptado para su uso en la estructura.. Las cargas pueden ser de cualquier tipo: viento, ondas, tráfico vehicular o peatonal, etc. Así, la fuente representa una excitación real típica, a la cual se encuentra sujeta la estructura durante el transcurso de su vida. Sin embargo, puesto que las características de la excitación son, en su mayoría desconocidas, las fuerzas inducidas serán de un orden aleatorio por lo que la respuesta en la estructura sujeta a tales efectos, contendrá todos sus modos normales,

El procedimiento típico que se sigue para desarrollar las pruebas de vibración ambiental es similar al requerido para las pruebas de vibración dinámica, con la singularidad de no requerir maquinaria especial para excitar la estructura ya que ésta se da por agentes presentes en la misma y en su alrededor. En ocasiones es de gran utilidad realizar un modelo computacional de la estructura, con el cual se puede determinar los sitios más convenientes para efectuar la medición (donde se colocarán los acelerómetros), de acuerdo a los resultados del modelo y disposición geométrica de la estructura. No obstante si no se cuenta con este tipo de resultados preliminares se procurará tomar puntos centrales en planta (centros de masa) y zonas en las que se aprecien mayores desplazamientos, por ejemplo esquinas, las cuales son buenas referencias para la toma de registros, sin embargo, hay que recordar que, finalmente, el arreglo dependerá de lo que se busca revisar y de las características del sistema estructural.

Entre las desventajas de esta técnica, se encuentra que el espectro de excitación, en la mayoría de los casos, se concentra dentro de una pequeña gama de frecuencias, con la presencia de gran cantidad de ruido, haciendo que el espectro se limite a una banda estrecha de frecuencias por lo que sólo un rango limitado de la dinámica de la estructura puede ser identificado y supervisado. Aunque pueden ser obtenidos datos confiables de las frecuencias características y sus correspondientes formas modales, la estimación de valores de amortiguamiento es propensa a tener errores debido al proceso de excitación y post-proceso de la señal. Además, el procedimiento de análisis necesario para extraer los parámetros modales hace que se dificulte o sea escasa la identificación de algunos modos. Por tanto, los resultados

por excitación de bajo nivel son poco apropiados para predecir la reacción dinámica de una acción de alto nivel como debida a sismos. Por lo cual para alcanzar mejores resultados, es necesario utilizar técnicas con una fuente de excitación de energía más alta. Sin embargo, para los fines de este trabajo, este tipo de estudio resulta suficientemente adecuado.

2.1 Instrumentación utilizada

Para conocer los cambios en las características dinámicas de los edificios, es necesario recurrir a la instrumentación para determinar, a intervalos adecuados de tiempo, los cambios en los modos normales de oscilación de la estructura. Esto implica determinar la cantidad y ubicación adecuada de los sensores necesarios para conocer la respuesta dinámica del edificio. (Huerta, 2010).

Cuando medimos el nivel de ruido en un punto, se puede decir que estamos obteniendo el nivel de presión sonora. En el caso de las vibraciones, lo que medimos puede ser la aceleración, la velocidad o el desplazamiento de la vibración. El parámetro más usual en registrar es la aceleración.

La instrumentación es el mecanismo que se utiliza para reunir información de algún proceso (Proakis & Manolakis, 1996), esto implica que un instrumento se componga de varias partes, entre ellas: un sensor, un transductor y un mecanismo de grabación digital o análogo. En vibraciones, el sensor es la parte del sistema que responde a una excitación externa mientras que el transductor es el que se encarga de convertir la respuesta del sistema en una señal eléctrica. Comúnmente, al conjunto sensor-transductor se le llama simplemente sensor. (Cadavid).

Los aparatos que nos ayudan a medir las aceleraciones se llaman acelerómetros, la función de éstos es, como lo dice su nombre, medir las aceleraciones de las vibraciones para después, mediante la selección de una frecuencia haciendo uso de un filtro, convertirlas en señales eléctricas que, a través de un indicador, nos ayuden a determinar el valor de dichas aceleraciones. El acelerómetro es un aparato casi del mismo tamaño de un micrófono que se pone en contacto con la superficie de la que se quieren obtener las vibraciones.

El equipo utilizado para realizar las mediciones de vibración es propiedad de la Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo y consta de un sistema de

adquisición de datos K2 de la marca Kinemetrics, con capacidad de 12 canales con un convertidor analógico digital de 24 bits con un filtro anti alias tipo Brickwall de respuesta de impulso finita de 120 dB, que se muestra en la figura 1, así como 2 sensores Episensor ES-U2 y un sensor Episensor ES-T, montados en montados en placas de aluminio de 2.54 x 35 x 35 cm, mostrados en la figura 2.



Figura 1. Consola K2



Figura 2. Sensores ES-T y ES-U2, Kinemetrics, Inc., 2015

Para la identificación de las frecuencias naturales se planteó la siguiente ubicación de los sensores.

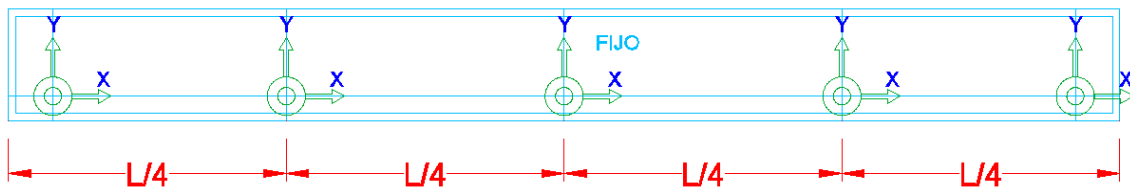


Figura 3. Instrumentación tipo utilizada en este trabajo.

2.2 Variables medidas en vibraciones

Las variables que se registren con los instrumentos deben reproducir el movimiento del suelo al paso de las ondas, es por esto que es requisito que se registren mediciones en tres direcciones ortogonales, bien sea de los desplazamientos (x), de las velocidades (\dot{x}) o de las aceleraciones (\ddot{x}), claro está, en función del tiempo.

Las tres variables anteriores se relacionan analíticamente por derivadas o por integrales de una respecto a la otra, en esta forma:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt}$$

$$\ddot{x} = \frac{d\dot{x}}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$\dot{x} = \int \ddot{x} dt$$

$$x = \int \dot{x} dt = \iint \ddot{x} dt dt$$

Se tiene que para vibraciones armónicas existe la relación $\ddot{x} = \omega \dot{x} = \omega^2 x$, donde ω es la frecuencia angular. Así, medir un solo parámetro significaría la capacidad de obtener los otros dos; sin embargo, se recomienda medir directamente el parámetro deseado debido a que existen inexactitudes en los cálculos numéricos.

Casi toda la totalidad de las normas internacionales de manejo de vibraciones se han desarrollado a partir de la velocidad y las mediciones se realizaron con instrumentos que registraban ese parámetro, es por eso que a veces se vuelve más óptimo el medir ese dato.

Cada una de las variables tiene su propio transductor (un elemento que transforma una magnitud física en una señal eléctrica) pero todas las señales cuentan con información sobre las tres variables, aunque en rangos diferentes de frecuencia con diferente nivel de amplificación. (Cadavid).

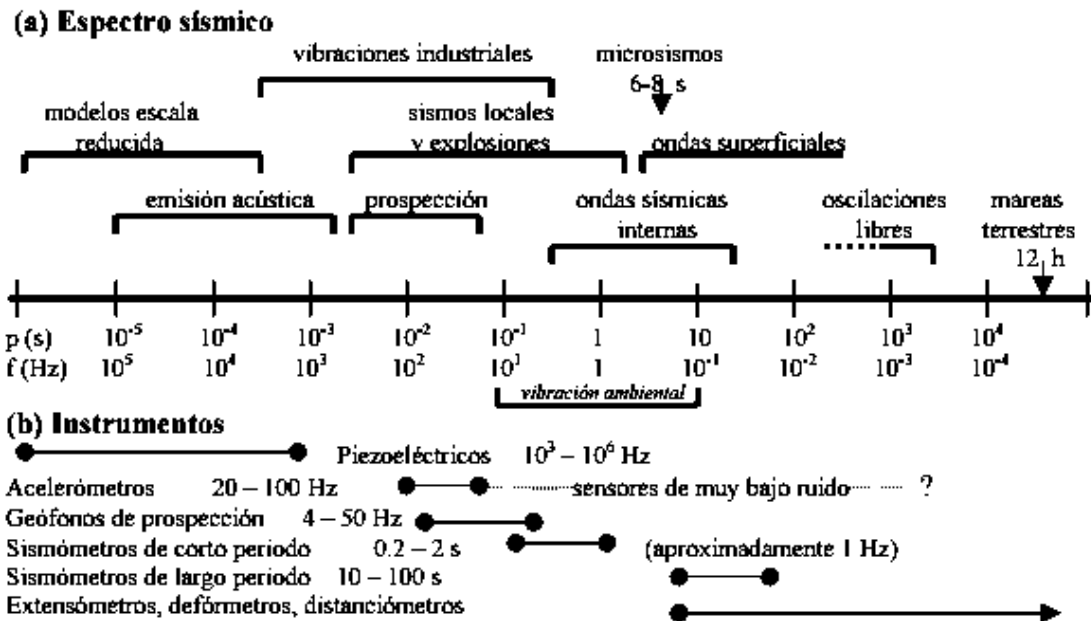


Figura 4. Uso de instrumentos en función del tipo de espectro a registrar.

En la figura 4 se observa el tipo de instrumento a utilizar en la medición de ciertas vibraciones, señalándose a qué períodos y frecuencias pertenecen éstas. Como se puede notar, la vibración ambiental está en el rango de frecuencias de entre 0.1 y 10 Hz y es la fuente de datos de este trabajo y uno de los instrumentos que se pueden utilizar para registrarla es un sensor de bajo ruido, es decir, de una sensibilidad pequeña para lograr medir las pequeñas amplitudes de la vibración ambiental. De acuerdo a algunas normas y algunos autores como Muriá-Vilá y González, se requiere obtener medidas simultáneas de varias direcciones para establecer las funciones de transferencia de las estructuras (de las que un poco más adelante se hablará un poco), por lo que resulta necesario hacer uso de un equipo multicanal.

El tipo de sensor que se utiliza depende de la aplicación particular. En el área de la dinámica estructural es usual medir aceleraciones, las cuales están relacionadas directamente con las fuerzas inerciales en las estructuras.

Lo que se pretende con estos instrumentos es aplicar en la entrada de ellos señales conocidas y evaluar las respuestas que aparecen en su salida para conocer la respuesta de un sistema en función del tiempo. De este modo se obtiene algo llamado respuesta transitoria; sin embargo, lo más funcional es estudiar matemáticamente la respuesta del sistema mediante lo que se llama función de transferencia, por medio de ella se puede conocer:

- La respuesta del sistema ante una señal de entrada determinada.
- La estabilidad del sistema (si la respuesta del sistema se va a mantener dentro de unos límites determinados).
- Los parámetros que se pueden aplicar al sistema para que éste permanezca estable.

Se define como función de transferencia $G(s)$ de un sistema al cociente de la transformada de Laplace de la señal de salida y de la transformada de Laplace de la señal de entrada, suponiendo condiciones iniciales nulas.

