



# **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS**

*“Propiedades dinámicas de puentes de longitud media”*

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:**

**RODRIGO FÉLIX RAMÍREZ**

**ASESOR:**

**DR. JOSÉ MANUEL JARA GUERRERO**

MORELIA, MICHOACÁN, ENERO DEL 2012



## **Agradecimientos**

### **Al todo poderoso:**

Por iluminarme en cada momento y por su protección.

### **A mi esposa Isabel y a mi hija Valeria:**

Por ser la inspiración de mi vida, por darme la fuerza y el empuje para salir adelante día a día.

### **A mis padres Carlos y Eustolia:**

Por su gran sacrificio y apoyo incondicional para llegar a ser lo que soy, una persona de bien.

### **A mis hermanos Amparo, Héctor, Carlos y Natalia:**

Por ser parte de mi vida y por el gran apoyo incondicional que me brindaron en toda la carrera.

### **A mis asesores de tesis:**

Dr. José Manuel Jara Guerrero, Dra. Bertha Alejandra Olmos Navarrete por toda la atención brindada y su valioso tiempo que dedicaron para realizar el presente trabajo.



## Índice

### Capítulo I

1- Introducción.....	5
1.1- Definición de Puente.....	6

### Capítulo II

2- Características generales de puentes de longitud media.....	9
2.1- Puentes por su uso.....	9
2.2- Tipos de puentes.....	10
2.2.1- Puentes viga.....	11
2.2.2- Puentes voladizos.....	12
2.2.3- Puentes en arco.....	13
2.2.4- Puentes colgantes.....	14
2.2.5- Puente atirantado.....	15
2.2.6- Puentes móviles.....	17
2.3- Conformación de la estructura de un puente.....	18
2.3.1- Superestructura.....	19
2.3.2- Subestructura.....	20
2.3.3- Elementos secundarios.....	21



### Capítulo III

3- Mediciones experimentales de la vibración en los puentes.....	23
3.1- Vibración ambiental.....	24
3.2- Vibración forzada.....	26

### Capítulo IV

4.- Métodos utilizados para obtener las propiedades dinámicas de los puentes.....	28
4.1- Técnica de descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD).....	29
4.2- Técnica de descomposición en el dominio del tiempo (TDD).....	29
4.3- Sistemas de varios grados de libertad.....	31
4.4- Vibración libre.....	31
4.5- Desacoplamiento modal.....	38

### Capítulo V

5.- Descripción y características de los puentes.....	42
5.1- Introducción.....	42
5.2- Puente el Despeñadero .....	43
5.3- Puente Km 463+ 464.....	46



## Capítulo VI

6.- Obtención de las propiedades dinámicas de los puentes en estudio.....	49
6.1- Obtención de las propiedades dinámicas del puente el Despeñadero con el software ARTEMIS.....	51
6.1.1- Características dinámicas del modelo analítico del puente el Despeñadero.....	58
6.2.- Obtención de las propiedades dinámicas del Puente km 463-464 con el software ARTEMIS.....	65
6.2.1- Características dinámicas del modelo analítico del Puente Km 463-464.....	66

## Capítulo VII

7- Conclusiones.....	69
----------------------	----

## Capítulo VIII

8- Bibliografía y referencias.....	70
------------------------------------	----



## Capítulo I

### 1- Introducción

A lo largo de los años el desarrollo de las grandes ciudades ha estado relacionado con el avance de la infraestructura vial. La historia ha demostrado que los pueblos ubicados en zonas de fácil acceso son favorecidos por el paso de redes de comercio, las cuales garantizan el intercambio de productos y, por consiguiente el desarrollo económico de las personas que viven en los poblados, mejorando así sus condiciones de vida.

Dada la gran importancia que tienen estructuras como son los puentes, es de especial interés el diseño de estas estructuras, ya que un error que lleve a la falla de la estructura puede ocasionar grandes pérdidas tanto económicas como de vidas humanas.

Los puentes se construyen de diferentes materiales como son madera, piedra, acero y de concreto. Para puentes de claros medios, el concreto es un material mucho más económico que el acero y por lo tanto se han desarrollado diferentes técnicas de uso del mismo que han permitido construir estructuras complejas para librar claros de moderada longitud.



## 1.1- Definición de Puente

Un puente es una estructura hecha de madera, piedra, ladrillo, concreto simple, concreto armado o acero estructural que se utiliza para que una vía de comunicación pueda atravesar un río, un cañón, un valle, un camino, una vía férrea o cualquier obstrucción. El diseño de cada puente depende de su función a la naturaleza del terreno sobre el que el puente está construido (Crespo Villalaz, 2008).

A través de los años el desarrollo de las ciudades ha estado relacionado con el avance de la infraestructura vial. La historia ha demostrado que los pueblos ubicados en zonas de fácil acceso son favorecidos por el paso de redes de comercio, las cuales garantizan el intercambio y, por consiguiente, el desarrollo económico de las personas que viven en los poblados, mejorando sus condiciones de vida.

La parte primordial de estas vías de comunicación fueron apareciendo durante el transcurso del tiempo, cuando había que salvar un obstáculo se utilizaron lo que llamamos puentes, los cuales fueron evolucionando a lo largo de los años modificándose su tipología y creándose nuevas formas en cuanto al uso de los materiales tratando de hacerlos tan resistentes como sea posible para así garantizar su permanencia ante los embates de las fuerzas de la naturaleza.



Dentro de los primeros puentes existentes en el mundo podemos mencionar a los “naturales”, los cuales eran hechos del tronco de un árbol atravesado para librar un obstáculo. También se utilizaron losas de piedra para arroyos pequeños.

Crespo Villalaz (2008), comenta que “Los romanos construyeron muchos puentes de madera y grandes arcos de mampostería. Inglaterra fue el primer país que usó las estructuras metálicas. En China se usaron los puentes colgantes. En Estados Unidos de América del Norte, los Pieleros, usaron mucho los cantiléver. La mayor parte de los puentes construidos en México son de concreto y por lo que se han desarrollado diferentes técnicas de uso de este material, al desarrollarse la tecnología del concreto reforzado, empezaron a construirse estructuras complejas con este material, además se observó que el concreto era un material mucho más económico que el acero, porque se fabricaba al pie de la obra con elementos locales.

El concreto reforzado es el material más importante en la industria de la construcción por su resistencia, se trabaja en forma líquida y puede adoptar casi cualquier forma, además que ha hecho posible, en mayor o menor grado, la existencia de la mayor parte de la infraestructura con que cuentan todos los países del mundo.

A lo largo de los años los ingenieros han estudiado el comportamiento de este material y por consiguiente se ha contribuido al desarrollo de las



metodologías, para así, hacer del concreto un material con las mejores condiciones de uso y calidad.

El concreto reforzado tiene una característica muy especial que es permitir la continuidad entre los diferentes elementos estructurales que constituyen una obra; por ejemplo, la continuidad que se presenta entre una columna y una viga de concreto reforzado. Esto permite la creación relativamente sencilla de conexiones resistentes a momento importantes para marcos de varios niveles. La combinación del concreto con barras de acero de refuerzo produce marcos capaces de desarrollar un comportamiento muy dúctil, capaces de absorber grandes deformaciones antes de fallar bajo cargas inesperadas como las encontradas durante un sismo.

Guerrero y Gama (2009) comentan “Esto favoreció a la construcción de grandes puentes de concreto reforzado, como el arco del puente Belisario Domínguez, el cual vino a sustituir el puente colgante sobre el río Grijalva, en Chiapas, en el año de 1954”.

Aunque la idea del uso de la técnica del concreto presforzado es muy antigua, no se pudo usar en las obras de ingeniería civil hasta que se desarrollaron concretos y aceros de alta resistencia que, permitieran la aplicación de grandes fuerzas externas y, redujeran las pérdidas que esas fuerzas experimentaban, como consecuencia de las deformaciones diferidas.



Vicente Guerrero y Gama (2009) comentan, “En México, El puente Zaragoza, ubicado sobre el río Santa Catarina, en la ciudad de Monterrey fue el primer puente de concreto presforzado del continente americano, construido en 1953”.

## Capítulo II

### 2- Características generales de puentes de longitud media

#### 2.1- Puentes por su uso

Un puente se diseña con el objetivo de resistir las fuerzas generadas por trenes, tráfico automovilístico o simplemente peatonal. En algunos casos puede haber restricciones en su uso; por ejemplo, puede ser un puente de una autopista y estar prohibido para peatones y bicicletas, o un puente peatonal, posiblemente también para bicicletas. Acueductos como el de las ciudades de Morelia y de Querétaro corresponden a un tipo de puente en forma de arco que transporta agua, asemejando a un viaducto, que es un puente que conecta puntos de altura semejante.



**Figura. 2.1** *Acueducto de Querétaro, (Puente arco que conduce agua).*

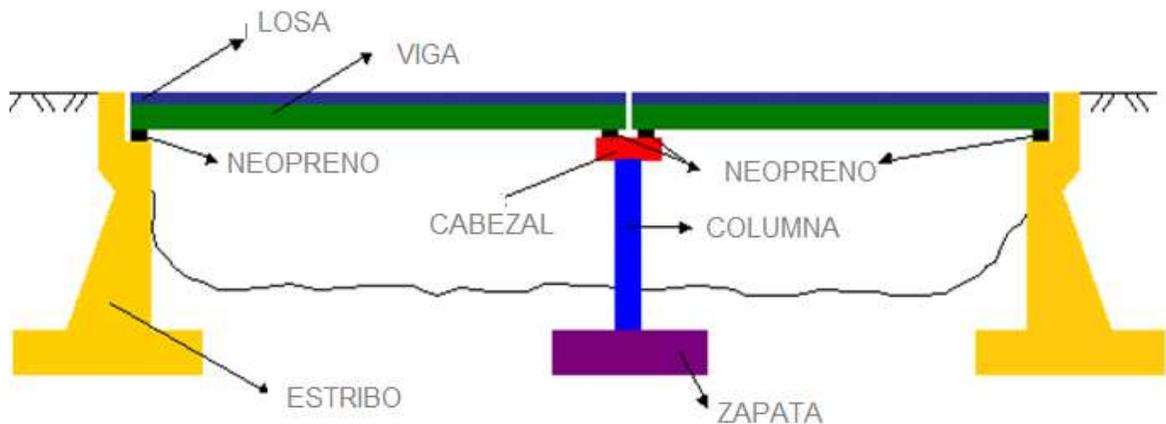
## 2.2- Tipos de puentes

Existen muchos tipos de puentes pero solamente seis de estos son los más importantes, y se conocen como: puentes viga, puentes voladizo, puentes arco, puentes colgantes, puentes atirantados y puentes móviles.



### 2.2.1- Puentes viga

Un puente de viga (figura 2.2) es básicamente una estructura rígida horizontal que descansa sobre dos estribos, localizados en cada uno de sus extremos. El peso del puente y cualquier tráfico sobre él esta directamente apoyado en los estribos. Los puentes de este tipo pueden ser de acero, concreto armado, concreto presforzado o madera. Las vigas metálicas que se usan pueden ser de sección en "I" o de ala ancha. Los puentes de vigas de hormigón armado o de acero pueden salvar tramos de 10 a 20 m; para distancias superiores se utilizan mucho el acero y el concreto presforzado y, cuando la longitud es considerable, las vigas son compuestas. Se han construido algunos puentes con vigas de concreto presforzado, de sección en "I", que salvan tramos de hasta 48 m.

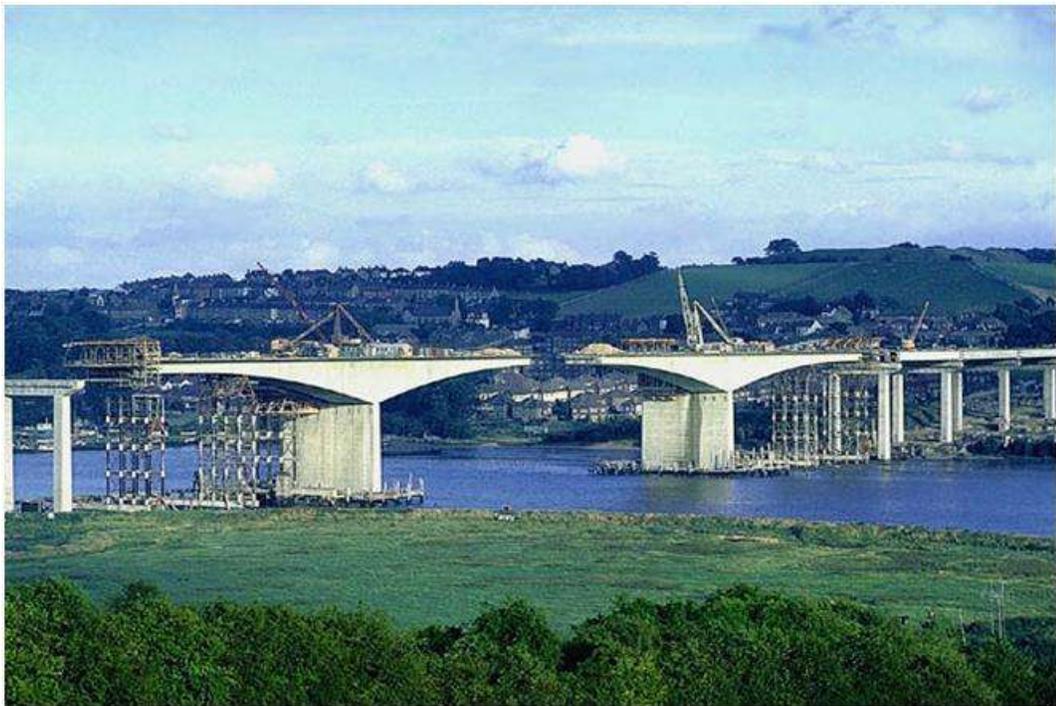


**Figura. 2.2 Puente tipo viga (Miliarium Aureum, 2001y 2004).**



### 2.2.2- Puente voladizo

Es un puente construido en cantiléver, como se muestra en la (figura 2.3) se proyecta horizontalmente en espacio, apoyado en un extremo o en su caso de dos extremos, pueden estar formados por vigas simples o por diseños especiales. La construcción de los puentes comienza de dos pilas cercanas entre si, uniéndose en el centro por unas vigas apoyadas que suelen anclarse en los estribos simétricamente opuestos respecto al centro. Los puentes cantiléver presentan diversas formas de construcción, en arco o viga, de acero u hormigón, y pueden salvar grandes claros, sin necesidad de estructuras auxiliares de apoyo durante su construcción.