2.3 Procesamiento de señales

Se puede decir que una señal es cualquier perturbación en un medio, capaz de ser perceptible, como un movimiento mecánico o vibración, emisión de luz, sonido u otro tipo de energía, aunque hoy día se asocia más al fenómeno eléctrico por su tratamiento y aplicaciones cotidianas. Las señales se clasifican en cinco tipos, señales on/off, tren de pulsos, señales DC, variables en el dominio temporal y variables en el dominio de las frecuencias, éstas últimas son las que permiten realizar una exploración del comportamiento dinámico de la estructura, partiendo para ello, de señales que originalmente fueron medidas en el dominio del tiempo, de las cuales, sólo con un análisis matemático permitirán obtener las características de interés. Los dispositivos utilizados para captar estas señales consisten de instrumentos de registro de alta sensibilidad, los cuales reconocen directamente los movimientos vibratorios en una o varias direcciones ortogonales principales del punto de medición seleccionado. En el aparato los movimientos se transforman internamente en señales eléctricas (transductor) que en función de los niveles de voltaje detectados, son escalados de forma directamente proporcional a la señal de entrada (proceso que se conoce como condicionamiento de la señal) para su posterior almacenamiento en dispositivos de memoria de estado sólido, que permiten su recuperación hacia algún equipo de cómputo personal. Adicionalmente, otros procesos de carácter electrónico que llegan a realizarse dentro del instrumento son:

pre-amplificación, filtrado y amplificación de señal; los primeros son para aumentar la intensidad de señal obtenida del sensor ya que generalmente, en el caso de vibraciones ambientales, es débil; los filtros se utilizan para eliminar las señales producidas por fuentes de ruido ajenas que pueden dificultar la identificación de los parámetros de interés, y los terceros para aumentar la magnitud de la señal a niveles apropiados para su registro y procesamiento.

El procesado de la señal se define, por lo general, como la resolución de determinados algoritmos para obtener la información contenida intrínsecamente en ésta, a fin de visualizar y/o determinar características que permitan definir parámetros propios de la fuente generadora, en este caso edificaciones civiles, los cuales, para nuestro campo de estudio, pueden dejar de manifiesto la existencia de comportamientos extraños o simplemente verificar el cumplimiento de hipótesis formuladas durante el proceso de diseño de éstas. Este proceso comienza después de realizada la campaña de monitoreo, con la extracción de las señales de la memoria física de los aparatos de medición, que generalmente se encuentra almacenada en forma digital, accedando a través de conexiones alámbricas vía puerto serial de la computadora o inalámbricas vía internet, valiéndose a su vez, de algún software. Cada registro posee tres componentes, cada uno de los cuales puede alcanzar extensas longitudes dependiendo del tiempo medido.

Para fines del análisis y obtención de formas modales existe una variedad de métodos a emplear que, en general, requieren de la sincronización de las señales previa reducción de ruido y corrección de línea base, de modo que, de las señales involucradas sea posible la obtención de espectros a partir de los cuales por comparación y auxiliándose en operaciones secundarias entre éstos, se identifiquen los elementos de interés, buscando una elevada congruencia ante un mismo evento, dígame vibraciones ambientales o sísmicas.

2.3.1 Análisis de señales en el dominio de la frecuencia

El proceso en esencia descompone o expande una señal en términos de funciones seno y cósenos de diferentes frecuencias cuya suma corresponde a la señal original, es decir, es capaz de distinguir las diferentes componentes de frecuencia de la señal y sus respectivas amplitudes.

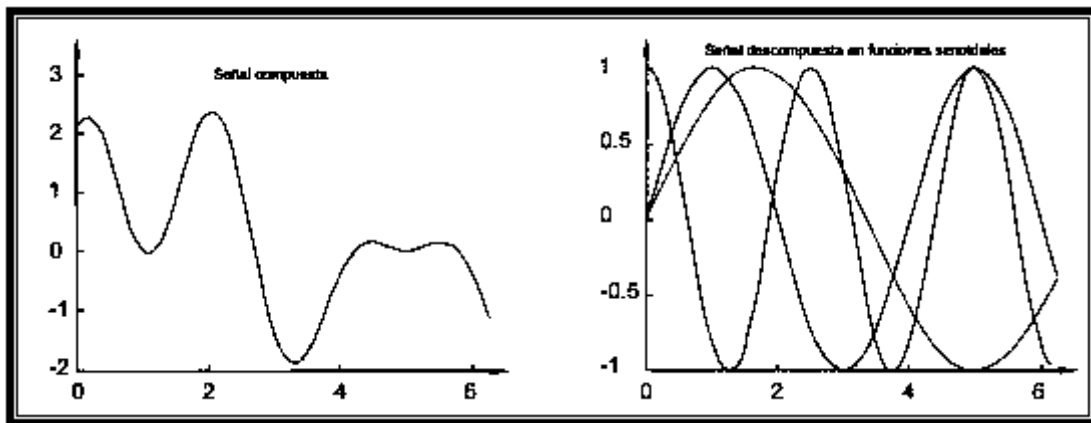


Figura 5. Descomposición de la señal

Así, una función dada puede expresarse como:

$$f(x) = c_1\phi_1(x) + c_2\phi_2(x) + \dots + c_k\phi_k(x) \quad (2.1)$$

Donde

ϕ_i Corresponde a funciones seno y coseno de distinta frecuencia. Coeficientes c_i que afectan la amplitud de la función.

Tomando la forma de la conocida serie de Fourier

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_n \cos kx + b_n \sen kx) \quad (2.2)$$

Usando la identidad de Euler, $e^{ikx} = \cos kx + i \sen kx$ esta serie se puede reescribir como una combinación de funciones exponenciales complejas, que al extender para todos los valores de x , da lugar a lo que se conoce como la transformada de Fourier, ec. 2.3, que tiene la particularidad de permitir el manejo de las señales en el dominio de la frecuencia y visualizar sus componentes de una forma clara.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{j2\pi f t} df \quad F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(s) e^{-j2\pi f s} ds \quad (2.3)$$

En mediciones de sistemas estructurales, la señal $x(t)$ se obtiene a través de un convertidor analógico-digital, por lo que la representación de la transformada de Fourier se realiza en un periodo de tiempo finito en forma discreta. Si se considera una frecuencia de muestreo f_s ; con un número de muestras n en tiempo y

frecuencia, la resolución $\Delta f = f_s/n$ y el intervalo $\Delta t = 1/f_s$. La transformada discreta, entonces, se puede expresar a través de las relaciones:

$$F_k = \sum_{i=0}^{n-1} x_i e^{-j2\pi i k / n \Delta t} \quad x_i = \sum_{k=0}^{n-1} F_k e^{j2\pi i k / n \Delta f} \quad (2.4)$$

Al multiplicar la ec. 2.4, por Δf , F_k , entonces, representa una amplitud de densidad espectral. Esta amplitud es la forma final de lo que se conoce como transformada discreta de Fourier, DFT, de la forma:

$$F'_k = \sum_{i=0}^{n-1} x_i e^{-j2\pi i k / n} \quad x_i = \sum_{k=0}^{n-1} F'_k e^{j2\pi i k / n} \quad (2.5)$$

La implantación directa de las ecuaciones requiere aproximadamente n^2 operaciones complejas. Sin embargo, cuando el tamaño de la secuencia es, para $n = 2^m$ para $m = 1, 2, 3, \dots$, entonces el cómputo de la DFT puede mejorar en aproximadamente $n \log_2(n)$ operaciones. En procesamiento digital se conoce a este caso particular como la transformada rápida de Fourier o FFT. La señal se muestrea de tal manera que produce una cantidad específica de números binarios que representan el segmento de la función de entrada. Estos números se transforman a través de la FFT en valores complejos en el dominio de frecuencias. Para cada punto de frecuencia $A(f)$ se calcula con el promedio de las amplitudes A_i de acuerdo con la ec. 2.6.

$$A(f) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^2(f)} \quad (2.6)$$

Tras el proceso matemático se obtienen básicamente dos elementos de importancia; el primero, espectro o contenido de frecuencias de la señal y el segundo el ancho de banda como medida cuantitativa del rango de frecuencias donde se concentra la potencia o energía de una señal.

Tal proceso es repetido para cada segmento de señal en que se dividió la original, obteniendo sus respectivos coeficientes de Fourier, no obstante, se observaran diversas frecuencias pico entre cada segmento, que agrupándolas permitirán conocer las diferentes bandas de frecuencia características y que solo tras un promediado se puede llegar a establecer alguna como frecuencia importante.

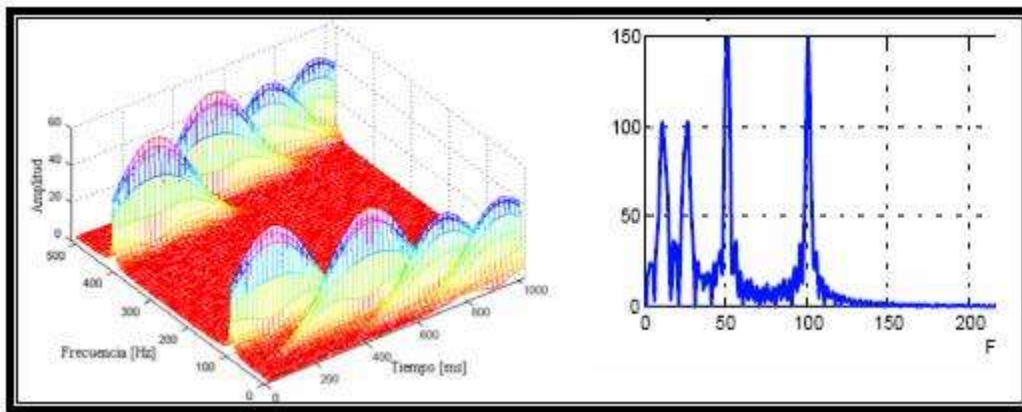


Figura 6. Proceso de ventaneo para una señal dada.

No obstante la existencia de ruido en la señal puede provocar la aparición de múltiples picos dentro del espectro, de modo que para mejorar la definición de las frecuencias relevantes se determina el espectro de potencia que, en términos simples, es un indicador de la cantidad de energía que se libera en una determinada frecuencia, para la señal de interés se calcula utilizando la ec. 2.7.

$$S(f) = X^*(f)X(f) = |X(f)|^2 \quad (2.7)$$

Donde:

$X(f)$ Es la transformada de Fourier de la señal $x(t)$.

$X^*(f)$ Es el conjugado complejo de $X(f)$

Hasta este punto la señal es procesada de forma independiente; para determinar las relaciones dinámicas entre señales de entrada y salida se utilizan cuatro herramientas adicionales: el espectro cruzado, función de coherencia, función de transferencia y determinación de fases.

Espectro Cruzado

Al igual que en el espectro de potencia, esta permite identificar las frecuencias con un alto índice de importancia y que a su vez se encuentran presentes en ambas señales, ello en función de la cantidad de energía presente entre ellas, para su cálculo se emplea la convolución entre las transformadas de Fourier de las señales involucradas, ec.2.8.

$$S_{xy}(f) = X^*(f)Y(f) \quad (2.8)$$

Función de Coherencia

El valor de la función representa la fracción de la salida del sistema que se relaciona directamente con la entrada. En otras palabras, es una función de correlación cruzada en el dominio de las frecuencias. La función de coherencia $\gamma^2(f)$ se obtiene al aplicar la ec.2.9, por sus características es adimensional y desarrolla valores próximos a 0 cuando no existe relación entre las señales comparadas y por el contrario, 1 para frecuencias afines entre sí.

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{yx}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \quad (2.9)$$

Cocientes Espectrales

Sirven para determinar el nivel de ganancia en energía que existe entre la señal de salida y entrada al sistema estructural, siendo posible relacionar la amplitud de la señal de entrada con la de salida, dicho cociente se calcula como lo indica la ec. 2.10.

$$|H(f)|^2 = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (2.10)$$

Donde:

$S_{xx}(f)$ Es la transformada de Fourier de la señal $x(t)$.