***Figura. 2.3- Puente en voladizo (Medway, Inglaterra).***



### 2.2.3- Puentes en arco

Los puentes en arco (figurara 2.4) trabajan transfiriendo el peso propio del puente y las sobrecargas de uso hacia los apoyos mediante la compresión del arco, donde se transforma en un empuje horizontal y una carga vertical, son adecuados en sitios capaces de proporcionar una buena resistencia al empuje horizontal.

El uso de materiales modernos como el concreto armado y el acero ha hecho posible la realización de puentes de mayor longitud. Este tipo de puentes es posible construyendo un encofrado (estructura provisional similar a los puentes de piedra) que soporte el concreto fresco y las armaduras. Cuando el concreto ha adquirido la suficiente resistencia, se procede al desencofrado, eliminando toda la estructura provisional.

Puentes modernos, hechos de acero o de concreto armado, poseen forma de arco y tienen parte de su estructura cargada en tensión, es por esto que da la posibilidad de hacer una reducción o eliminación de la carga horizontal ejercida contra los contrafuertes, permitiendo su construcción en suelos más débiles.



**Figura. 2.4- Puente en arco (Jardín Botánico, Viña del Mar, Chile).**

#### **2.2.4- Puentes colgantes**

Un puente colgante es el que está sostenido por un arco invertido formado por un gran número de cables de acero, como el que se muestra en la (figura 2.5), del que se suspende el tablero del puente mediante tirantes verticales. Desde la antigüedad este tipo de puentes han sido utilizados por la humanidad para librar obstáculos. A través de los siglos, con la implementación y mejora de distintos materiales de construcción, es posible realizar este tipo de puentes, los cuales actualmente son capaces de soportar el tráfico de vehículos de gran tonelaje e incluso líneas de ferrocarril ligeras.



Los cables que conforman el arco invertido de los puentes colgantes deben estar anclados en cada extremo del puente, ya que son los encargados de transmitir una parte importante de la carga que tiene que soportar la estructura. El tablero debe estar suspendido mediante tirantes verticales que conectan con dichos cables. Las fuerzas principales en un puente colgante son de tracción en los cables principales y de compresión en los pilares.



***Figura. 2.5 Puente colgante (Golden Gate, San Francisco).***

### **2.2.5- Puente atirantado**

Puente atirantado es aquel cuyo tablero está suspendido de uno o varios pilones centrales mediante obenques (figura 2.6). Se distingue de los puentes



colgantes porque, en éstos, los cables principales se disponen de pila a pila, sosteniendo el tablero mediante cables secundarios verticales y, porque los puentes colgantes trabajan principalmente a tracción, y los atirantados tienen partes a tracción y otras a compresión. También hay variantes de estos puentes que consisten en que los tirantes van desde el tablero al pilar situado a un lado, y desde este, al suelo.

Este tipo de puentes se usa para claros medianos y grandes, con claros que van de los 300 a los 1000 metros, como en estrechos y bahías, en la actualidad para claros mayores a un kilómetro, se utilizan puentes colgantes solamente.



***Figura. 2.6- Puente en atirantado, Puente Quetzalapa, en la Autopista México - Acapulco.***



### 2.2.6- Puentes móviles

Un puente móvil es un puente que tiene la característica de moverse para permitir, normalmente, el paso de tráfico marítimo. La (figura 2.7) muestra Puente móvil, Albatros o Puente Bicentenario, Lázaro Cárdenas, Michoacán, México. El puente móvil puede construirse en una parte más baja, evitando así el alto costo de muelles y largos enfoques, y reduciendo el costo total del puente. En general, los puentes son impulsados por motores eléctricos, ya sea de funcionamiento con tornos, engranajes, pistones o hidráulicos.

Los puentes móviles pueden ser bastante largos, la longitud de la porción móvil está limitada por la ingeniería y las consideraciones de costo a escasos cientos de metros. La principal desventaja es que el tráfico en el puente debe detenerse cuando el puente comienza a moverse.



**Figura 2.7- Puente móvil, Albatros o Puente Bicentenario, Lázaro Cárdenas, Michoacán, México.**

### **2.3- Conformación de la estructura de un puente**

Los puentes, propiamente dichos, son estructuras de más de 6 metros de largo y que no llevan colchón de tierra sobre ellos. La constitución de los puentes se encuentra dividida en general, en tres partes fundamentales conocidas como superestructura, subestructura y los elementos secundarios. La descripción de los elementos que la forman se describe a continuación.



### 2.3.1- Superestructura

Está formada por un conjunto de elementos estructurales cuya función es transmitir las cargas a la subestructura. Estos elementos están dispuestos de tal forma que permitan librar los claros situados entre los soportes. La superestructura está constituida por vigas, diafragmas, tablero (superficie de rodamiento o calzada), postes, pasamanos, capa de rodadura, juntas de dilatación, parapeto, guarniciones, banquetas.

**Vigas:** Las vigas son elementos estructurales de concreto armado, diseñados para sostener cargas lineales, concentradas o uniformes, Provocadas por el paso de los vehículos.

**Diafragmas:** Son vigas localizadas en dirección transversal a la longitud del puente y, sirven para proporcionar rigidez transversal al puente, en algunos casos estas son más bien vigas secundarias cuando son destinadas a transmitir cargas del tablero hacia las vigas principales

**Tablero:** Es la parte estructural que queda a nivel de subrasante y que transmite tanto cargas como sobrecargas a las viguetas y vigas principales.



### 2.3.2- Subestructura

Es la parte del puente que soporta la superestructura y distribuye todas las cargas del puente al medio de soporte que es el suelo o roca que se encuentra por debajo de la cimentación, la cual puede estar formada por zapatas, losas de cimentación, pilas, y pilotes. La subestructura esta formada por los estribos, caballetes, cabezales, topes sísmicos, columnas, apoyos de neopreno. Estribos: los estribos además de recibir las descargas de la superestructura estos deben soportar el empuje de la tierra situada en su parte posterior y lateral correspondiente a los terraplenes de acceso al puente, en consecuencia trabajan también como muros de contención. Están constituidos por el coronamiento, la elevación y su cimentación. Una característica especial de estos elementos es que normalmente llevan aleros tanto aguas arriba como abajo, para proteger el terraplén de acceso.

Pila: se utiliza para transmitir las cargas de la superestructura hacia los cimientos, la principal carga que recibe es la de compresión, pero en conjunto estructural la columna soporta esfuerzos de flexión también, por lo que estos elementos deberán contar con un refuerzo de acero que le ayuden a soportar estos esfuerzos.

Zapatas: Las zapatas son cimentaciones superficiales, que garantizan de forma permanente, la estabilidad de la estructura del puente, este tipo de cimentación se utiliza cuando se tiene un suelo o roca muy resistente casi en la



superficie de su localización la cual es capaz de proporcionarle la resistencia necesaria para cumplir su función de transmitir las cargas.

**Cabezal:** se encuentra en la parte superior de las pilas y generalmente es un elemento macizo de concreto reforzado, que tiene como función unir los pilotes y distribuir la carga. Generalmente el cabezal con las columnas (pilas) trabajan a forma de un marco en la dirección transversal.

**Tope sísmico:** su función es prevenir que el puente pierda su apoyo cuando se generan fuerzas transversales intensas que sean la causa de grandes deformaciones en la dirección transversal del puente. Este tipo de riesgo se corre principalmente ante la acción de un sismo.

### **2.3.3- Elementos secundarios**

Los puentes contienen elementos secundarios, los cuales no contribuyen en la resistencia o transmisión de las cargas. Se hacen con el objetivo de dar seguridad a las personas que transitan por el puente. Estos elementos son: guarniciones, banquetas, parapetos, postes de alumbrado, señalamientos entre otras instalaciones.

**Guarniciones:** tiene como objetivo delimitar el ancho del paso de vehículos y el borde de la banqueta.



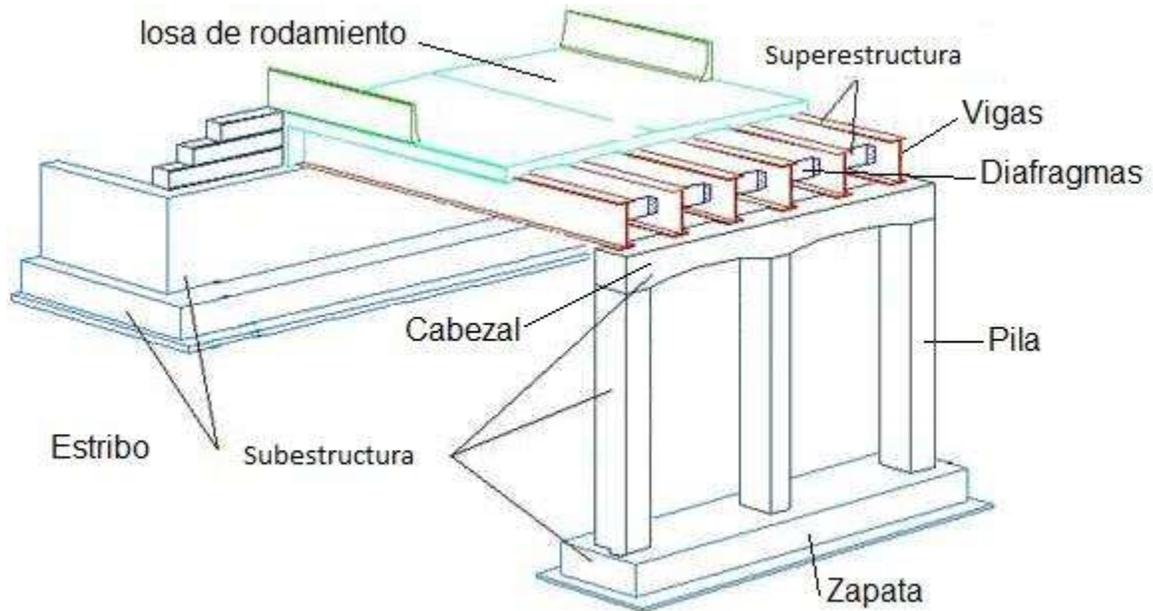
Banqueta. Sirve para el tránsito de peatones y evita por lo tanto accidentes.

Parapeto. Es un sistema de contención longitudinal fijada al sistema de piso para evitar la caída al vacío de los usuarios, vehículos, ciclistas y peatones, y estos pueden ser contruidos de acero o concreto.

Postes de alumbrado: sirve para dar visibilidad por la noche y así mismo identificar claramente los señalamientos carreteros que se encuentre el conductor a su paso por el puente.

Señalamientos: se usan para indicar a los usuarios las limitaciones o prohibiciones.

En la (figura 2.8) se muestran esquemáticamente las partes fundamentales que conforman un puente descritas previamente.



**Figura. 2.8- Elementos fundamentales de un puente.**

### Capítulo III

#### 3- Mediciones experimentales de la vibración en los puentes

El diseño, construcción y mantenimiento de estructuras tan especiales, en este caso los dos puentes en estudio, genera la necesidad de determinar con exactitud su comportamiento mediante la determinación de sus propiedades estructurales más importantes como son las dinámicas, para así evaluar el comportamiento estructural esperado de los puentes.



En este trabajo se intenta mediante el modelo de elementos finitos desarrollados en el programa SAP2000-14 y ARTeMIS Extractor 3.4, calibrar y

validar los resultados, de tal manera que involucre los parámetros físicos, con el objetivo de obtener una mejor correlación entre la prueba y el modelo analítico. Se evaluarán analítica y experimentalmente las frecuencias y/o modos de vibrar de las estructuras. Para calibrar ambos modelos, se modificarán iterativamente las rigideces de los apoyos dentro del modelo analítico hasta obtener resultados congruentes entre el modelo analítico y el software ARTeMIS.