$S_{xy}(f)$ Es el conjugado complejo de $X(f)$

Fase

Para fines ingenieriles, el espectro de fase sirve para determinar la dirección del movimiento de un punto de medición respecto a la de otro, para su obtención se determina la forma polar a partir de las componentes complejas calculadas del cociente espectral. Los valores cercanos a 0° en una frecuencia dada, indican movimiento simultáneo en un mismo sentido (en fase), mientras valores en torno a

180° representan movimiento en sentido opuesto. Dentro de los inconvenientes de implementar la transformada de Fourier como sistema de análisis están, que al emplear un método numérico (transformada discreta de Fourier) en ocasiones suele producir un efecto de “aliasing” o solapamiento, desapareciendo frecuencias, enmascarándolas o sustituyéndolas por otras, dicho efecto es más marcado cuanto mayor es el espacio entre muestras, (digitalización de la señal de entrada muestreo) y cuanto mayor es el número de puntos de la ventana de muestreo, observándose la pérdida de información, pudiendo ser en ocasiones esas frecuencias perdidas, las responsables de un acoplamiento por resonancia y por lo tanto, causantes de daños de los cuales habitualmente no se encuentra explicación cuando se trata de asociar a un análisis de Fourier normal. Aunado a esto se presentan algunos errores en el método, por el inconveniente de tratar un fenómeno transitorio y no lineal, como señal estacionaria. En algunos casos la transformada de Fourier no es capaz de revelar procesos de fallo, es decir, a pesar de observarse vibraciones, fatigas y fallos, al analizarse empleando la transformada de Fourier no consigue determinar un patrón claro del fenómeno.

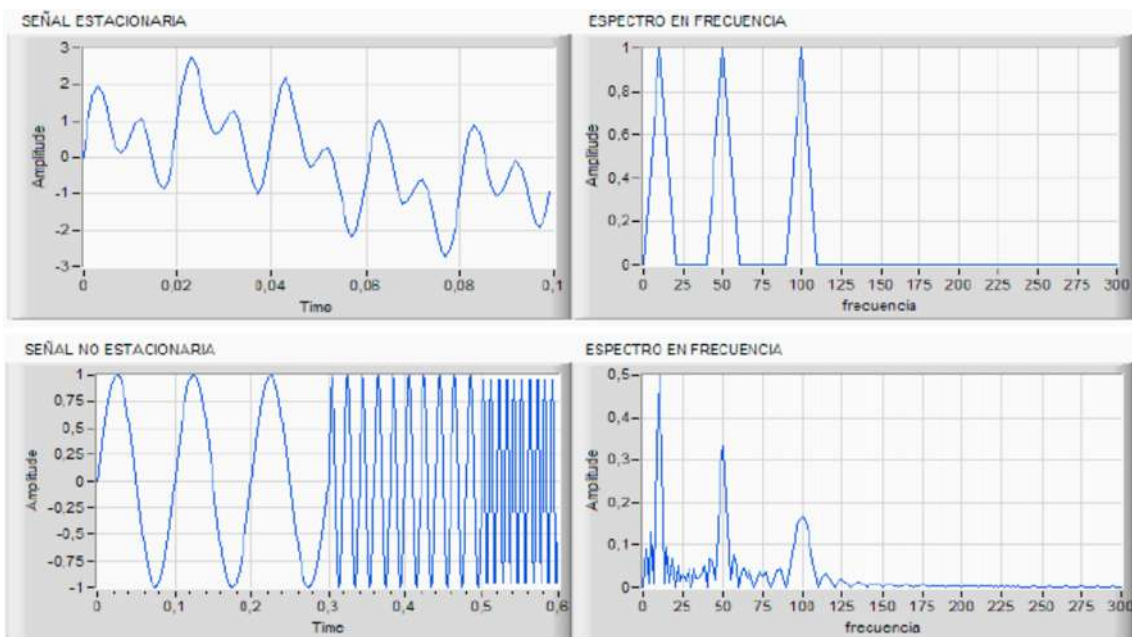


Figura 7. Señales (estacionaria y no estacionaria) con sus respectivos espectros de Fourier

3 DESCRIPCIÓN DE TIPOS DE PUENTES PEATONALES

Existen varios criterios para la clasificación de puentes, entre las más comunes tenemos la siguiente, indicada por el Ingeniero español, Alberto Villarino en sus notas para la docencia. (Villarino).

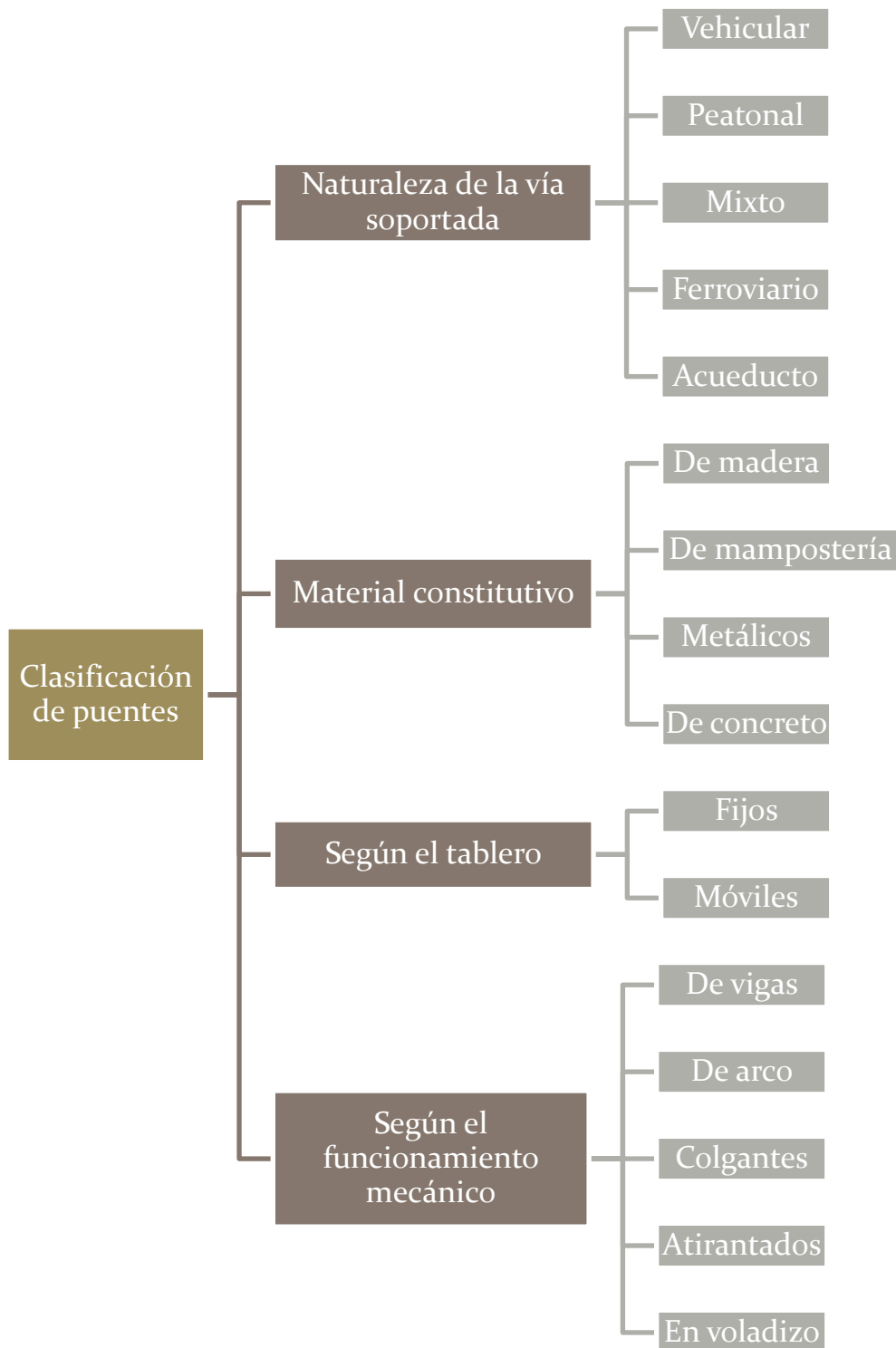


Figura 8. Tipos de Puentes

Como se observa en la figura 1, los puentes peatonales pertenecen a la clasificación de acuerdo al tipo de vía soportada y, puesto que éstos se pueden clasificar de acuerdo a los demás criterios, en base a ellos se describirán a continuación los tipos de puentes peatonales.

3.1 Tipología de puentes peatonales

3.1.1 Por el material constitutivo

3.1.1.1 *De madera*

Son los puentes más fáciles y rápidos de construir, así como los más económicos. Con seguridad fueron los primeros en construirse debido a que la madera fue el primer material para erigir las estructuras y hasta nuestros días aún se edifican. Presentan el inconveniente de la susceptibilidad frente a las condiciones ambientales así como poca resistencia ante las fuerzas a las que se someten, además de que por cuestiones ecológicas hay poca disponibilidad de la materia prima.



Figura 9. Puente de madera en Cangas de Onís, España

3.1.1.2 *De mampostería*

Son aquellos elaborados con bloques de piedras, fueron muy desarrollados en la época gloriosa de Roma y aún continuaban hasta 1905 aproximadamente cuando la economía de los nuevos materiales los hizo a un lado. Con ellos se pueden salvar claros de hasta 90 m.



Figura 10. Puente romano en Torre de Arcas, España

3.1.1.3 *Metálicos*

El empleo del hierro revolucionó la construcción por completo, especialmente la de los puentes, debido a que sus características eran mejores que las de los demás materiales de la época. Y aún hoy día sigue siendo uno de los mejores materiales, aunque modificado para obtener mejores propiedades. Al principio se utilizaba fundición pero por su fragilidad y poca capacidad de deformación fue sustituida posteriormente por el hierro forjado que, aunque tenía un mayor precio, presentaba mejores características mecánicas; sin embargo, con la fabricación industrial del acero, lo que lo hizo más asequible, éste material sustituyó en definitiva a los anteriores por ser éste más dúctil.



Figura 11. Puente sobre la autopista Oklahoma, USA

3.1.1.4 *De concreto*

Son puentes que combinan el concreto y el acero para obtener estructuras de un material compuesto capaces de resistir con éxito las cargas de compresión y las de tensión a un costo muy bajo si se diseñan bien.

Además de los puentes de concreto armado normales, también puede haber puentes de concreto presforzado (ya sea pretensado o postensado) y mixtos.

Los puentes de concreto armado normales son aquellos en los que el refuerzo es pasivo, en otras palabras, que éste entra en acción cuando las cargas exteriores actúan en la estructura, mientras que en los de concreto presforzado el refuerzo es activo por su acción compresora sobre el concreto para reducir al máximo las tensiones en el concreto.

Los puentes de estructura mixta representaron una novedad en el trabajo en conjunto entre acero y concreto pues en este caso los materiales no se mezclan sino que se simplemente se conectan entre sí. Éste tipo de puentes fueron la solución al reto de construir tableros o calzadas continuas y resistentes pues con las losas de concreto yuxtapuestas a las vigas de acero se consiguieron pasos como los deseados. Sus ventajas son que su construcción es igual a la de los puentes metálicos, lo que representa mayor ligereza, facilidad de montaje y una losa integrada y prácticamente continua de concreto.



Figura 12. Puente peatonal del Tribunal de Justicia en Morelia, Michoacán.

3.1.2 Según el tablero.

3.1.2.1 Fijos

Son aquellos cuyo tablero tiene una posición permanentemente fija. En la figura 6 podemos observar que el tablero superior es fijo y sirve para el paso de peatones cuando el tablero inferior permite el paso de los barcos.

3.1.2.2 Móviles

Son aquellos cuyo tablero o parte de él es móvil, con el objeto de permitir el paso alternativo de dos tipos diferentes de tráfico, dígase el marítimo y el terrestre en general. Tienen la gran ventaja de no tener que ser muy grandes para cumplir su ambos pasos, pues al replegarse dejan pasar los buques o barcos y al extenderse permiten el paso peatonal. Pueden presentar inconvenientes en horas pico del tráfico o cuando las condiciones ambientales son adversas pero indudablemente representan el gran ingenio del ser humano.