### 3.1- Vibración ambiental

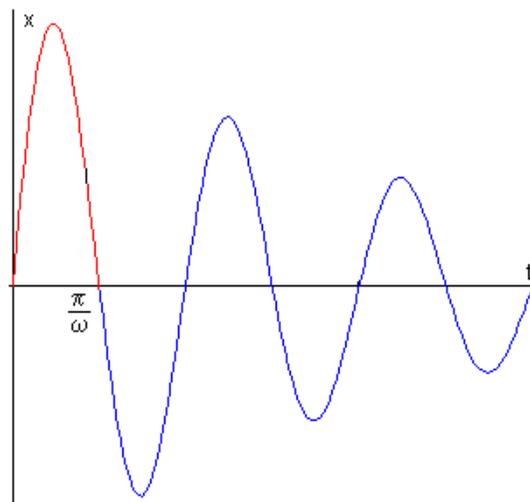


Figura 3.2- Grafica representativa de vibración ambiental.



Los puentes en estudio están sometidos la acción de fuerzas inherentes las estructuras, diversas sollicitaciones ambientales como son: el paso de vehículos y oscilaciones ocasionadas por el viento, la maquinaria, etc.

Dada la gran importancia que tienen estas estructuras como es el de comunicar dos puntos e influyen de manera vital en el desarrollo de económico de un país, es necesario evaluar sus propiedades dinámicas, frecuencias y formas modales, con el fin de determinar el estado actual de la estructura, su comportamiento esperado a futuro ante la acción de temblores y así darles el mantenimiento o la rehabilitación necesaria antes de que el daño sea irreversible.

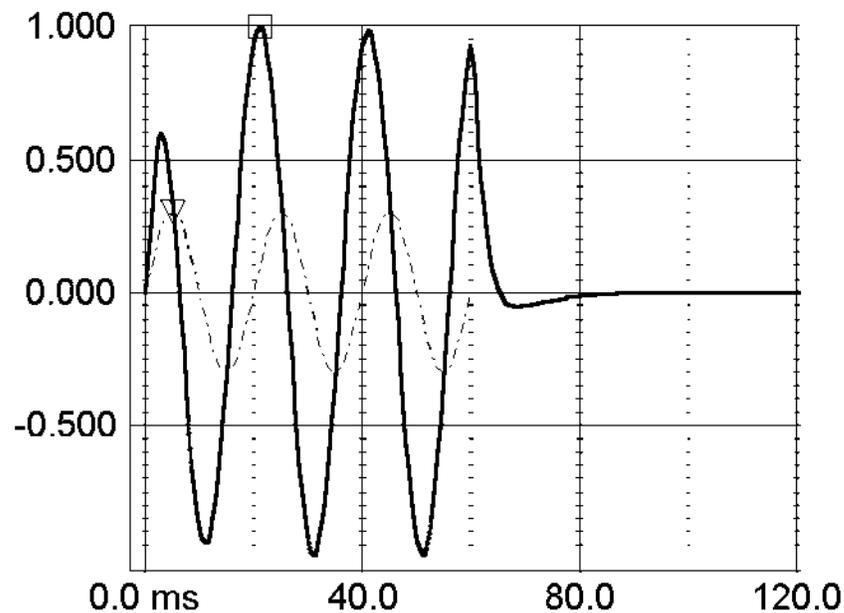
La aplicación de esta metodología puede ser realizada con menos esfuerzo aplicado a la estructura, menos tiempo y, un menor costo ya que para la medición no se requiere de la implementación de algún elemento que proporcione vibraciones para la prueba.

El equipo que se utiliza no es tan pesado ni sofisticado. Pero si se requiere de equipos de alta sensibilidad, como lo son los acelerómetros, los cuales permiten el registro y el estudio de la respuesta estructural a partir de este tipo de excitaciones, se usa para medir las diferentes vibraciones causadas por el entorno, vibraciones que se presentan en la estructura en forma de (aceleración, velocidad o desplazamiento), es una prueba que no daña físicamente a la estructura.



Existen diferentes técnicas para evaluar el comportamiento que tienen las estructuras ante las sollicitaciones ambientales como son: la pruebas dinámicas, estas son importantes, ya que son necesarias para conocer las propiedades dinámicas y posteriormente evaluar el comportamiento estructural del puente en condiciones de operación. Una de las técnicas empleadas es la técnica de descomposición en el dominio del tiempo (TDD), la cual se basa en la extracción de modos aislados que representan un sistema de un grado de libertad obtenido de un sistema de varios grados de libertad.

### 3.2- Vibración forzada



**Figura. 3.2- Grafica representativa de vibración forzada.**



La vibración que tiene lugar bajo la excitación de fuerzas externas corresponde al caso de un cuerpo que está vibrando y se pone en contacto con otro, lo que añade otra fuerza, el segundo cuerpo se ve forzado a vibrar con la misma frecuencia que el original. Si esta coincide con una de las frecuencias naturales del puente, y se aplica una carga armónica, se produce una situación de lo que se llama resonancia en la cual aumenta en forma progresiva la amplitud del movimiento tras cada una de las actuaciones sucesivas de la fuerza, provocando oscilaciones peligrosamente grandes.

El fenómeno de resonancia es de suma importancia, se debe tener especial cuidado en este fenómeno, evitar que coincida frecuencia forzada con la frecuencia natural del sistema. Ya que si coinciden estas dos frecuencias se produce este fenómeno trayendo consigo consecuencias graves. Tal es el caso del antiguo puente colgante Tacoma Narrows en Seattle, el cual colapso luego de ondear a causa de este fenómeno durante más de una hora.

Las vibraciones forzadas son de mayor importancia desde el punto de vista de la aplicación de la ingeniería, pues son las que generan mayor daño a las estructuras incluso hasta el colapso.



## Capítulo IV

### 4- Métodos utilizados para obtener las propiedades dinámicas de los puentes

#### 4.1- Técnica de descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD)

Con la ayuda del programa ARTeMIS se obtuvieron las frecuencias necesarias para el análisis comparativo de los modelos analíticos, mediante el uso de la técnica Frequency Domain Decomposition (FDD), la cual se basa en realizar una descomposición aproximada de la respuesta del sistema, en un conjunto de grados únicos de libertad independientes del sistema, uno por cada modo. El proceso se realiza simplemente por la descomposición de cada una de las matrices de densidad espectral estimada.

Esta técnica FDD consiste en los siguientes pasos que se comentan a continuación:

- Estimación de las matrices de densidad espectral de la serie de datos crudos del tiempo.
- Realización de la descomposición de valor singular de las matrices de densidad espectral.
- Si son muchos los conjuntos de datos que están disponibles, entonces se obtiene el promedio del primer valor singular de todos los conjuntos de datos y se promedia la segunda, etc.



- Selección del valor pico elegido en el promedio de los valores singulares. Para modos bien separados, se descubre el primer valor singular. En caso de que los modos estén cerca o repetidos, se elige el segundo valor singular o el tercer valor singular dependiendo, etc.
- Opcionalmente, si múltiples conjuntos de datos están disponibles, se revisan los valores singulares de cada conjunto de datos y se edita el pico de cosecha si es necesario.
- Los primeros tres pasos se realizan automáticamente cuando los datos son procesados. Los últimos pasos requieren de su entrada y hacer uso del FDD Peak Picking editor, esta técnica, es una técnica completamente no paramétrica en la cual los modos se estiman únicamente por el procesamiento de señales.

### **4.2- Técnica de descomposición en el dominio del tiempo (TDD)**

Esta técnica se utiliza también para la obtención de las frecuencias naturales y los modos de vibrar de las estructuras.

La técnica TDD se emplea para extraer las formas modales de una estructura cuando se cuenta con un registro de datos. Esta técnica se basa en la extracción de los modos aislados que representa un sistema de un grado de libertad obtenido de un sistema de varios grados de libertad. Para aislar cada uno de los modos, de un sistema de varios grados de libertad, se utiliza la teoría de los filtros, que consiste en construir una banda digital con un ancho que contiene solamente las frecuencias correspondientes al modo que se desea aislar, en un solo grado de libertad.



El proceso de aislamiento se resume en tres pasos:

Se diseña un filtro para cada ancho de banda correspondiente a cada una de las formas modales que se deseen aislar. Con los filtros obtenidos, se procede a filtrar los datos de las historias del tiempo con lo cual se construye una matriz de orden  $p \times N$ , que contiene los modos aislados de las historias de las aceleraciones  $Y_i$ , donde  $p$  es el número de sensores y  $N$  es el número de puntos de muestreo.

Se evalúa la matriz de correlación  $E_i$ , y su descomposición de los valores singulares  $U$ .

$$E_i = Y_i Y_i^T$$

$$U = SVD(E_i)$$

La primera columna de la matriz de los valores singulares  $U$ , representa la forma modal sin amortiguamiento del modo aislado.

Una vez que se han extraído las formas modales de interés  $\phi_i$ , primera columna de la matriz  $U$ , las frecuencias naturales se evalúan mediante el pico que se presenta en la función de densidad del espectro de potencia del factor de contribución del modo  $i$  en la aceleración,  $\ddot{c}_i^T$  el cual se evalúan mediante la siguiente expresión:



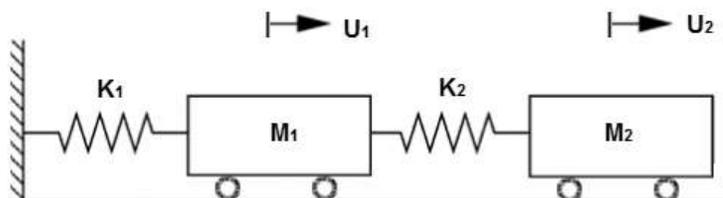
$$\ddot{c}_i^T = (1 / \phi_i^T \phi_i) \phi_i^T Y_i$$

Para obtener el porcentaje de amortiguamiento del sistema se hace con métodos tradicionales de análisis como el método de respuestas máximas.

### 4.3- Sistemas de varios grados de libertad

En los edificios es usualmente aceptable suponer que las masas están concentradas en los niveles de los pisos y que las fuerzas de inercia importantes son sólo fuerzas laterales. En el caso de puentes, además de la masa de la superestructura, es conveniente en algunos casos discretizar en varios nudos a las pilas para considerar la masa de estas. A continuación se describe analíticamente la manera en que se determinan las propiedades dinámicas de un sistema de varios grados de libertad.

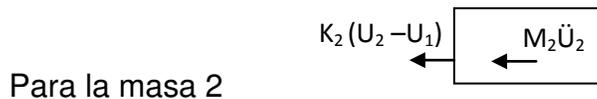
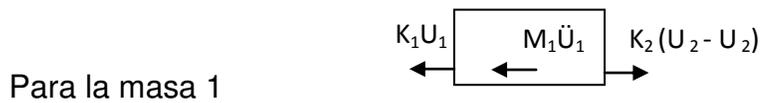
### 4.4- Vibración libre





Para entender este caso, se considera un sistema de dos grados de libertad y, cuyas masas  $M_1$  y  $M_2$  tienen desplazamientos  $U_1$  y  $(U_2-U_1)$  respectivamente.

Cuando ya existe movimiento, D.C.L.



Para las ecuaciones de equilibrio

$$\sum F_x = 0 \quad \leftarrow +$$

Masa 1

$$M_1 \ddot{U}_1 + K_1 U_1 - K_2 (U_2 - U_1) = 0$$

$$M_1 \ddot{U}_1 + K_1 U_1 - K_2 U_2 + K_2 U_1 = 0$$

$$M_1 \ddot{U}_1 + U_1 (K_1 + K_2) - K_2 U_2 = 0 \tag{1}$$



Masa 2

$$M_2\ddot{U}_2 + K_2(U_2 - U_1) = 0$$

$$M_2\ddot{U}_2 - K_2U_1 + K_2U_2 = 0 \quad (2)$$

Conviene considerar primero el caso más simple en el que no exista amortiguadores (sus efectos se incluyen después en forma aproximada) y no existe movimiento en el terreno.

Entonces la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{0}$$

Esta ecuación matricialmente se muestra como:

$$\begin{pmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{U}_1 \\ \ddot{U}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Es decir:

$$[ \mathbf{M} ] \{ \ddot{\mathbf{U}} \} + [ \mathbf{K} ] \{ \mathbf{U} \} = \{ \mathbf{0} \}$$

La matriz de masas es diagonal ya que las masas de cada nivel son independientes una de otra.



Donde:

$[ M ]$  = Matriz de masas de  $n \times n$

$[ K ]$  = Matriz de rigideces de  $n \times n$

$\{ U \}$  = Vector de desplazamientos de  $n \times 1$

$\{ \ddot{U} \}$  = vector de aceleraciones de  $n \times 1$

Toda estructura elástica puede vibrar libremente en forma tal que el desplazamiento de cada una de las masas con respecto a su posición de equilibrio estático es igual al producto de una función de la posición de la masa considerada por una función del tiempo, que es la misma para todas las masas.