Los puentes de tablero móvil pueden subdividirse a su vez en basculantes, levadizos, giratorios, de desplazamiento vertical, transbordadores, deslizantes y flotantes.

3.1.2.2.1 Basculantes

Son puentes móviles compuestos por dos secciones que se abren en forma perpendicular al plano del puente gracias a la acción de unos contrapesos ubicados bajo la plataforma. Éste tipo es el más utilizado en la actualidad. En la figura 6 se puede observar el funcionamiento del Tower Bridge, cuya parte inferior es de este tipo. Su movimiento es gracias al giro sobre una rótula del conjunto tablero-contrapeso. Dicha rótula se coloca en el centro de gravedad del sistema y es accionada mediante un sistema hidráulico. Esta es la forma en que funcionan la mayoría de los puentes basculantes en la actualidad.



Figura 13. Puente de la Torre, Inglaterra.

3.1.2.2.2 Puentes levadizos

Son aquellos cuyo movimiento vertical es gracias a una instalación mecánica consistente en un eje horizontal que simula una bisagra.



Figura 14. Puente Erasmus en Rotterdam, Holanda.

3.1.2.2.3 Puentes giratorios

Son un tipo de puente móvil en el que uno o los dos extremos, o bien, un extremo central rota sobre su eje central para permitir el tráfico marítimo a ambos lados.



Figura 15. Puente de la mujer en Buenos Aires, Argentina

3.1.2.2.4 De desplazamiento vertical

Consisten en tableros simplemente apoyados, cuyos apoyos tienen la capacidad de desplazarse en forma vertical, de manera que elevan todos los tableros o sólo uno para permitir el paso de los navíos. Su funcionamiento se basa en tirar de las

esquinas de los tableros con ayuda de unas torres que contienen la maquinaria de elevación así como los contrapesos que equilibren todo durante la maniobra.

Este tipo de puente es muy económico y eficiente en puentes largos.



Figura 16. Puente Jacques Chaban-Delmas en Burdeos, Francia

3.1.2.2.5 Puente transbordador

Este tipo consiste en una viga fija que se coloca a la altura deseada y de ella se cuelga, mediante cables, el tablero móvil que transporta a los peatones de un extremo al otro. Con ellos se pueden cubrir claros semejantes a los de los puentes colgantes y son más económicos, cubriendo así la necesidad de comunicar dos márgenes de grandes claros y con un gálibo suficientemente grande para permitir el paso de los barcos sin ningún problema. Este tipo de puentes siempre es relacionado con el ingeniero francés Ferdinand Arnodin, experto en la fabricación de cables así como en la construcción y reparación de puentes colgantes. En la figura 10 se muestra el puente de la Vizcaya, capaz de transbordar vehículos y peatones de un lado a otro del río Nervión en España.



Figura 17. Puente de Vizcaya en España.

3.1.2.2.6 Puentes deslizantes

Este tipo de puentes móviles, también llamados retractables o de desplazamiento horizontal, constan de una calzada que se mueve en sentido horizontal para dar paso a los barcos. Es muy común encontrarlos en Noruega y Suecia. En la figura 11 se puede observar que la calzada del puente Ultunabron está colocada sobre ruedas para poder ser trasladada en el momento requerido.



Figura 18. Puente Ultunabron en Uppsala, Suecia

3.1.2.2.7 Puentes flotantes

Son puentes que constan básicamente de un tablero con apoyos consistentes en una serie de flotadores cuya función es mantener el tablero en una posición más o menos fija. La serie de flotadores puede estar formada por diversos elementos como buques o barcas, entre otros. Este tipo de puentes son muy funcionales en ríos donde es muy difícil cimentar debido a su profundidad.



Figura 19. Puente Jian Chunmen en China.

3.1.3 Según el funcionamiento mecánico

3.1.3.1 Rectos o de vigas

Este tipo de puentes tienen una estructura de viga o losa continua. En su construcción se emplean vigas de diversas formas que son apoyadas en los extremos sobre estribos o sobre pilares. El funcionamiento consiste en que los elementos horizontales tienden a flexionarse debido a las cargas soportadas mientras que los elementos de apoyo sólo reciben fuerza de compresión transmitida por las vigas. La flexión involucra esfuerzos de compresión en la parte superior de las vigas y de tensión en la parte inferior.

Son muy utilizados para salvar claros cortos e intermedios, por lo que son los más comunes entre los puentes peatonales. Si son de concreto reforzado o de acero pueden abarcar distancias de entre 20 y 25 m. En caso de distancias superiores se pueden construir de concreto presforzado o de vigas compuestas.

Si se utilizan vigas de acero, las secciones más usadas son las tipo I y las de cajón. Si son de concreto la variedad es mayor pues aparte de las I y las de cajón, hay otras secciones prefabricadas que se pueden utilizar, como las tipo AASHTO y otra diversidad de secciones en cajón.

Las losas se fabrican normalmente “in situ” y pueden ser losas macizas, aligeradas o hechas con losacero.



Figura 20. Puente de la amistad en Boca del Río, Veracruz

3.1.3.2 *De arco*

Los puentes de arco están formados por unos apoyos en los extremos del claro y entre los cuales se coloca una estructura en forma de arco que es la encargada de transferir las cargas. Su funcionamiento consiste en que mediante la fuerza de compresión del arco se transmitan las cargas (vivas y muertas) y las sobrecargas hacia los apoyos, donde ésta se convierte en una carga vertical y un empuje horizontal, de manera que el suelo debe ser capaz de resistir los empujes.

Si los claros son muy grandes se puede hacer uso de varios arcos pero las distancias recomendadas para hacer uso de este tipo de puente van de 60 a 200 m por economía.



Figura 21. Puente Salford Quays en Manchester, Inglaterra

Dependiendo de la posición del tablero respecto al arco puede haber los siguientes tipos de puentes en arco.

3.1.3.2.1 Arco con tablero superior



Figura 22. Puente Leonardo de Oslo en Oslo, Noruega.

3.1.3.2.2 Arco con tablero intermedio



Figura 23. Puente en Heredia, Costa Rica

3.1.3.2.3 Arco con tablero inferior



Figura 24. Puente Peatonal Federal en Puente Grande, Jalisco

3.1.3.3 Colgantes

Son aquellos que están sostenidos por un arco invertido el cual está formado por un torón, del cual se suspende la losa mediante tirantes verticales, igual que el puente de arco, gracias a su forma es que resiste las cargas y puede abarcar largos claros mediante un mecanismo que hace funcionar a los torones y tirantes únicamente a tensión y a los pilares a compresión, evitando de esta manera las flexiones. La longitud óptima para utilizar estos puentes comienza en 350 m.

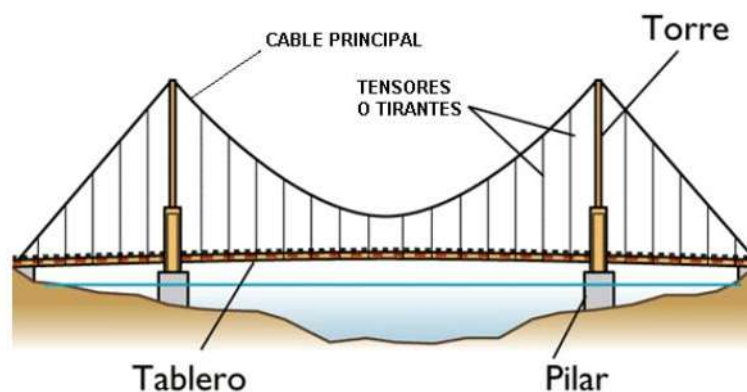


Figura 25. Elementos de un puente colgante

El torón o cable principal no tiene rigidez por lo que no soporta flexiones, de manera que ante cualquier fuerza que se le aplique éste se deformará para sólo presentar esfuerzos de tensión, de esta manera su forma es una curva parabólica abierta hacia arriba. Los cables principales deben anclarse en los extremos del puente para poder transferir las cargas de la estructura, lo cual hacen en las torres que se colocan en los extremos. El tablero está suspendido de los tirantes verticales que, a su vez, penden conectados de los torones.

Con este tipo de puente se pueden librar claros bastante grandes además de que se puede permitir el paso de navíos por su gran altura, no es necesario tener apoyos centrales en su construcción y ante la acción de cargas accidentales es capaz de flexionarse para sobrellevarlas. Sin embargo, ante cargas de ese tipo muy grandes puede también volverse inadecuado de usar, además de que genera grandes reacciones en el terreno por lo que se requiere que éste sea de buena calidad y en caso de no serlo, su mejoramiento representaría un muy alto costo.



Figura 26. Puente sobre el río Santo Domingo en Barinas, Venezuela

3.1.3.4 Atirantados

En este tipo de puentes el tablero está suspendido de tirantes, que son los elementos fundamentales y que consisten en cables rectos cuya función es ser apoyos intermedios más o menos rígidos. Para ello, éstos se fijan a unas torres de donde se anclan para lograr las fuerzas verticales que sostienen al tablero. También el tablero tiene una función importante pues proporcionan las fuerzas horizontales que equilibran el sistema, ya que los tirantes, al estar inclinados, tienen unas componentes horizontales en sus fuerzas. Al observar todo esto queda claro que todos los elementos juegan un papel necesario en la estructura resistente básica de los puentes atirantados.

Este tipo de puentes puede tener dos torres y ser simétricos o tener una sola que atirante todo el claro; puede que tenga muchos tirantes juntos o pocos y muy separados; la forma de sus torres puede ser en A, en A cerrada por la parte inferior (también llamada diamante), en H, en Y invertida; puede que tenga dos pilas o una sola; puede que las torres inicien desde los cimientos o que inicien a partir del tablero; puede tener dos planos de atirantamiento a lo largo de los bordes del tablero o bien, uno solo a lo largo del eje transversal; puede tener la disposición de

los tirantes paralelos, también llamada disposición en arpa, o los puede tener radiales (disposición abanico).



Figura 27. Puente Los Libertadores de una sola torre con tirantes en dos planos y en disposición radial, en Lima, Perú



Figura 28. Puente Milenio, de dos torres con tirantes en un plano, dispuestos en arpa, en Galicia, España.

3.1.3.5 *En voladizo*

También conocidos como puentes en cantiléver o en ménsula. Su nombre se debe a las vigas principales en voladizo que se proyectan desde las pilas hacia el centro o que también pueden proyectarse hacia las orillas para sostener los extremos de dos tramos suspendidos. Tienen especial aplicación en claros muy largos. Pueden aplicarse con facilidad a puentes de armadura de acero y tablero superior y se puede combinar con otros tipos de puentes.

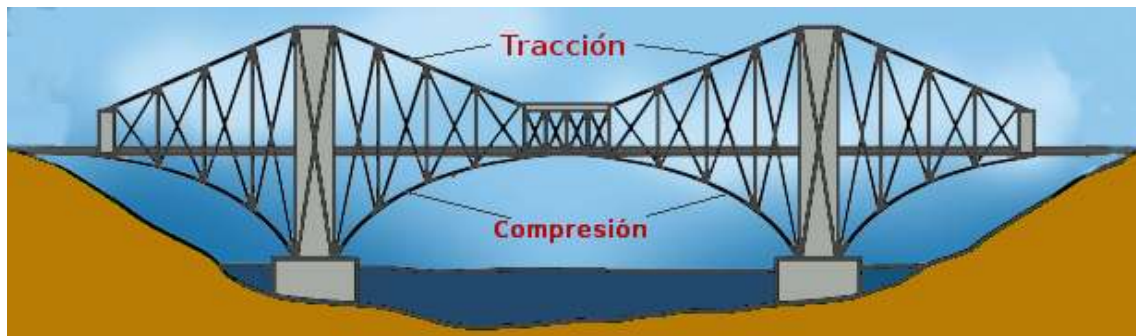


Figura 29. Funcionamiento de los puentes en cantiléver.

El sistema consiste en una serie de vigas que trabajan en ménsula, es decir, están empotradas en uno de sus extremos y libres en el otro. El número de ellas dependerá de la longitud del claro. (TiposDe.Org)

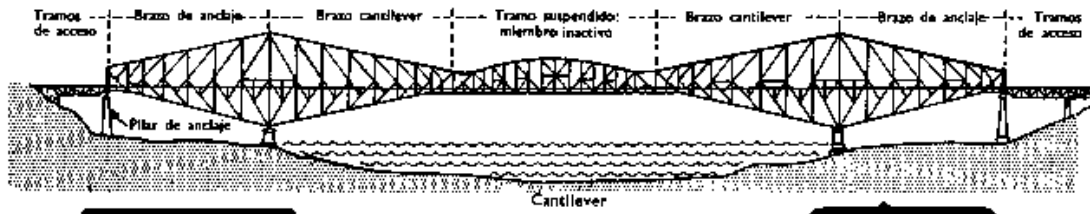


Figura 30. Partes de un puente en cantiléver



Figura 31. Puente Quebec en Canadá.

De acuerdo a las clasificaciones descritas anteriormente, podemos identificar los puentes en estudio como puentes fijos, tipo viga, de acero y concreto.

4 IMPORTANCIA DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS PUENTES

Las características dinámicas más importantes de una estructura son los periodos naturales de vibración y el amortiguamiento. El periodo natural es siempre importante e influye en todos los casos de cargas dinámicas, mientras que el amortiguamiento en algunos casos puede no ser importante y en otros casos no. La respuesta dinámica depende además de otras propiedades como la capacidad de disipar energía por deformación plástica y las variaciones de las propiedades de los materiales causadas por la velocidad con que se aplica la carga. Éstos y otros factores pueden ser importantes en algunos problemas, pero los más relevantes en todos los casos, son en definitiva el periodo natural y el amortiguamiento del sistema.

Las propiedades dinámicas de las estructuras son: la frecuencia circular de vibración, la frecuencia natural de vibración, el período natural de vibración, el amortiguamiento y las formas modales o modos de vibrar.

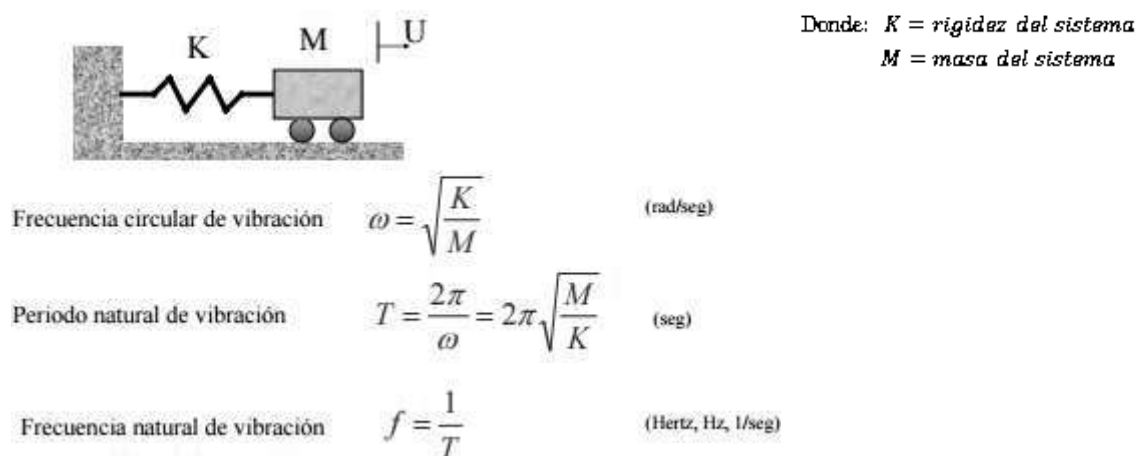


Figura 32. Propiedades dinámicas de un sistema.

La ingeniería estructural, en su continuo desarrollo, ha implementado técnicas experimentales que buscan una adecuada comprensión de lo que ocurre con las estructuras en la etapa posterior a la construcción y que permiten la identificación de las propiedades dinámicas reales de las mismas durante su vida útil. La instrumentación de edificaciones surge como una posibilidad de tener acceso a ese

tipo de información que permite evaluar el diseño de la edificación una vez construida o comprender e identificar posibles daños después de la ocurrencia de un evento sísmico, he aquí la importancia de la identificación de las propiedades dinámicas de las estructuras.

El interés en el análisis de cargas dinámicas ha ido creciendo constantemente en los últimos tiempos, en parte debido a que el avance en la tecnología ha hecho posibles diseños más apropiados, y que las herramientas computacionales actuales permiten hacer, relativamente rápido, cálculos que en otra época eran cuestiones reservadas para casos muy especiales o importantes y que sólo las podía realizar los especialistas. Además, actualmente se proyectan estructuras más grandes, livianas, etc., que son más susceptibles a los efectos dinámicos porque son más flexibles y tienen periodos naturales altos, es decir que son más sensibles a variaciones de las cargas en el tiempo. Las relaciones entre los desplazamientos y los esfuerzos de una estructura son las mismas ya consideradas en el análisis estático, independientemente que la carga sea de tipo estática o dinámica. Para el análisis dinámico es necesario introducir dos tipos de fuerzas que no ocurren en el caso estático:

- i) Las fuerzas de inercia asociadas la propiedad de inercia de la masa de la estructura y de las componentes o partes no estructurales, y
- ii) Las fuerzas de disipación de energía por diversos tipos de mecanismos de fricción (fricción seca, fricción viscosa, fricción seca en uniones estructurales). El análisis dinámico apunta a determinar en primer término los desplazamientos de la estructura en función del tiempo, y a partir de ellos determinar los esfuerzos en la forma habitual (barra por barra) propia del método de rigidez tal como se lo ha visto para cargas estáticas.

Es un hecho de la vida que todo a nuestro alrededor vibra y el análisis modal es la técnica usada para caracterizar el comportamiento dinámico de las estructuras.

El análisis modal hace una separación del complicado patrón de vibración medido en el dominio físico usando acelerómetros, de los que se hacía mención en el capítulo 2, para establecer por separado un cierto número de modos de vibrar bien definidos, los cuales son en realidad en conjunto, el movimiento real de las estructuras. Un modo de vibrar está caracterizado por los siguientes parámetros modales:

- Frecuencia natural (f). Es un valor especificado típicamente en Hertz (Hz), que está relacionado numéricamente con la frecuencia circular (rad/s) y con el período de la estructura (s), teniendo uno de ellos se pueden obtener los demás a partir de él.
- La relación de amortiguamiento (ξ). Este valor se representa normalmente con un porcentaje del amortiguamiento crítico de la estructura.
- La forma modal (Φ). Es la forma geométrica en que la estructura se mueve en cierto modo de vibrar.

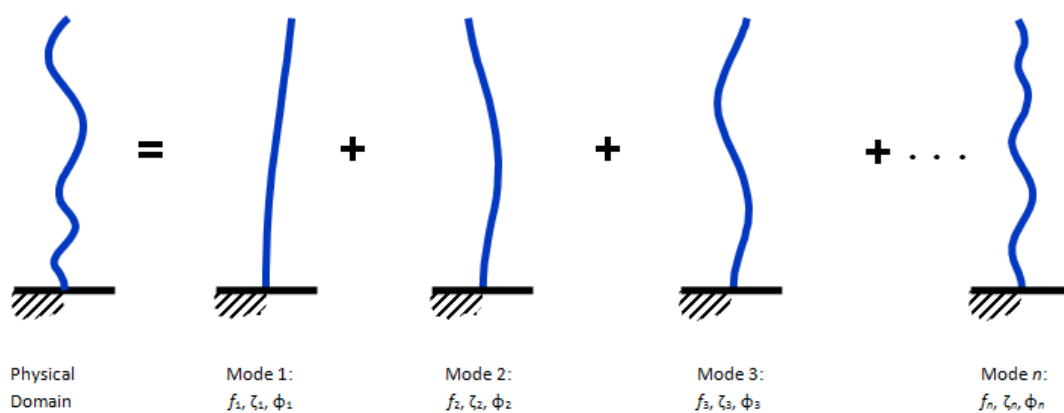


Figura 33. Modos de vibrar de una estructura (ARTEMIS)

Como se observa en la figura anterior, una estructura tiene muchos modos de vibrar. Mientras los modos vayan creciendo cada vez más en frecuencia, tenderán a tener formas modales cada vez complicadas.

En la actualidad la identificación dinámica estructural con vibraciones ambientales es una herramienta de la ingeniería utilizada para describir el comportamiento vibratorio de una estructura, las primeras variables que se proporcionan son las frecuencias naturales, formas de vibración y porcentajes de amortiguamiento. La identificación de estas variables tiene importantes aplicaciones como: la detección de daños estructurales, la actualización de modelos analíticos, la modificación y rehabilitación estructural y el control de vibraciones, entre otras, todo lo cual será lo que se considerará en este trabajo.

La estimación del período natural de vibración de una estructura es esencial pues a partir de esta propiedad se logran apreciar las demandas a las que se somete una estructura ante la acción de las fuerzas dinámicas. Como se observa en la fórmula de la figura 32, esta característica es función de la rigidez y de la masa del sistema.



Estructura Rígida
Periodo Corto
Frecuencia Alta



Estructura Flexible
Periodo Largo
Frecuencia Baja

Figura 34. Relación entre las propiedades dinámicas.

En la figura 34 podemos encontrar la forma en que se relacionan las propiedades dinámicas de las estructuras, que tienen concordancia con lo que establecen las fórmulas matemáticas de la figura 32.

Como ya se dijo anteriormente, el amortiguamiento es otro parámetro que se obtiene de estos análisis y éste es de gran importancia pues con base en sus valores podemos conocer la capacidad de la estructura de disipar energía. A mayor amortiguamiento, mayor capacidad de disipar energía y viceversa. En la siguiente figura se muestran valores típicos de este parámetro.

| Nivel de esfuerzo | Tipo y condiciones de la estructura | Porcentaje de amortiguamiento crítico |
|---|--|---------------------------------------|
| Esfuerzo de trabajo, no mayor de la mitad del punto de fluencia, aproximadamente. | Tuberías vitales | 1 a 2 |
| | Acero soldado, concreto pretensado, concreto armado levemente fisurado | 2 a 3 |
| | Concreto armado altamente agrietado | 3 a 5 |
| | Acero remachado o empernado, estructuras de madera clavadas o empernadas | 5 a 7 |
| Justamente debajo o en el punto de fluencia. | Tubería de servicio público | 2 a 3 |
| | Acero soldado, concreto pretensado con pérdida parcial del pretensado | 5 a 7 |
| | Concreto pretensado con pérdida completa del pretensado | 7 a 10 |
| | Concreto armado | 7 a 10 |
| | Acero remachado y empernado, estructuras de madera empernadas | 10 a 15 |
| | Estructuras de madera clavadas | 15 a 20 |

Figura 35. Valores usuales de amortiguamiento en estructuras.