En otras palabras, los desplazamientos para cada nivel se pueden expresar como.

$$U_1(t) = C_1 f(t) \quad (3)$$

$$U_2(t) = C_2 f(t) \quad (4)$$

Sustituyendo en la ecuación 1

$$M_1 C_1 f''(t) + (k_1 k_2) C_1 f(t) - K_2 C_2 f(t) = 0$$

$$M_1 C_1 f''(t) + f(t) [ (k_1 + k_2) C_1 - K_2 C_2 ] = 0$$

$$M_1 C_1 f''(t) = - f(t) [ (k_1 + k_2) C_1 - K_2 C_2 ]$$

$$\frac{f''(t)}{f(t)} = \frac{- (k_1 + k_2) C_1 - K_2 C_2}{M_1 C_1} \quad (5)$$



Sustituyendo en la ecuación 2

$$M_2 C_2 f''(t) - k_2 C_1 f(t) + K_2 C_2 f(t) = 0$$

$$M_2 C_2 f''(t) + f(t) [-k_2 C_1 + K_2 C_2] = 0$$

$$M_2 C_2 f''(t) = -f(t) [-k_2 C_1 + K_2 C_2]$$

$$\underline{f''(t)} = \underline{(-k_2 C_1 + K_2 C_2)} \quad (6)$$

$$f(t) \quad M_2 C_3$$

Como la parte izquierda de la igualdad de las ecuaciones es igual, la parte derecha es una constante que tiene el mismo valor en ambas ecuaciones, a esta constante se le llama,  $\Omega^2$ .

$$[f''(t)/f(t)] = -\Omega^2$$

$$f''(t) = -\Omega^2 f(t)$$

$$f''(t) + \Omega^2 f(t) = 0$$

Cuya solución es:

$$f(t) = A \cos \Omega t + B \sin \Omega t$$

Esta ecuación de puede expresar también como:

$$f(t) = C_3 \sin \Omega(t - \alpha)$$

Sustituyendo esta solución  $f(t)$  a las ecuaciones 3 y 4 se tiene:

$$U_1(t) = C_1 C_3 \sin \Omega(t - \alpha)$$

$$U_1(t) = C_4 \sin \Omega(t - \alpha) \quad (7)$$



Y

$$U_2(t) = C_2 C_3 \text{Sen} \Omega(t - \alpha)$$

$$U_2(t) = C_5 \text{Sen} \Omega(t - \alpha) \quad (8)$$

Sustituyendo 7 y 8 en las ecuaciones 1 y 2 se tiene:

$$\dot{U}_1(t) = C_4 W \text{Cos} \Omega(t - \alpha)$$

$$\ddot{U}_1(t) = -C_4 W^2 \text{Sen} \Omega(t - \alpha)$$

$$\dot{U}_2(t) = C_5 W \text{Cos} \Omega(t - \alpha)$$

$$\ddot{U}_2(t) = -C_5 W^2 \text{Sen} \Omega(t - \alpha)$$

Sustituyendo en 1:

$$M_1[-C_4 \Omega^2 \text{Sen} \Omega(t - \alpha)] + (K_1 + K_2) C_4 \text{Sen} \Omega(t - \alpha) - K_2 C_5 \text{Sen} \Omega(t - \alpha) = 0$$

$$\text{Sen} \Omega(t - \alpha) [-M_1 C_4 \Omega^2 + (K_1 + K_2) C_4 - K_2 C_5] = 0$$

$$-M_1 C_4 \Omega^2 + (K_1 + K_2) C_4 - K_2 C_5 = 0$$

$$(K_1 + K_2) C_4 - K_2 C_5 - M_1 C_4 \Omega^2 = 0 \quad (9)$$

Sustituyendo en 2:

$$M_2[-C_5 \Omega^2 \text{Sen} \Omega(t - \alpha)] - K_2 C_4 \text{Sen} \Omega(t - \alpha) + K_2 C_5 \text{Sen} \Omega(t - \alpha) = 0$$

$$\text{Sen} \Omega(t - \alpha) [-M_2 C_5 \Omega^2 - K_2 C_4 + K_2 C_5] = 0$$

$$-K_2 C_4 + K_2 C_5 - M_2 C_5 \Omega^2 = 0 \quad (10)$$

Llamaremos a  $C_4 = a_1$  y  $C_5 = a_2$



Las ecuaciones (9) y (10) se pueden escribir matricialmente como:

$$\left\{ \begin{matrix} K_1 + K_2 & -K_2 \\ -K_2 & -K_2 \end{matrix} \right\} - \Omega^2 \left\{ \begin{matrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \end{matrix} \right\} = \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix}$$

(11)

$$[ K ] - \Omega^2 [ M ] \{ A \} = 0$$

$\{ a \}$  = Vector de amplitudes modales

$\Omega$  = Frecuencia de vibrar

La ecuación (11) se le conoce como el problema de valores y vectores característicos donde  $\{ a \}$  son los vectores y  $\Omega^2$  son los valores característicos.

La solución diferente a la trivial se obtiene cuando:

$$[ K ] - \Omega^2 [ M ] = 0$$

En este caso:



$$\begin{pmatrix} K_1+K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{pmatrix} - \Omega^2 \begin{pmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{pmatrix} = 0$$
$$\begin{pmatrix} K_1+K_2-\Omega^2 M_1 & -K_2 \\ -K_2 & K_2-\Omega^2 M_2 \end{pmatrix} = 0$$

Por lo tanto

$$(K_1+K_2-\Omega^2 M_1) (K_2-\Omega^2 M_2) - (-K_2)(-K_2) = 0$$

$$K_1 K_2 - K_1 \Omega^2 M_2 + K_2^2 - K_2 \Omega^2 M_2 - K_2 \Omega^2 M_1 + (\Omega^2)^2 M_1 M_2 = 0$$

$$K_1 K_2 - K_1 \Omega^2 M_2 + K_2^2 - K_2 \Omega^2 M_2 - K \Omega^2 M_1 + (\Omega^2)^2 M_1 M_2 = 0$$

$$(\Omega^2)^2 M_1 M_2 - \Omega^2 ((K_1+K_2) M_2 + K_2 M_1) + K_1 + K_2 = 0$$

Las raíces de esta ecuación proporcionan las frecuencias de vibrar  $\Omega_{12}$  y  $\Omega_{22}$ . Existen en general tantas frecuencias como grados de libertad tenga una estructura.

#### 4.5- Desacoplamiento modal

El análisis lineal modal aprovecha las propiedades de los modos de vibrar del sistema para reducir el problema de resolver un sistema acoplado de  $n$  ecuaciones diferenciales al de  $n$  ecuaciones diferenciales desacopladas. La



parte fundamental de esto es que en un momento dado los desplazamientos de las masas del sistema de varios grados de libertad pueden expresarse como la suma de los desplazamientos debidos a la participación de cada uno de los modos naturales, puesto que los mismos constituyen un conjunto completo; esto es:

$$\mathbf{U}(t) = \sum Y_j(t)\mathbf{Z}_j \quad (12)$$

En términos completamente matriciales se tiene:

$$\mathbf{U}(t) = \mathbf{Z} \mathbf{Y}(t) \quad (13)$$

En las expresiones anteriores:

$\mathbf{U}(t)$ = vector de desplazamientos relativos a la base de las masas en el instante  $t$ .

$Y_j(t)$ =función escalar que expresa la variación con respecto al tiempo de la participación del modo  $j$

$\mathbf{Y}(t)$ = vector columna cuyos elementos son las  $Y_j(t)$

$\mathbf{Z}_j$  =  $j$ -ésimo vector modal en el que el termino  $z_{ij}$  es amplitud del desplazamiento de la masa  $m_i$ .

$\mathbf{Z}$  =matriz modal cuya  $j$ -ésimo columna es el modo  $\mathbf{Z}_j$ .

$\sum$  expresa suma sobre todos los modos de vibrar.

Sustituyendo  $\mathbf{U}(t)$  en la ecuación de equilibrio dinámico obtenemos:

$$\mathbf{M}\mathbf{Z}\mathbf{Y}''(t) + \mathbf{C}\mathbf{Z}\mathbf{Y}'(t) + \mathbf{K}\mathbf{Z}\mathbf{Y}(t) = \mathbf{0} \quad (14)$$



Gracias a las propiedades de ortogonalidad de los modos se obtiene.

$$\mathbf{Z}^T \mathbf{M} \mathbf{Z} = \mathbf{M}^*$$

$$\mathbf{Z}^T \mathbf{K} \mathbf{Z} = \mathbf{K}^*$$

Donde las matrices transformadas  $\mathbf{M}^*$  y  $\mathbf{K}^*$  son diagonales. Consideramos además que la matriz de amortización  $\mathbf{C}$ , se diagonaliza mediante la misma transformación modal, o sea que  $\mathbf{Z}^T \mathbf{C} \mathbf{Z} = \mathbf{C}^*$  también diagonal. Premultiplicando ambos miembros de la ecuación (14) y resulta.

$$\mathbf{M}^* \mathbf{Y}''(t) + \mathbf{C}^* \mathbf{Y}'(t) + \mathbf{K}^* \mathbf{Y}(t) = -\mathbf{Z}^T \mathbf{M} \mathbf{1} s''(t) \quad (15)$$

Como los términos fuera de las matrices transformadas son nulos la fila  $j$  del sistema de ecuaciones diferenciales (15) resulta:

$$m_j^* Y''(t) + c_j^* Y'(t) + k_j^* Y(t) = -\mathbf{Z}^T \mathbf{M} \mathbf{1} s''(t) \quad (16)$$

$m_j^*$ ,  $c_j^*$  y  $k_j^*$  se llaman *masa*, *amortiguamiento* y *rigidez* generalizados en el modo  $j$ . y están dados por:

$$m_j^* = \mathbf{Z}_j^T \mathbf{M} \mathbf{Z}_j$$

$$c_j^* = \mathbf{Z}_j^T \mathbf{C} \mathbf{Z}_j$$

$$k_j^* = \mathbf{Z}_j^T \mathbf{K} \mathbf{Z}_j$$



Dividiendo (16) entre  $m_j^*$  y definiendo  $w_j = (k_j^*/m_j^*)^{0.5}$ ,  $c_{crj} = 2(k_j^*m_j^*)^{0.5}$ ,  $\xi_j = c_j/c_{crj}$

$$Y_j''(t) + 2w_j\xi_j Y_j'(t) + w_j^2 Y_j(t) = -[Z_j^T M^{-1} s](t) \quad (17)$$

Es de interés comparar esta ecuación con la correspondiente a la de un grado de libertad

$$\ddot{U} + 2\xi w \dot{U} + w^2 U = -s(t)$$

Se trata de ecuaciones diferenciales lineales. De la comparación se entiende que para un mismo acelerograma  $s(t)$ ,  $Y_j(t)$  es igual al desplazamiento de la masa de un sistema simple de un grado de libertad con frecuencia  $w = w_j$  y fracción de amortiguamiento crítico  $\xi = \xi_j$  multiplicado por el siguiente factor:

$$p_j = \frac{Z_j^T M^{-1} \mathbf{1}}{Z_j^T M Z_j} \quad (18)$$

En términos de cantidades escalares  $p_j$  se expresa:

$$p_j = \frac{\sum_i m_i z_{ij}}{(\sum_i m_i z_{ij}^2)} \quad (19)$$

A  $p_j$  se le denomina coeficiente de participación del modo  $j$  y define la escala a la que interviene este modo en el movimiento.



## Capítulo V

### 5- Descripción y características de los puentes

#### 5.1- Introducción

En este trabajo se estudian 4 puentes localizados en la autopista México-Guadalajara, la elección de los puentes es con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad de los puentes ante sismos, mediante modelos analíticos de elementos finitos desarrollados en el programa SAP2000-14 en conjunto con el programa ARTeMIS Extractor 3.4, tratando de calibrar y validar modelos con las pruebas de vibración ambiental.

La red carretera de México es una de las más extensas de América Latina. Según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la longitud total de esta red es de 352.072 kilómetros, de los cuales un poco más de diez

mil kilómetros corresponde a carreteras de cuatro carriles. Es importante la construcción de puentes en un tramo carretero ya que permite el ahorro de tiempo en el tránsito vehicular y a la larga, ahorros monetarios importantes.



## 5.2- Puente el Despeñadero



Figura 5.5- Croquis de ubicación del puente el Despeñadero.