5 MODELOS ANALÍTICOS Y MEDICIÓN DE LOS Puentes

Los puentes modelados y medidos se ubican en la Avenida Solidaridad de la ciudad de Morelia, uno frente a la calle Jacona y el otro en la calle Ocampo, ambos puentes son tipo viga y salvan claros de entre 15 y 17 m. Al principio de este trabajo se

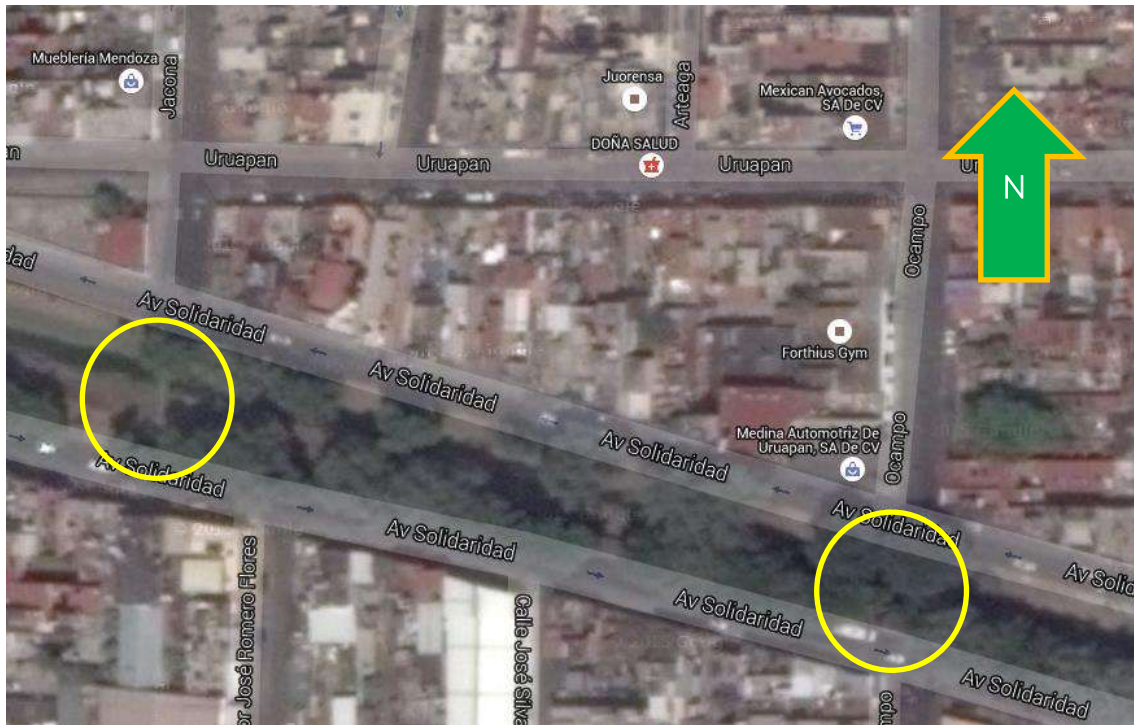


Figura 36. Localización de los puentes en estudio. (<https://maps.google.com.mx/>)

Los puentes fueron modelados en el programa de análisis estructural SAP 2000, en base a unos modelos previos trazados en el programa AutoCAD.

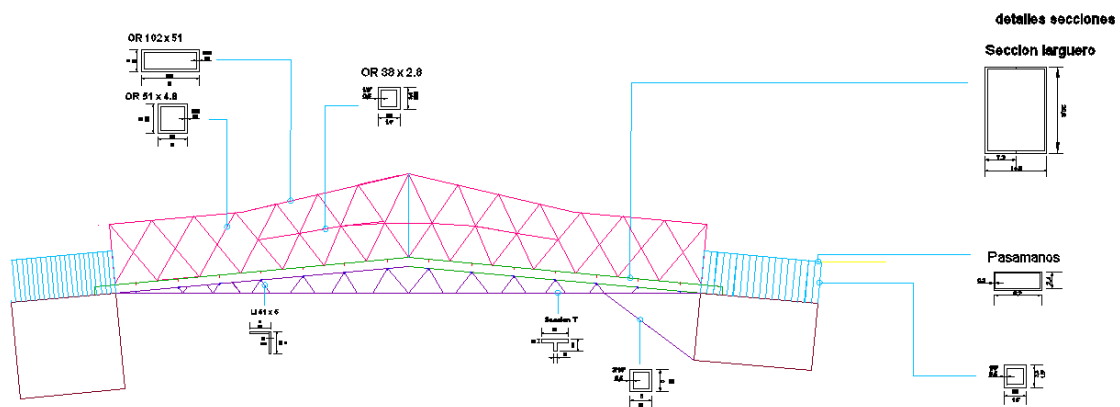


Figura 37. Modelo en AutoCAD del puente de la calle Jacona.

Por su parte para las pruebas de vibración ambiental se instalaron los equipos en el modelo y se tomaron registros de treinta minutos de duración, con una frecuencia de muestreo de 200 Hz. La finalidad de la duración de estos registros es reducir al máximo los errores estadísticos adscritos a los estimativos que utiliza la metodología de análisis

5.1 Modelo analítico de la estructura

Para realizar el estudio analítico se utilizó el programa de análisis no lineal SAP2000. Se elaboró un modelo elástico tridimensional con elementos finitos isoparamétricos de cuatro nodos para definir las vigas y la losa; para las pilas y las rampas de las escaleras se utilizan elementos barra.

Una vez realizado el análisis dinámico se obtuvo que los modos uno y dos son de flexión con periodos de 0.46 y 0.44s, respectivamente; los modos tres y cuatro son de flexión acoplados con traslación longitudinal con periodos de 0.26 y 0.16s, respectivamente y el quinto modo resulta de traslación transversal con un periodo de 0.15 s. En la figura 3 se muestran los 5 primeros modos de vibrar del puente.

5.2 MEDICION CON VIBRACIÓN AMBIENTAL

El uso de grandes luces en puentes peatonales implica que los modos de vibración estén asociados generalmente a frecuencias bajas, entre 1 Hz y 8 Hz. El andar de las personas está clasificado según el tipo de actividad y la frecuencia de paso. Para el caminar, la frecuencia de paso está entre 1.7 Hz y 2.3 Hz y para trote, entre 2.5 Hz y 3.2 Hz para el 90% de la población. Lo anterior pone en evidencia el riesgo potencial de estas estructuras a la inducción del fenómeno conocido como resonancia. La resonancia ocurre cuando la frecuencia natural del puente coincide con la frecuencia de excitación, en este caso la frecuencia de paso de las personas, o uno de sus armónicos

Para considerar el servicio de la estructura ante vibraciones, se requiere de la caracterización de la fuente de vibración, la respuesta y el receptor de la misma. El ser humano generalmente es la mayor fuente de vibraciones para puentes peatonales. La respuesta estructural está relacionada con la masa, el amortiguamiento y la rigidez del puente, ya que el comportamiento de la estructura en resonancia es el que gobierna los criterios de servicio. El receptor de las vibraciones es finalmente el usuario, es decir el peatón [1]. Las vibraciones en puentes peatonales pueden ocurrir en dirección vertical, horizontal y en algunos casos torsional [4]. En este artículo se consideran vibraciones horizontales y verticales en los puentes estudiados pero, debido a la configuración geométrica de los sistemas estructurales usados habitualmente en el ámbito local, se hace énfasis en las vibraciones verticales. Además, con el estudio de las cargas antrópicas se pretende caracterizar la interacción humano-estructura en los diferentes tipos de puentes peatonales en la ciudad de Cali de acuerdo a sus sistemas constructivos.

2. CARGAS DINÁMICAS PRODUCIDAS POR LOS PEATONES

Cada vez son más frecuentes los problemas de vibraciones causados por personas en puentes peatonales reportados en la literatura. La implementación de materiales con mejores características mecánicas ha permitido el diseño de estructuras cada vez más ligeras y por lo tanto más sensibles a cargas dinámicas [1, 2, 7]. Uno de los primeros casos de problemas de vibraciones inducidas por personas sucedió en 1831 en Inglaterra cuando 60 soldados marchaban sobre un puente. Este fue el evento que provocó que un considerable número de puentes tuvieran la advertencia de que las tropas deben romper la marcha cuando crucen sobre estos [1]. Aunque ha habido muchos reportes de puentes con problemas de vibraciones en el pasado, se empezó a prestar gran atención a este tema después del 10 de Junio del año 2000, tras la

apertura del Puente Millenium en Londres, el cual presentó vibraciones horizontales excesivas producidas por los peatones el día de su inauguración. Las cargas dinámicas producidas por las personas pueden ser clasificadas en dos categorías generales, in situ y móviles. 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. Las cargas dinámicas producidas por personas modifican las propiedades dinámicas del sistema, cambiando la frecuencia natural y el amortiguamiento asociados a cada modo. Este último efecto ha sido ampliamente estudiado para personas en estado estático, pero aún falta mucha investigación para el caso de personas en movimiento. La carga producida por una persona al caminar tiene componentes en tres direcciones: una componente vertical, que es la de mayor magnitud, una componente horizontal y una componente longitudinal. Estas tres componentes dependen de parámetros como la frecuencia, velocidad y longitud del paso.

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 88 Sánchez et al modelos son basados en factores de multiplicación, otros en simulaciones Monte Carlo y otros más en modelos en el dominio de frecuencias [13]. En 1978, Matsumoto aproximó la respuesta dinámica producida por un grupo de personas multiplicando los efectos producidos por un peatón por un coeficiente [1]. Él asumió que el flujo de peatones sobre un puente seguía una distribución de Poisson, lo que significa que la fase entre los pasos de los peatones seguía una distribución totalmente aleatoria. De acuerdo a esto Matsumoto definió el factor mostrado en la ecuación (1). $m = \lambda T_0$. (1) En esta ecuación, λ es el número de personas que pasan el puente en un segundo, T_0 es el tiempo en segundos que tarda una persona en cruzar el puente y λT_0 es el número de personas en cualquier instante sobre el puente. La simulación Monte Carlo es un método más realista, que considera distribuciones de probabilidad de las diferentes variables que intervienen en la respuesta dinámica del puente. El procedimiento consiste en simular el paso de un flujo de peatones de acuerdo, generalmente, a una distribución de Poisson, mientras que parámetros como la frecuencia de paso, peso y velocidad de las personas y amplitud de la fuerza son generados de acuerdo a la distribución probabilista apropiada para cada variable [13, 14]. 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 [12, 13, 15].

2.2. 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 [16]. Diversos autores afirman 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 [1], 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 [16]. 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 [5].

2.3. Criterios de servicio en puentes peatonales Los códigos y guías de diseño actuales que tienen en cuenta los efectos dinámicos de las cargas vivas poseen diferentes criterios para establecer los valores límites de aceleraciones en edificaciones ocupadas por el público. Estos valores generalmente son subjetivos [2] y dependen tanto del uso como de la frecuencia natural de la estructura [17]. Así, para estructuras en lugares cerrados donde son más perceptibles las vibraciones, se establecen aceleraciones máximas o aceleraciones RMS menores que para estructuras en exteriores. Para puentes peatonales, la Tabla 1 muestra los criterios que establecen algunos de estos códigos y guías de diseño incluyendo la NSR-10 [3], tanto para vibraciones verticales como horizontales [4, 8 17,18].

Equipo utilizado para la medición

Se utilizó una consola K2 marca Kinematics de 12 canales, nueve sensores de balance uniaxial y un sensor triaxial de la misma marca, montados en placas de aluminio de 2.54 x 35 x 35 centímetros.

Características de las mediciones realizadas y procesamiento de la información

Puente calle Jacona

Se efectuaron 4 mediciones de diez minutos cada una, colocando el sensor triaxial en el extremo sur del puente (canales 1, 2 y 3) y sensores uniaxiales en tres direcciones a un cuarto, un medio y tres cuartos del claro como se indica en las figuras. Se observa que los canales 1, y 4 corresponden a la dirección longitudinal; los canales 2, y 5 a la dirección transversal y los canales 3 y 6 a la dirección vertical.

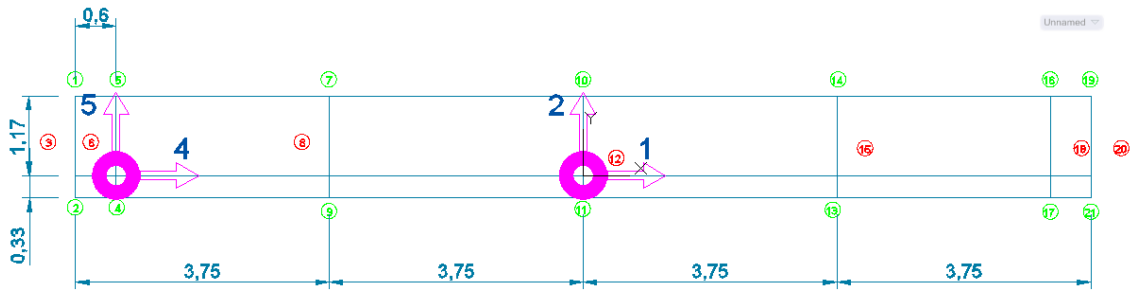


Figura 38. Primera posición de los sensores. Puente Jacona.

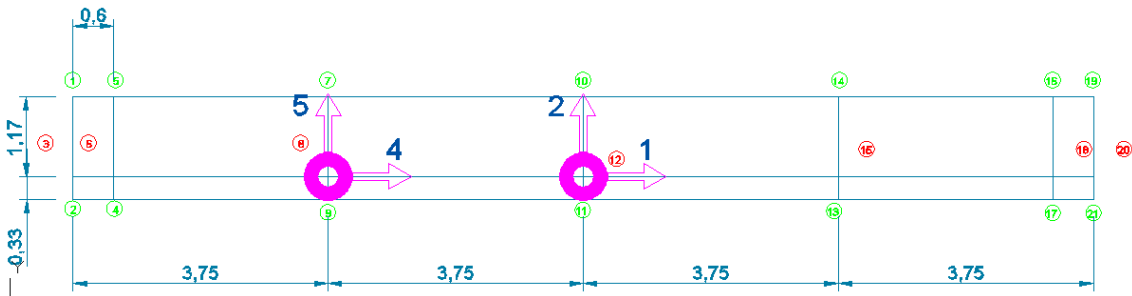


Figura 39. Segunda posición de los sensores. Puente Jacona.

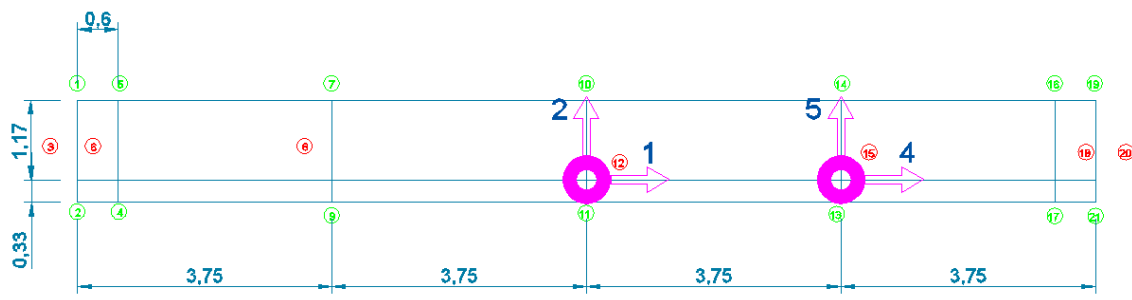


Figura 40. Tercera posición de los sensores. Puente Jacona.

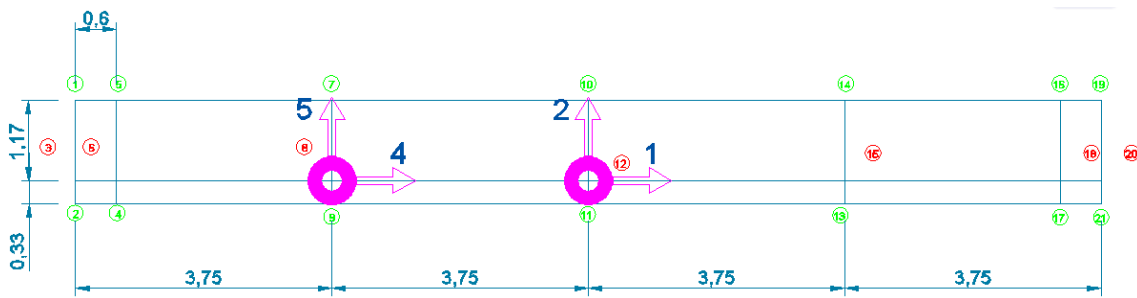


Figura 41. Cuarta posición de los sensores. Puente Jacona.

Puente calle Jacona

Se efectuaron 2 mediciones de diez minutos cada una, colocando el sensor triaxial en el extremo sur del puente (canales 1, 2 y 3) y sensores uniaxiales en tres direcciones a un cuarto, un medio y tres cuartos del claro como se indica en la figuras. Se observa que los canales 1, 7 y 10 corresponden a la dirección longitudinal; los canales 2, 8 y 11 a la dirección transversal y los canales 3, 9 y 12 a la dirección vertical.

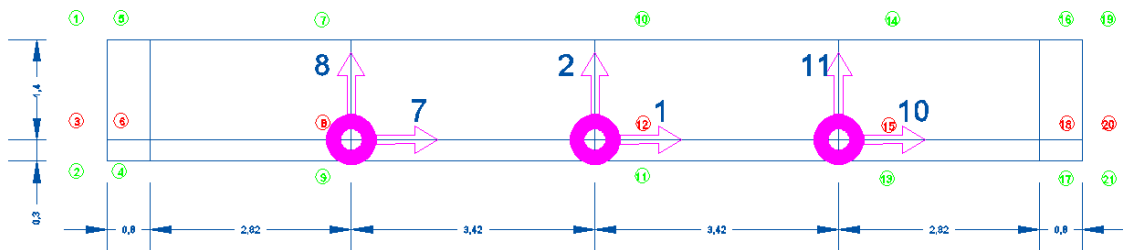


Figura 42. Primera posición de los sensores. Puente Ocampo.

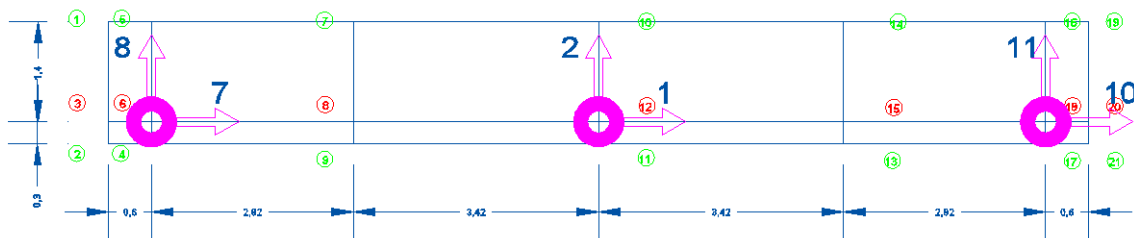


Figura 43. Segunda posición de los sensores. Puente Ocampo.

Para el caso de la norma que define 92 Sánchez et al las aceleraciones en RMS, se convirtieron a valores pico equivalentes multiplicando por la raíz cuadrada de dos. En cada caso los registros de vibración ambiental en sentido vertical y horizontal

fueron adquiridos mientras la estructura estaba en servicio. En consecuencia, las aceleraciones máximas mostradas en las figuras corresponden a los valores pico que se presentaron en la estructura debidas al paso de las personas de manera aleatoria durante los registros. Dado que los registros de vibración ambiental se tomaron con el flujo normal de peatones sobre la estructura durante un periodo de 10 minutos, las aceleraciones que se presentan en el puente dependen de esta condición.

Los ensayos con personas caminando y trotando fueron realizados con el flujo controlado de una y tres personas circulando de forma sincrónica por el puente. La frecuencia de paso fue coordinada con un metrónomo y fue variada desde 1.5 Hz hasta 2.5 Hz para el caso de personas caminando y para personas trotando desde 2.25 Hz hasta 3.75 Hz. De esta manera fue posible identificar el efecto de la relación entre la frecuencia de paso del peatón y la frecuencia natural del puente en la respuesta del sistema humano-estructura. Además, permitió identificar la influencia del segundo armónico de carga al caminar o trotar con una frecuencia de paso igual a la mitad de la frecuencia natural. Diversos códigos y guías internacionales proponen que la aceleración máxima generada por un peatón caminando en perfecta sincronía con la frecuencia natural del sistema (condición de resonancia) sea el criterio para evaluar el servicio de puentes peatonales ante vibraciones. La aceleración máxima obtenida en 12 puentes peatonales, clasificados según su tipología, se muestra en la Figura 14 para el caso de un peatón caminando.

Las aceleraciones máximas producidas por tres personas caminando y trotando de manera sincronizada son mostradas en la Figura 15 junto con los límites planteados por algunas normas. Se puede observar que los puentes tipo 1, 2, 5 y 6 son los que presentan mayor sensibilidad a cargas dinámicas producidas por personas, ya que presentaron mayores aceleraciones durante las pruebas. Aunque los ensayos de personas caminando y trotando fueron coordinados mediante un metrónomo, se debe resaltar que hay diferencias en la percepción y coordinación de cada persona y, por lo tanto, los picos alcanzados están ligados al grado de sincronización que lograron en cada ensayo.

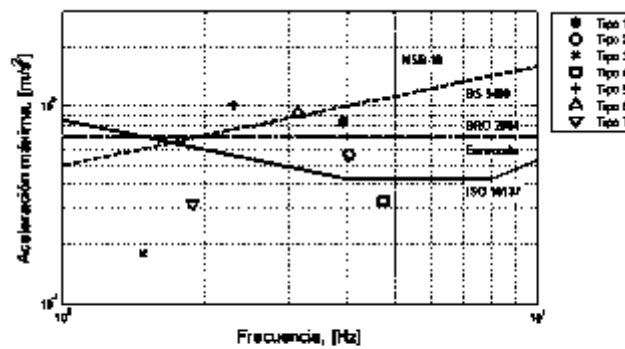


Figura 15. Evaluación de servicio para vibraciones verticales para tres personas caminando.

Excitación tipo vandálica

En este caso los ensayos se realizaron mediante saltos coordinados de tres personas para generar altos factores de impacto. Las recomendaciones de diseño son escasas para este tipo de cargas y, por tanto, se requiere de mayor investigación para evaluar con precisión el cambio en las propiedades dinámicas. La Figura 16 muestra los valores de aceleraciones máximas alcanzadas para cargas vandálicas. Se puede observar que 6 de las 7 tipologías presentan valores de aceleración mayores a los niveles especificados en las normas internacionales. No obstante, este es un tipo de carga bastante específico e improbable y no indica que estas estructuras necesariamente incumplan criterios de servicio.

Las aceleraciones máximas para este tipo de excitación son las más altas debido a que eran cargas dinámicas de mayor factor de impacto actuando en el punto de mayor deflexión modal, a diferencia de los otros tipos de excitación donde la carga era móvil. Cabe precisar que en algunas pruebas la sintonía entre la frecuencia de salto y la frecuencia natural de la estructura no era perfecta, mientras que en otros puentes la amplitud de las vibraciones fue tan alta que la excitación debió ser detenida para conservar la integridad estructural.