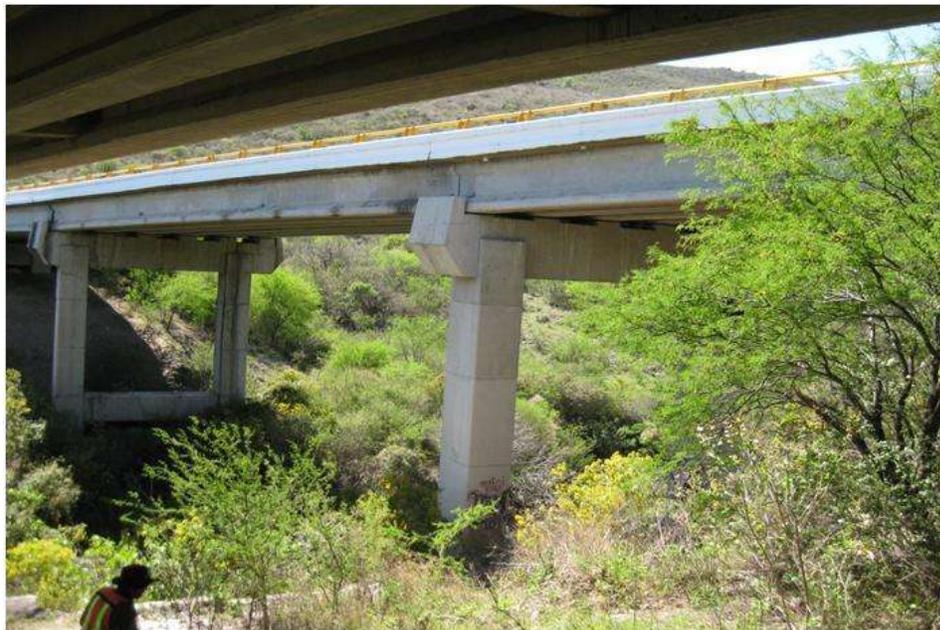


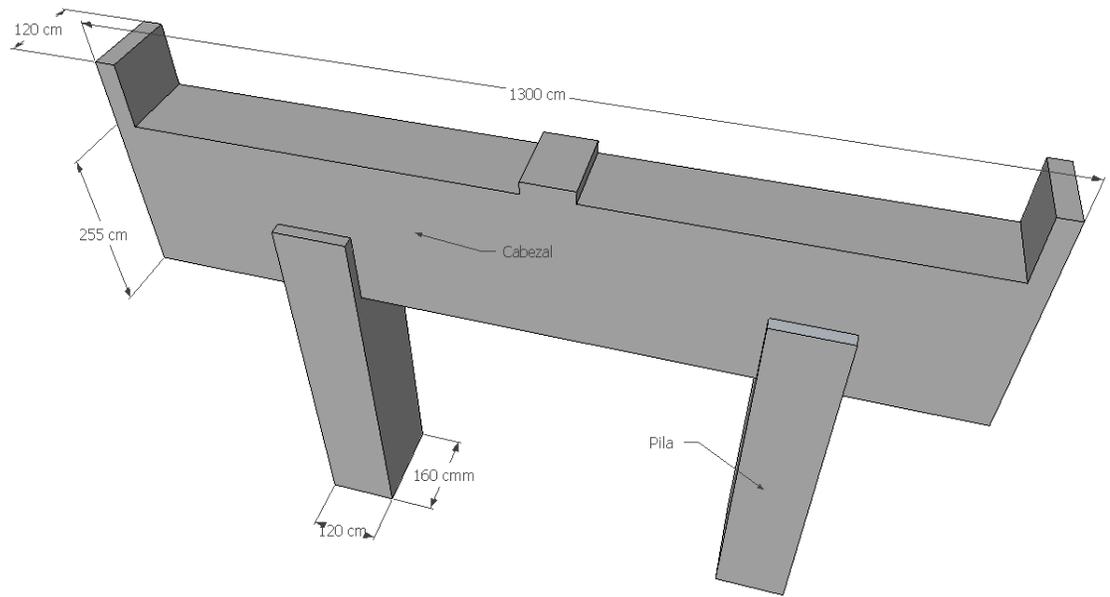
Figura 5.3- Ubicación del puente el Despeñadero en la Autopista México-Guadalajara



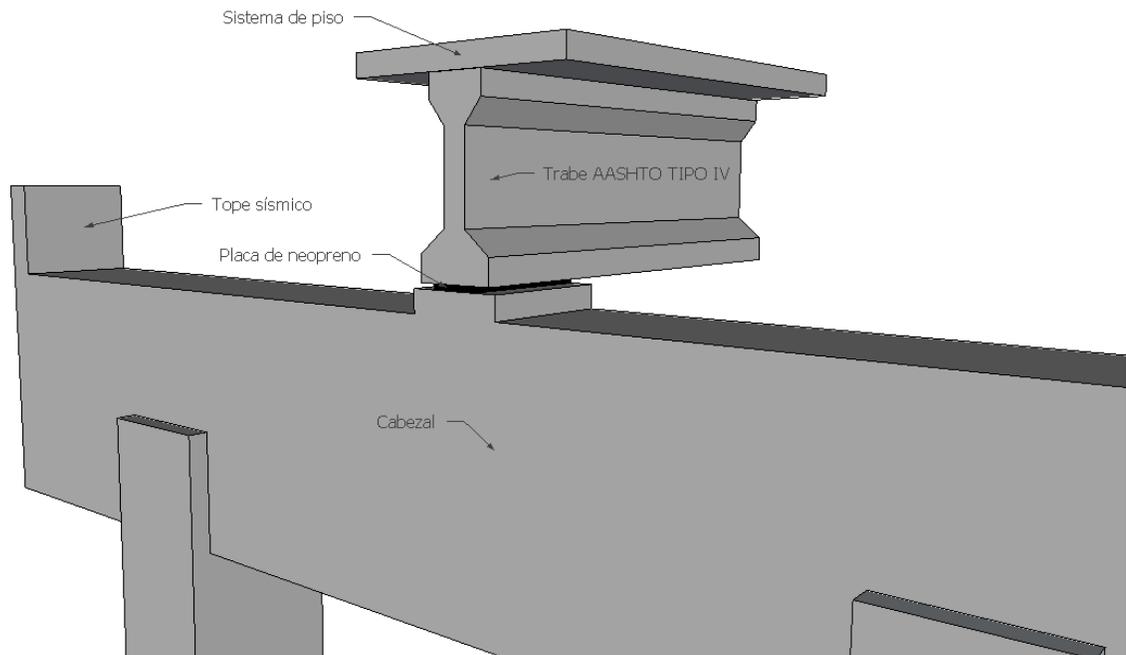
El puente el DESPEÑADERO está localizado en la autopista México-Guadalajara a la altura del km 252+780 en el municipio de Copándaro, Michoacán. Con coordenadas  $19.899939^\circ$ ,  $-101.26091^\circ$ , está formado por tres claros simplemente apoyados con longitudes de 25.56, 26.10 y 24.90 m. en cada claro.

La superestructura está formada por una losa de concreto reforzado (CR) de 0.20 m. de espesor soportada a la vez por 7 trabes tipo AASHTO IV. También cuenta con diafragmas de CR con sección transversal de 0.25 m. de base y 0.97 m. de altura localizados a los tercios de cada claro y tiene juntas de dilatación en cada tramo.

La subestructura está formada por dos columnas de CR de sección transversal rectangular de 1.60 m. en la dirección longitudinal por 1.20 m. en dirección transversal al puente y una altura de 11.56 m. apoyadas sobre de estas se encuentran los cabezales de CR de 13.00 m. de largo, 1.20 m. de espesor y 2.55 m. de altura. Los topes sísmicos son de CR están en el cabezal y sus mediadas son de 1.20 por 0.50 m. y una altura de 1.40 m. Tiene parapetos hechos de acero. La geometría descrita se muestra en la (figura 6.2).



**Figura. 6.2- Subestructura del puente el Despeñadero.**



**Figura. 6.2- Superestructura del puente el Despeñadero.**



### 5.3- Puente Km 463+ 464

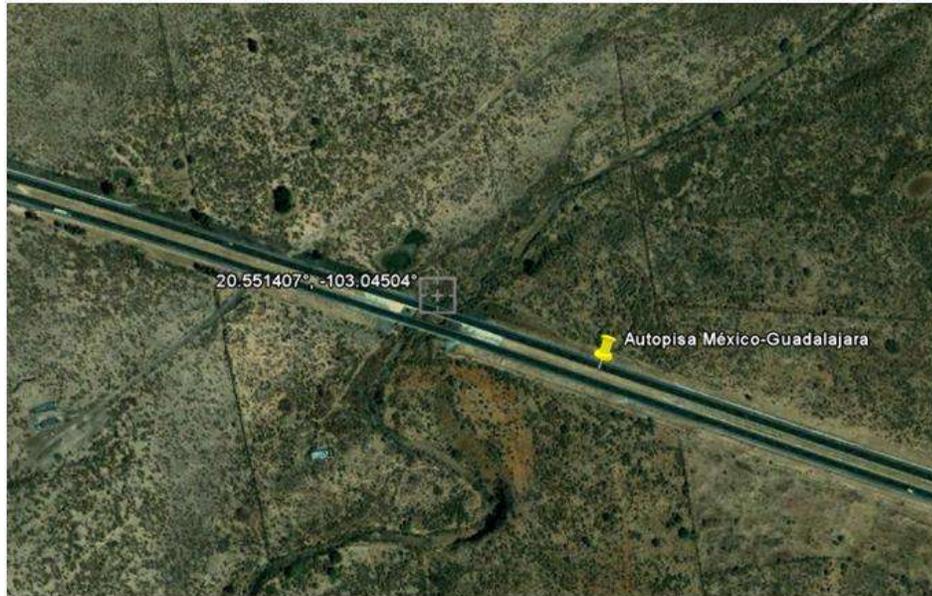


Figura 5.1- Croquis de ubicación del puente Km 463-464.



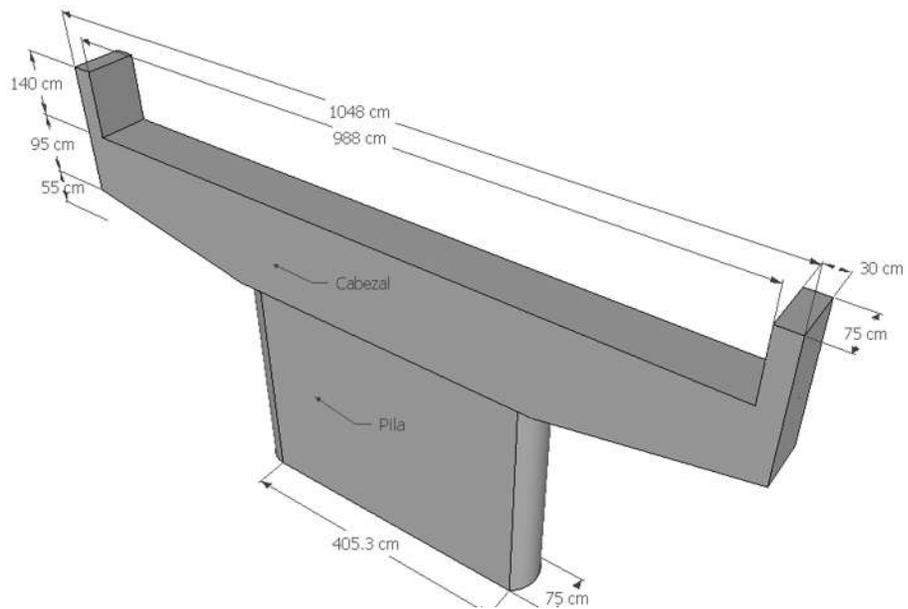
Figura 5.2- Ubicación del puente si nombre, a la altura del km 463-464 en la Autopista México-Guadalajara.



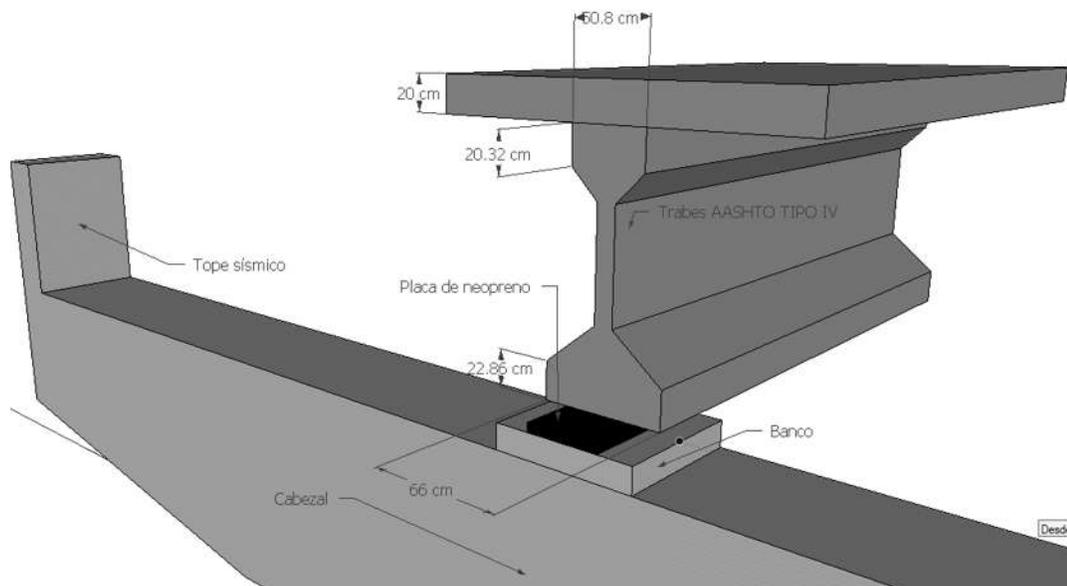
El puente km 463-464, se localiza en el km 463-464 de la autopista México-Guadalajara, con coordenadas  $20.551407^\circ$ ,  $-103.04504^\circ$ , está formado por tres claros simplemente apoyados con longitudes 29.40, 29.20 y 29.30 m.

La superestructura está formada por una losa de concreto reforzado (CR) de 0.20 m de espesor soportada a la vez por 7 trabes tipo AASHTO IV. También cuenta con diafragmas de CR con sección transversal de 0.25 m. de base y 0.97 m. de altura localizados a los tercios de cada claro y tiene juntas de dilatación en cada tramo.

La subestructura está formada por dos pilas de CR se sección transversal tipo muro con ancho en la dirección longitudinal de 0.75 m. y de 4.80 m. en la dirección transversal con una altura de 12.123 m. Sobre estas descansan los cabezales de CR de 0.75 m. de espesor, 10.48 m. de largo y una altura que varía de 1.50 a 0.95 m. Los topes sísmicos están formados por secciones transversales de 0.75 m. de largo, 0.30 m. de espesor y peralte de 1.40 m. Cuenta con guarniciones hechos de concreto en conjunto parapetos formados con barras de acero. La geometría descrita se muestra en la (figura 5.3 y 5.4).



**Figura. 5.3. Subestructura del puente km 463-464.**



**Figura. 5.4. Superestructura del puente km 463-464.**

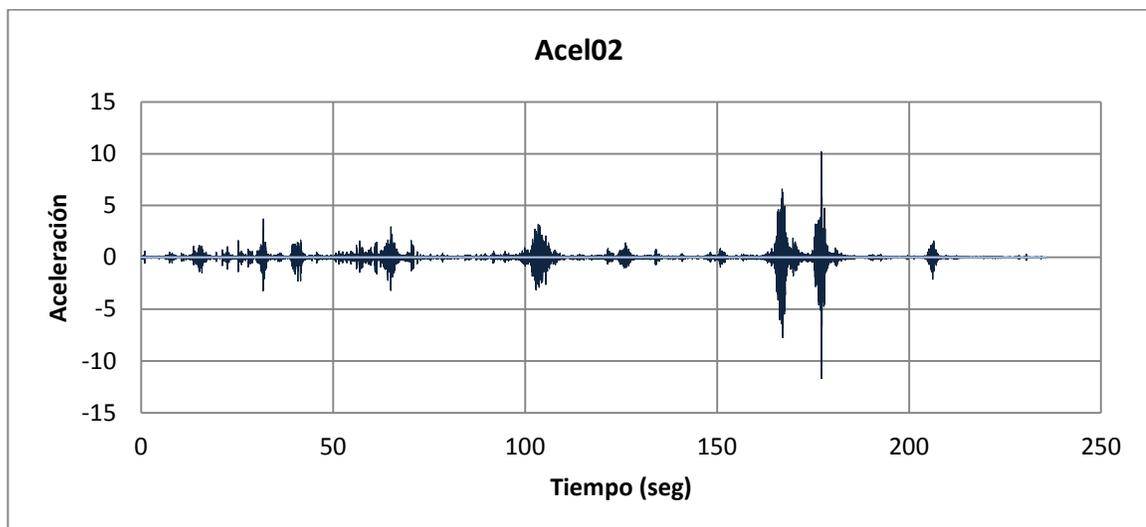


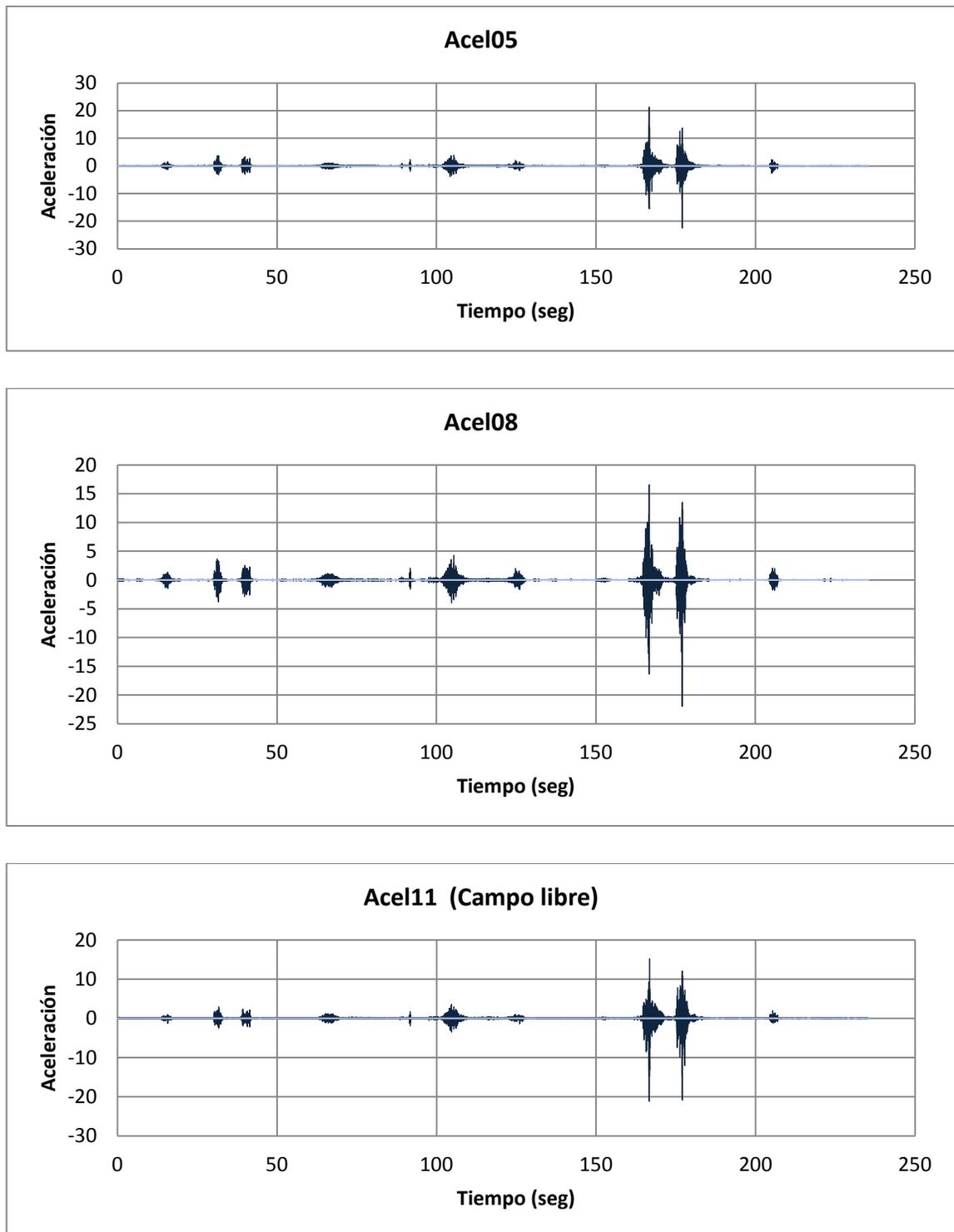
## Capítulo VI

### 6- Obtención de las propiedades dinámicas de los puentes en estudio

Se presentan las gráficas de la historia en el tiempo de las aceleraciones en la dirección longitudinal, transversal y vertical. Registradas por los acelerómetros ubicados en la primera cuarta parte, a la mitad y a la tercera cuarta parte del claro intermedio del puente el Despeñadero.

Las figuras registran el movimiento en la dirección longitudinal, las gráficas Acel02, Acel05 y Acel08 corresponden a los acelerómetros ubicados en el claro del puente y, la gráfica Acel11 corresponde a un cuarto acelerómetro ubicado en campo libre.

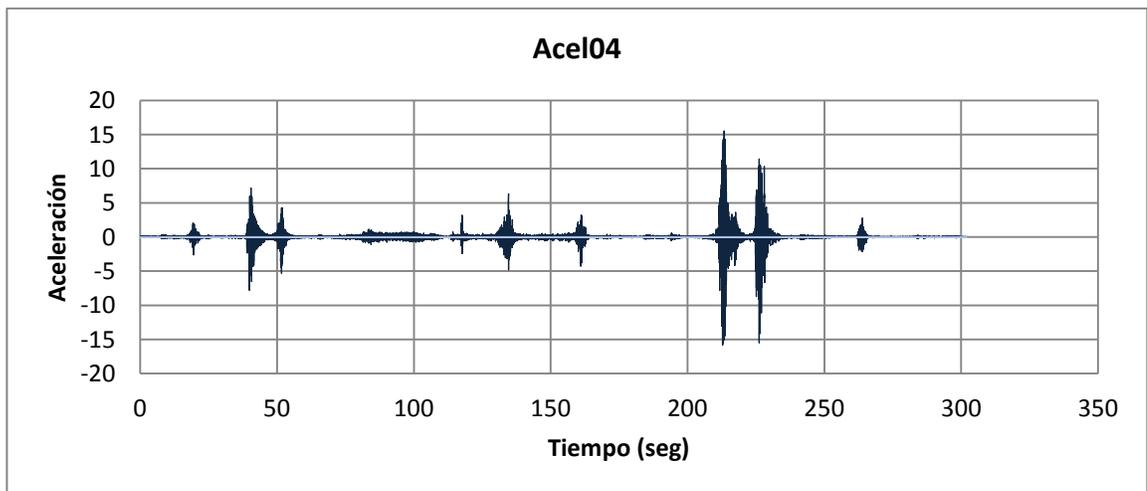
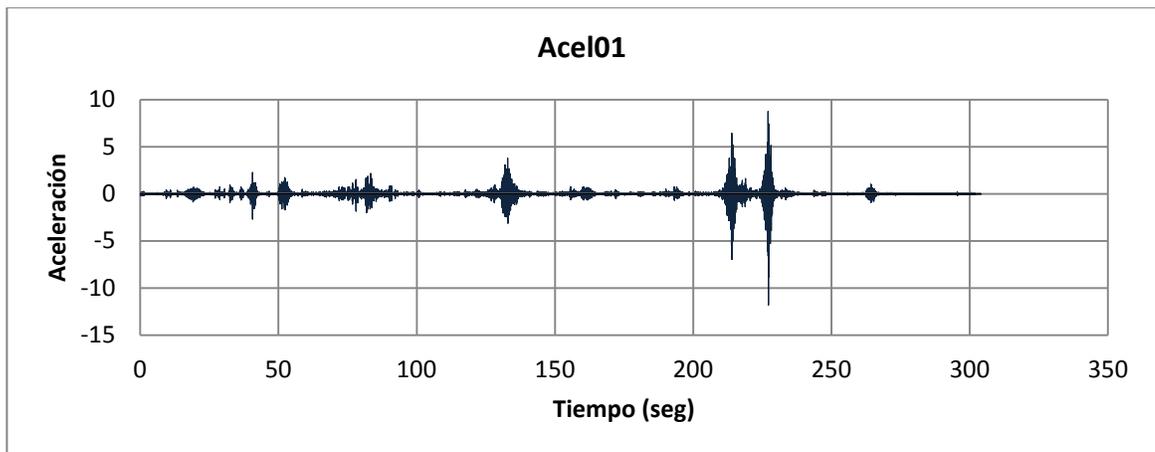


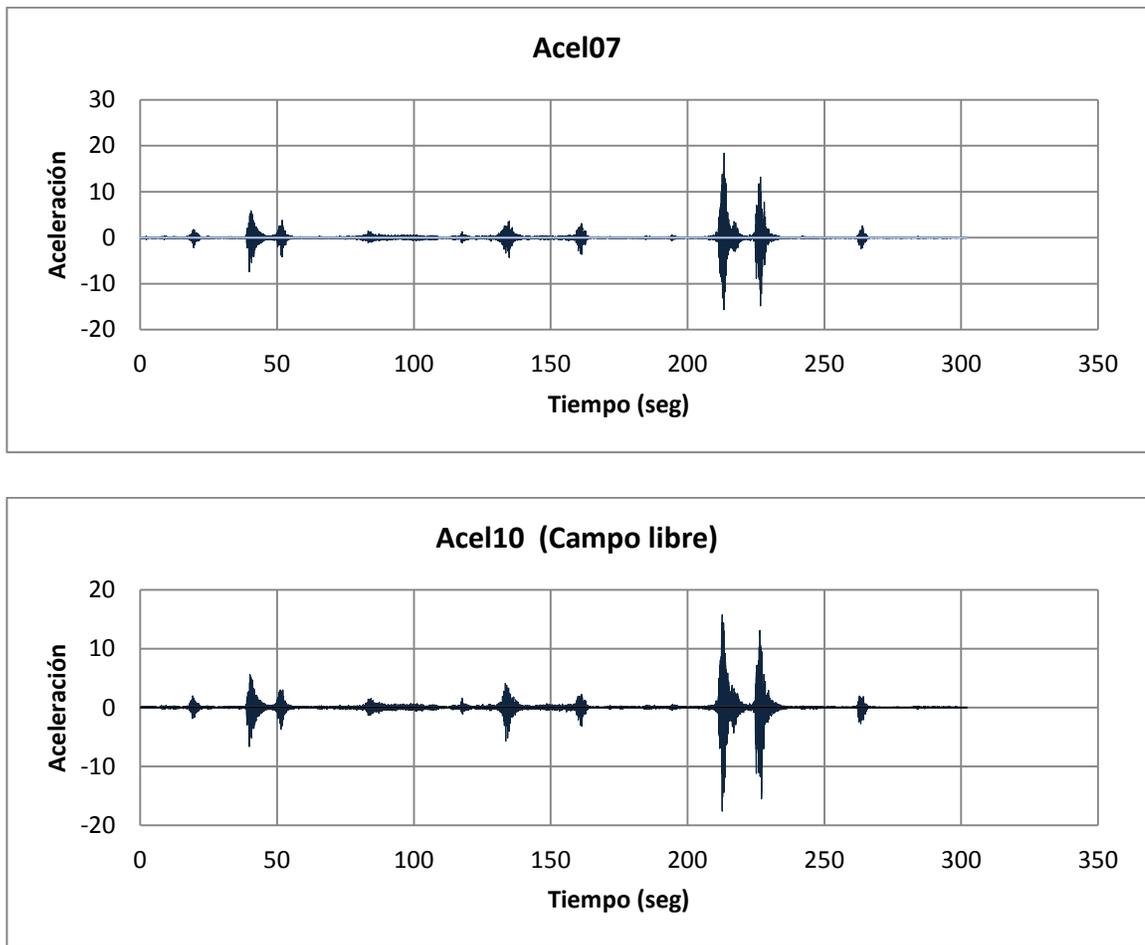


**Figura 6.1- Historia en el tiempo de las aceleraciones registradas en la dirección longitudinal.**



Las figuras en la dirección transversal se presentan en las gráficas Acel01, Acel04 y Acel07 que corresponden a los acelerómetros ubicados en el claro intermedio del puente. La gráfica Acel11 corresponde a un cuarto acelerómetro ubicado en campo libre.