5. CONCLUSIONES Al comparar puentes peatonales de luces similares se observa una tendencia en los construidos con acero a tener frecuencias naturales verticales mayores que los de concreto. Se encontró además, que los puentes de concreto con luces entre 28 m y 48 m tienen mayor probabilidad de problemas de vibraciones para el primer armónico de carga. Así mismo, para los puentes en acero estos problemas serían más probables para luces entre 33 m y 40 m para el primer armónico. Aunque la respuesta de un puente peatonal ante la carga producida por el paso de un peatón en resonancia da una buena idea de la sensibilidad de estas estructuras ante las cargas producidas por

personas, estas cargas están determinadas por el flujo de los peatones. Es, por lo tanto, más apropiado tener en cuenta el efecto producido por grupos de personas para el diseño de estas estructuras. Por ejemplo, en [19] se propone la modelación de estas cargas usando distribuciones de probabilidad adecuadas para variables como la longitud y frecuencia de paso, factores dinámicos de carga, peso de la persona y densidad de personas por unidad de área y, además, se exponen los parámetros necesarios para estimar la respuesta dinámica ante grupos de personas. Si bien la excitación deliberada de puentes peatonales es poco común, es recomendable tener en cuenta sus efectos en el diseño de puentes peatonales cercanos a sitios de gran concentración de personas como estadios y coliseos. Una opción que debe ser considerado para estos casos es la generación de amortiguamiento adicional por medio de dispositivos de control. Al realizar las mediciones de vibraciones debido a cargas antrópicas en puentes peatonales en Cali, fue una constante la queja de los usuarios por la percepción de incomodidad e inseguridad. Sin embargo, todos los puentes ensayados cumplen con los criterios internacionales de aceleraciones verticales para el caminar de una persona. Esto sugiere que los límites especificados en las normas internacionales son insuficientes si se desea tener en cuenta la percepción de comodidad y seguridad de los peatones.

Los diferentes códigos y guías de diseño de estructuras susceptibles a vibraciones establecen criterios de servicio ligados a aceleraciones máximas o a límites en la frecuencia natural. Sin embargo, los resultados de aceleraciones máximas en los puentes peatonales sugieren que valores de aceleración no son suficientes como criterio de servicio ante cargas antrópicas. De los 19 puentes peatonales evaluados, 16 de ellos poseen por lo menos una luz con frecuencia natural vertical por debajo de 5 Hz. Esto contradice lo que explícitamente dice la NSR-10 en B.4.7, al especificar que las frecuencias naturales verticales sean mayores o iguales a 5 Hz. Sin embargo, ninguno de estos puentes superó los límites de aceleraciones máximas establecidos por las normas ISO 10137, Bro 2004, BS 5400 o Eurocode para el caso de una persona caminando. En consecuencia, se recomienda que futuras normas colombianas tengan en cuenta el efecto dinámico de las cargas vivas estableciendo valores límites de aceleraciones y frecuencias naturales en función del desempeño según niveles de comodidad y seguridad percibida por los peatones.

6 EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD DE LOS PUENTES

Se determinaron inicialmente las propiedades dinámicas del puente con base en mediciones de vibración ambiental y en un modelo analítico. Ambos resultados concuerdan satisfactoriamente, por lo que el modelo analítico fue utilizado posteriormente para determinar la respuesta sísmica esperada en condiciones de servicio.

Los resultados muestran también la factibilidad del uso de mediciones de vibración ambiental como una herramienta muy útil para determinar las propiedades dinámicas de una estructura, con base en la obtención de los espectros de amplitudes de Fourier.

En general, la observación de los espectros resultantes de las diferentes pruebas de vibración, identifican tres frecuencias características: una de 4.43 Hz, que es común en todas las pruebas (ambiental, forzada y sismo), en las cuatro caras del edificio; otra de 6.79 Hz en las caras norte y sur que sólo se observa en las pruebas de vibración ambiental (Figura 20a y 21a), y otra de 8Hz, en las caras norte y sur que se observa tanto en las pruebas de vibración ambiental como forzada (Figura 20a,b y 21a,b). El hecho de que el pico espectral de 6.79 Hz en las pruebas de vibración ambiental se observa únicamente en las caras norte y sur indica la posibilidad de una forma modal del edificio en la dirección Este-Oeste. En contraste, en el espectro de vibración forzada no se observa un pico espectral pronunciado en 6.79 Hz, posiblemente porque las vibraciones forzadas se generaron con una mesa vibratoria localizada al Sur del edificio-prueba, lo que explicaría que estas vibraciones no activaran un modo en la dirección Este-Oeste. Tampoco observamos este pico espectral en el registro del sismo. En cuanto al pico espectral en la frecuencia de 8Hz, aunque de muy poca amplitud, indica la posibilidad de una forma modal en la dirección Este-Oeste. Un espectro de vibración forzada consume más tiempo y recursos que un espectro de vibración ambiental. Sin embargo, el experimento cumplió ampliamente su objetivo porque demuestra que los registros de vibración ambiental son suficientes para identificar las frecuencias características de un edificio.

Para identificar con mayor facilidad las formas modales correspondientes a las frecuencias características de 4.43 Hz, 6.79 Hz y 8Hz, se calcularon los espectros de respuesta de las pruebas de vibración ambiental y vibración forzada. Los espectros de respuesta para la frecuencia de 4.43 Hz, obtenidos con vibración ambiental

(Figura 24), y vibración forzada (Figura 25), son prácticamente iguales. Ambas figuras muestran cualitativamente dos formas modales: un modo dominante traslacional en la dirección Norte-Sur y un modo torsional. En la frecuencia de 6.79 Hz, ambos espectros, el de vibración ambiental (Figura 26), y el de vibración forzada (Figura 27), corroboran al modo traslacional dominante en la dirección Este-Oeste que se mencionó en la sección 3.1, lo que evidencia la utilidad de los espectros de respuesta para identificar formas modales. En la frecuencia de 8 Hz se corrobora la existencia un modo traslacional en la dirección Este-Oeste, tanto en la prueba de vibración ambiental (Figura 28) como en la prueba de vibración forzada (Figura 29). Cabe destacar que la alta coherencia (> 0.9) en los espectros de respuesta de vibración forzada y de vibración ambiental, correspondientes a las frecuencias características de 4.43 Hz, 6.79 Hz y 8Hz, indica la persistencia en las formas modales del edificio. Note que la coherencia es comparativamente baja en el nivel cero en todas las caras del edificio. Esto se debe a la naturaleza aleatoria de la vibración ambiental que fuerza al edificio en su base. Mientras que la alta coherencia (0.99) en todos los niveles del edificio, incluyendo al nivel cero en todas las caras se debe a la naturaleza monocromática de la vibración forzada.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la caracterización dinámica de 2 puentes peatonales. Estos puentes son representativos de los encontrados dentro de nuestro sistema de pasos peatonales.

La caracterización dinámica se llevó a cabo con dos diferentes sistemas de adquisición de datos, así como sensores con diferentes principios de funcionamiento (capacitivos y de fuerza balanceada). Las metodologías de instrumentación, así como el procesamiento de la señales permitieron la identificación de las frecuencias resonantes de la estructura.

El modelo analítico de cada uno de los puentes se llevó a cabo con un programa comercial. Se utilizaron algunas simplificaciones tales como la no existencia de la interacción suelo estructura. Este parámetro pudiera ser importante para el puente La Cañada dado que su cimentación se encuentra sumergida. Los resultados del modelo analítico no concuerdan completamente con los datos experimentales. Los modelos serán refinados para posteriores análisis.

La localización espacial de los sensores durante la instrumentación de una edificación se debe realizar dependiendo de los parámetros que se desean medir, con el fin de optimizar la cantidad de equipos de los que se dispone. De esta manera, si se desea medir frecuencias traslacionales es importante ubicar los instrumentos en diferentes niveles en altura y uno en la base. Por otra parte, si se desean medir frecuencias de torsión se debe disponer de un arreglo de al menos dos sensores en uno de los niveles de análisis (preferiblemente el último) con el fin de identificar los movimientos relativos de rotación.

Para la adecuada identificación de las propiedades dinámicas de una estructura se requieren aparatos que registren en forma simultánea las vibraciones en diferentes puntos de la estructura. La información de un solo aparato puede ser útil pero no suficiente, ya que un correcto análisis de las frecuencias modales, es necesario realizar comparaciones entre los resultados de diferentes sensores. Adicionalmente, las amplitudes del movimiento de la estructura en vibraciones ambientales son tan bajas que los resultados pueden dar información incorrecta de otro tipo de

movimiento o excitaciones diferentes a la estructura por lo que se requiere del análisis espectral completo.

Para la identificación de las frecuencias de traslación de una estructura en pruebas de vibración ambiental mediante el uso de la teoría de datos aleatorios, se reconocen dos tipos de análisis los cuales se deben realizar de manera conjunta: en el primero se comparan puntos instrumentados dentro de la estructura con puntos fuera de ésta; aquí la identificación de las frecuencias se hace mediante la identificación de picos en los cocientes espectrales. En el segundo tipo de análisis, se comparan puntos dentro de la misma estructura; éste sirve para confirmar las frecuencias identificadas con el primer análisis, mediante la función de coherencia principalmente. Esta metodología debe ir acompañada por el estudio de la información contenida en los espectros de potencia.

La identificación de las frecuencias asociadas a los modos de torsión se lleva a cabo mediante la instrumentación de un mismo nivel de la estructura en al menos dos puntos diferentes. Las frecuencias de rotación se observan principalmente al comparar los espectros de potencia de los puntos instrumentados. Los espectros de sensores ubicados cerca de los extremos de la estructura deberán presentar picos asociados a las frecuencias de rotación que deberán tener amplitudes significativamente más bajas en sensores cerca del centro, adicionalmente para sensores ubicados en extremos opuestos, las frecuencias de torsión deberán estar en desfase. También se utilizan cocientes espectrales y funciones de coherencia con un análisis análogo al utilizado para identificar las frecuencias de flexión.

REFERENCIAS

- ARTEMIS, d. (s.f.). Obtenido de http://www.svibs.com/resources/ARTEMIS_Modal_Help/Operational%20Modal%20Analysis.html
- Benjumea Cadavid, J. M. (s.f.). *Vibraciones causadas por actividad humana*. Obtenido de http://www.osso.org.co/docu/tesis/2003/vibracion/Benjumea2003_Vibraciones.pdf
- Cadavid, J. M. (s.f.). *Vibraciones causadas por actividad humana*. Obtenido de http://www.osso.org.co/docu/tesis/2003/vibracion/Benjumea2003_Vibraciones.pdf
- <https://maps.google.com.mx/>. (s.f.). Obtenido de <https://maps.google.com.mx/>
- Huerta, L. G. (2010). http://www.gripweb.org/gripweb/sites/default/files/TESIS_LG_Ortiz.pdf. Obtenido de http://www.gripweb.org/gripweb/sites/default/files/TESIS_LG_Ortiz.pdf
- IMT. (s.f.). Obtenido de Sitio web del Instituto Mexicano del Transporte: <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt90.pdf>
- Jhon Anderson Sánchez, e. a. (s.f.). Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v80n177/v80n177a10.pdf>
- León, W. J. (2009). Estimación de los períodos naturales de vibración de viviendas de baja altura con muros de concreto. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 39-54.
- Olivares, L. F. (30 de Septiembre de 2001). Modelos Calibrados de un Edificio Instrumentado. *Revista Digital Universitaria*, Vol.2 No.3.
- Proakis, J. G., & Manolakis, D. K. (1996). *Digital Signal Processing (3rd Edition)*. New Jersey: Prentice Hall International.

TiposDe.Org. (s.f.). Recuperado el Septiembre de 2015, de TiposDe.Org - Todos los tipos y clasificaciones en un solo lugar.:

<http://www.tiposde.org/construccion/192-tipos-de-puentes/>

Villarino, A. (s.f.). <http://ocw.usal.es/enseanzas-tecnicas/ingenieria-civil/contenido/TEMA%207-%20PUENTES.pdf>. Recuperado el Septiembre de 2015, de <http://ocw.usal.es/enseanzas-tecnicas/ingenieria-civil/contenido/TEMA%207-%20PUENTES.pdf>