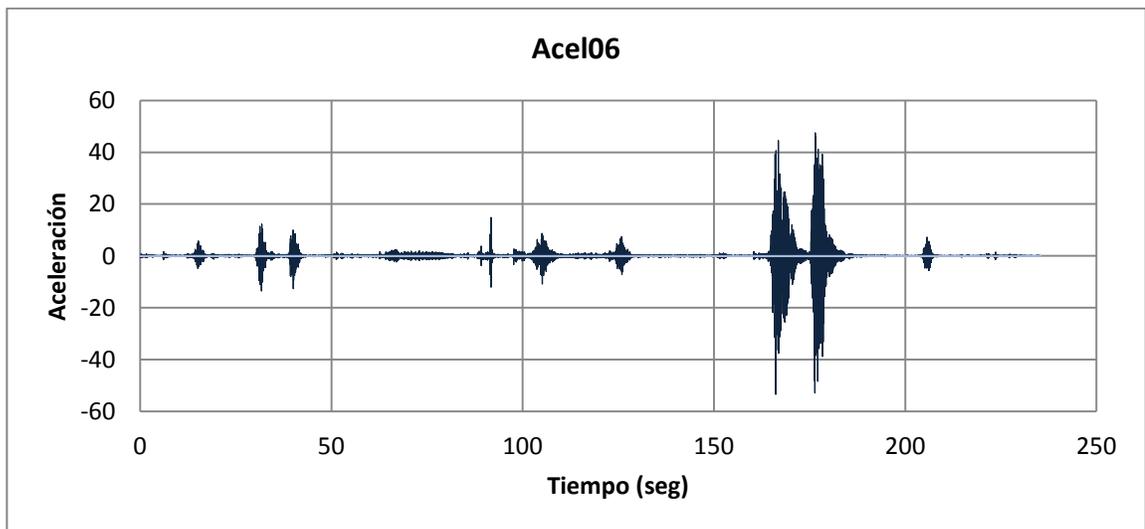
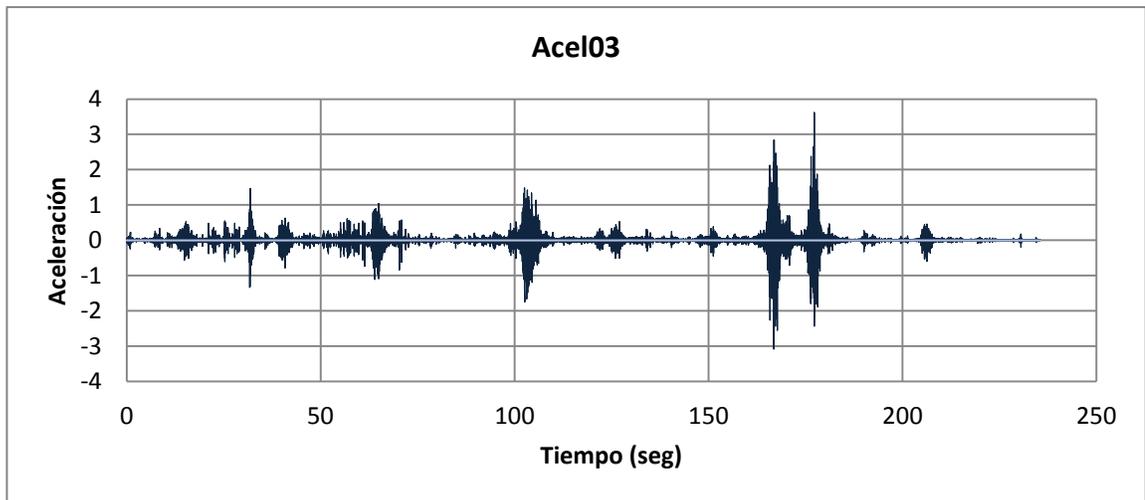


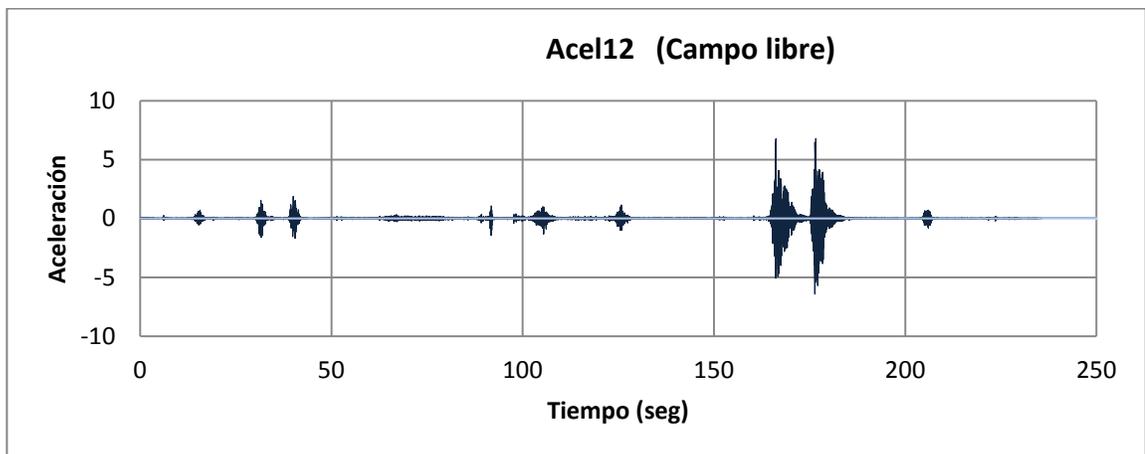
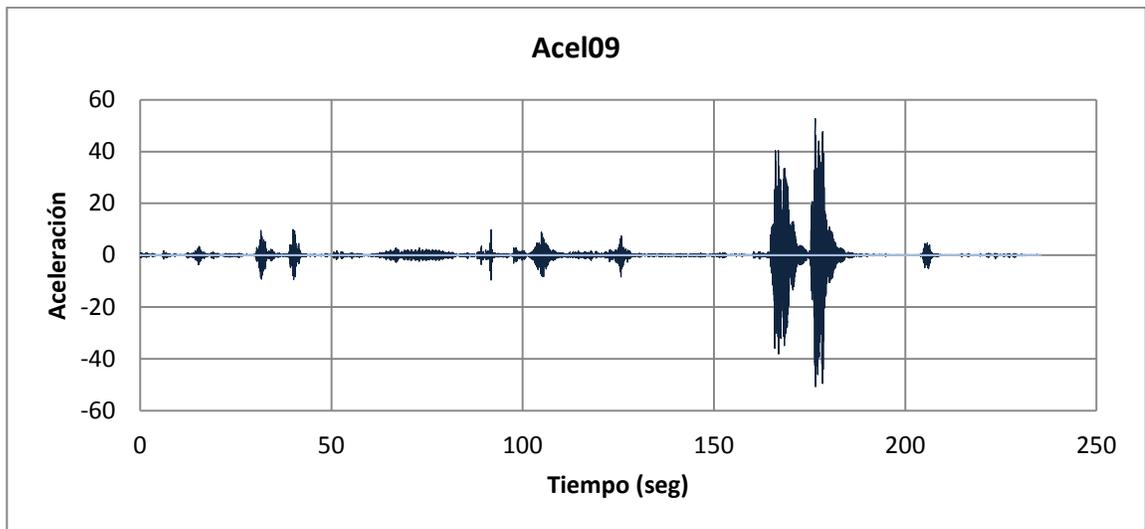


**Figura 6.2- Historia en el tiempo de las aceleraciones registradas en la dirección transversal.**



Por su parte, en la dirección vertical, las gráficas Acel03, Acel06 y Acel09 corresponden a los acelerómetros ubicados en el claro intermedio del puente y la gráfica Acel12 corresponde a un cuarto acelerómetro ubicado en campo libre.



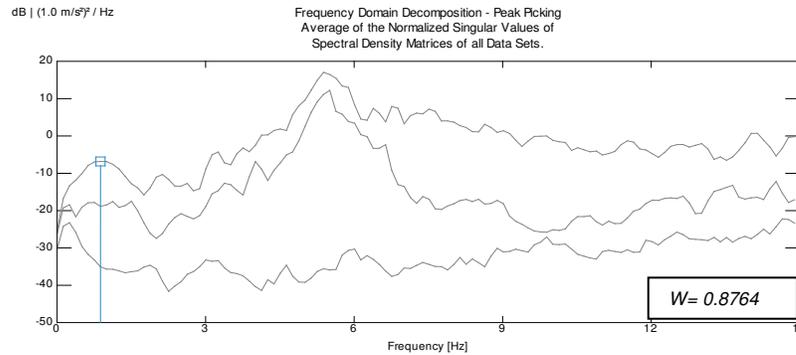


**Figura 6.3- Historia en el tiempo de las aceleraciones registradas en la dirección vertical**

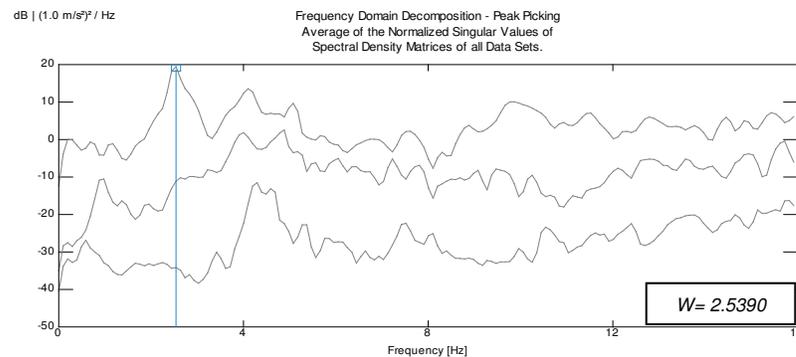


### 6.1- Obtención de las propiedades dinámicas del puente El Despeñadero con el software ARTEMIS.

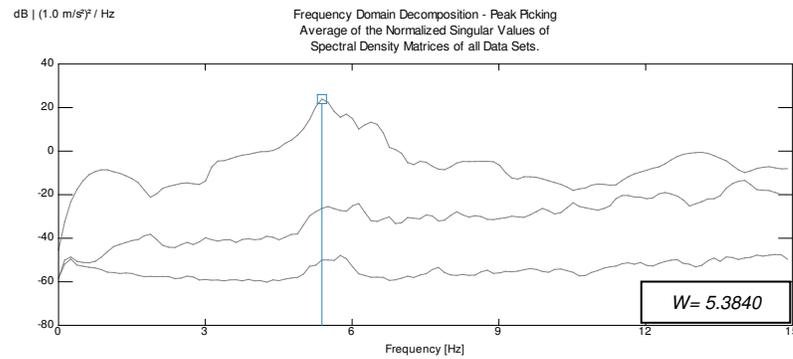
Las figuras siguientes muestran los resultados obtenidos con el programa Artemis en donde se señala con una línea vertical la frecuencia seleccionada por el software.



#### ***Frecuencia natural longitudinal Puente el Despeñadero***



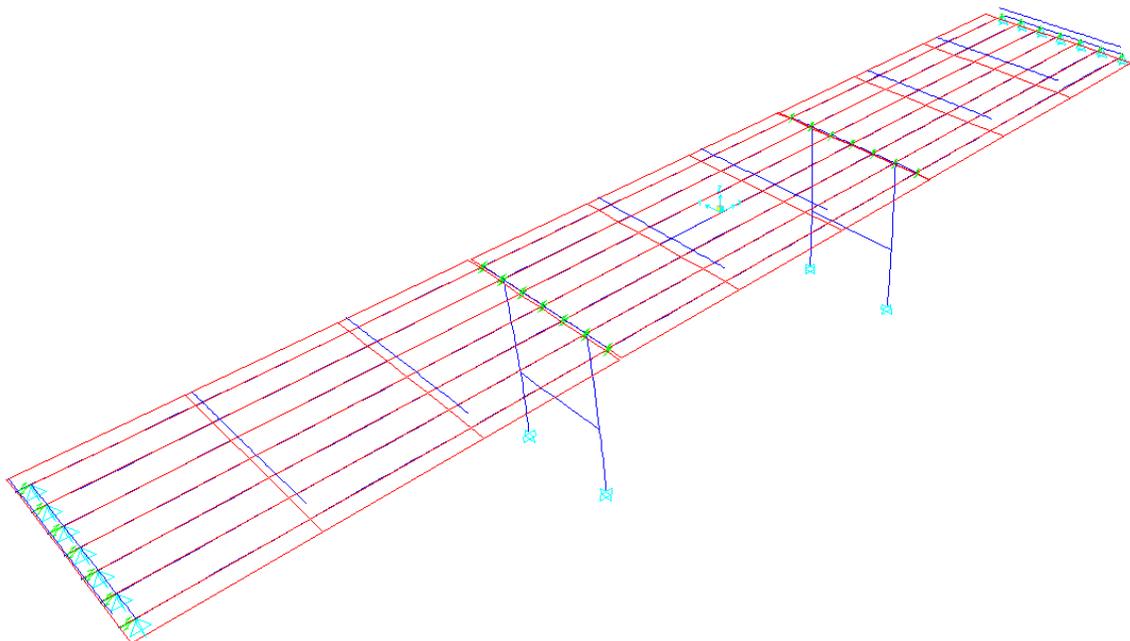
#### ***Frecuencia natural transversal Puente el Despeñadero***



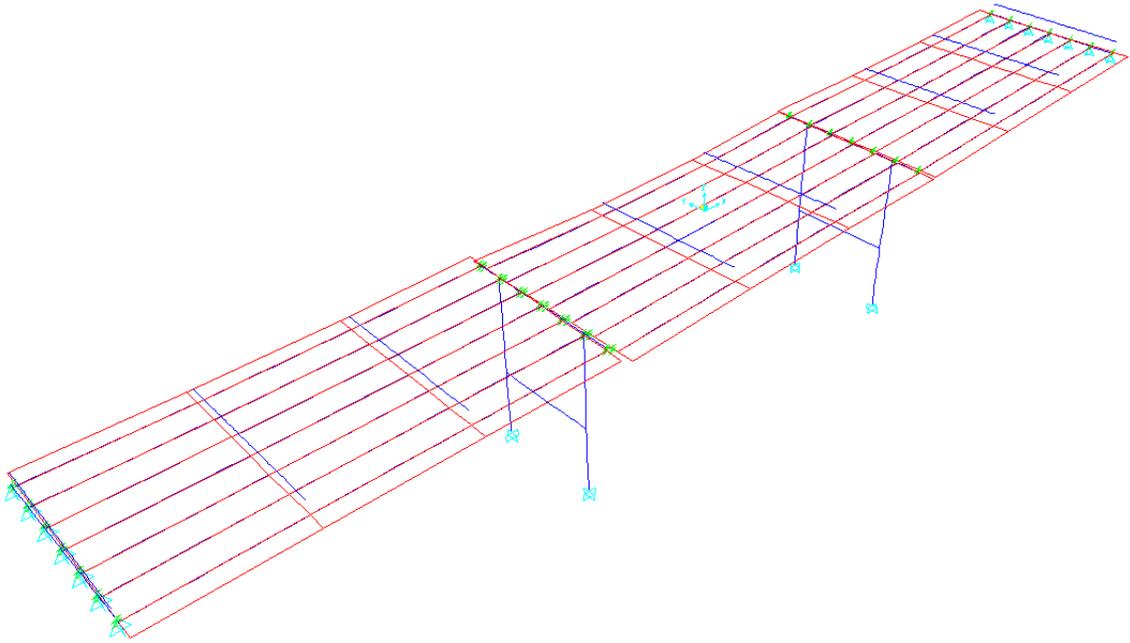
***Frecuencia natural vertical Puente el Despeñadero***

**Figura 6.4- Frecuencias naturales obtenidas del software ARTeMIS, Puente el Despeñadero.**

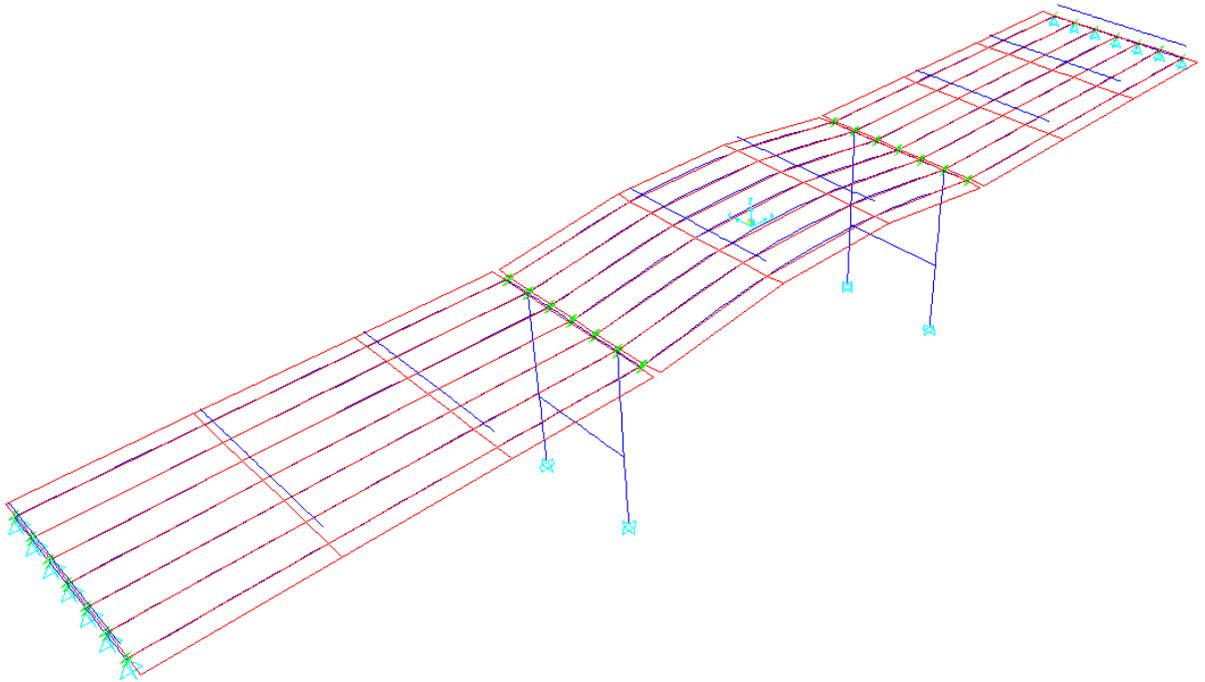
**6.1.1- Características dinámicas del modelo analítico del puente el Despeñadero**



***Primer modo longitudinal T= 1.1440 seg***



**Segundo modo transversal  $T= 0.6183$  seg**



**Tercer modo vertical  $T= 0.3055$  seg**



**Figura 6.5- Formas modales y periodos del modelo analítico del Puente El Despeñadero, desarrollado en el programa SAP2000-14.**

Los resultados obtenidos del programa analítico SAP2000-14 y el software ARTeMIS se encuentran resumidos en la tabla 6.1.

Se puede ver claramente que las frecuencias identificadas en el ARTeMIS comparadas con las obtenidas en el modelo analítico desarrollado en el programa SAP2000-14 varían un poco en la dirección Y y Z, mientras que en la dirección X es exactamente el mismo valor.

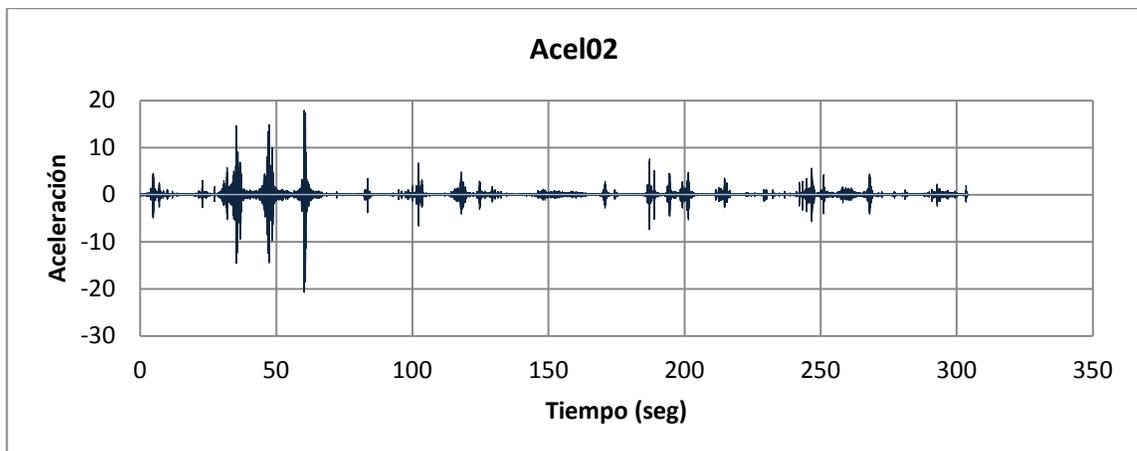
**Tabla 6.1- Resumen de resultados**

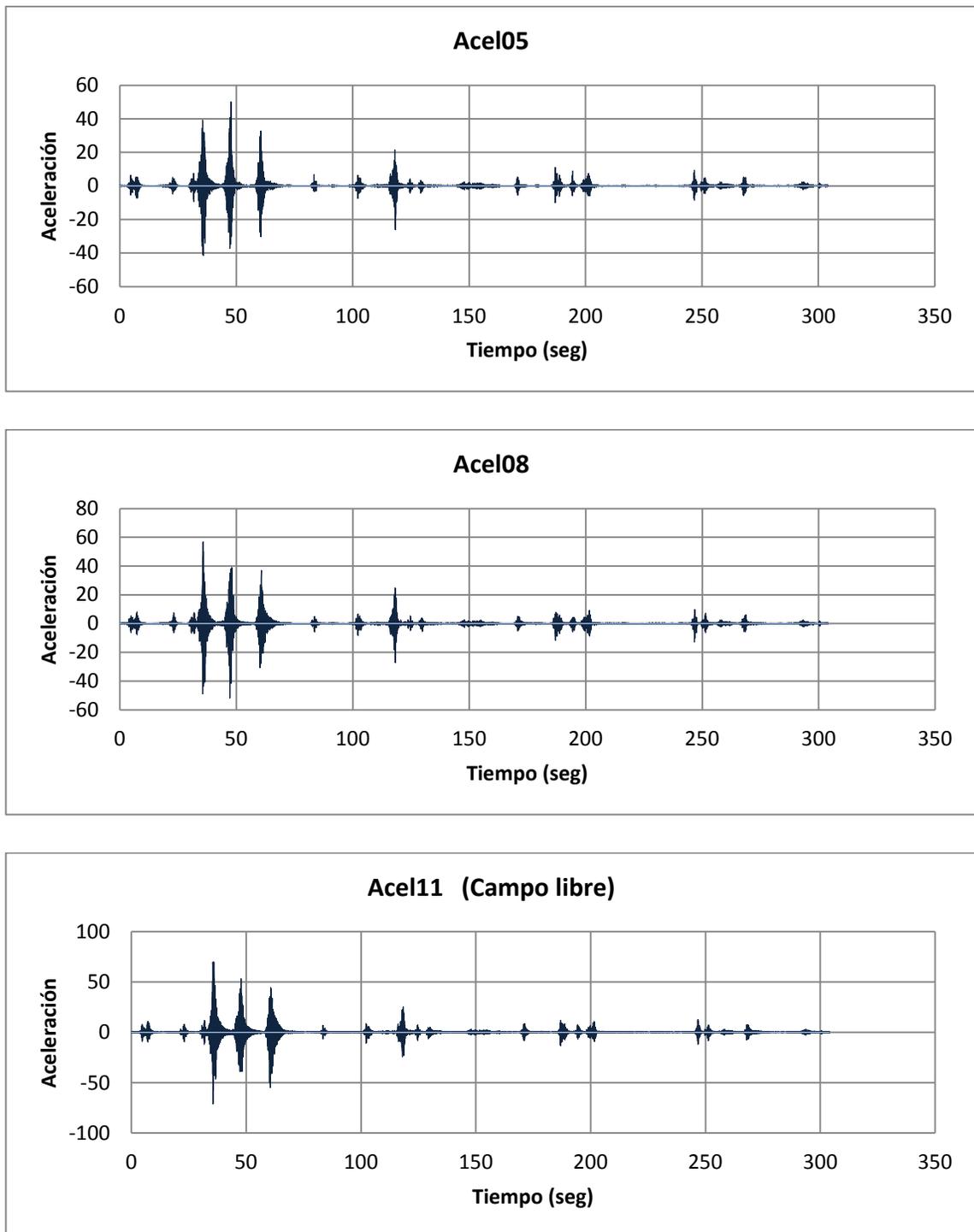
<b>PUENTE EL DESPEÑADERO</b>			
	<b>SAP2000-14 (T)</b>	<b>FRECUENCIA (Hz)</b>	<b>ARTeMIS (T)</b>
<b>X</b>	1.1430	0.8764	1.1410
<b>Y</b>	0.6183	2.5390	0.3938
<b>Z</b>	0.3055	5.3840	0.1857



Se presentan las gráficas de la historia en el tiempo de las aceleraciones en la dirección longitudinal, transversal y vertical. Registradas por los acelerómetros ubicados en la primera cuarta parte, a la mitad y a la tercera cuarta parte del claro intermedio del puente Km 463-464

El movimiento en la dirección longitudinal se muestra en las gráficas Acel02, Acel05 y Acel08 que corresponden a los acelerómetros ubicados en el claro del puente. La gráfica Acel11 corresponde a un cuarto acelerómetro ubicado en campo libre.

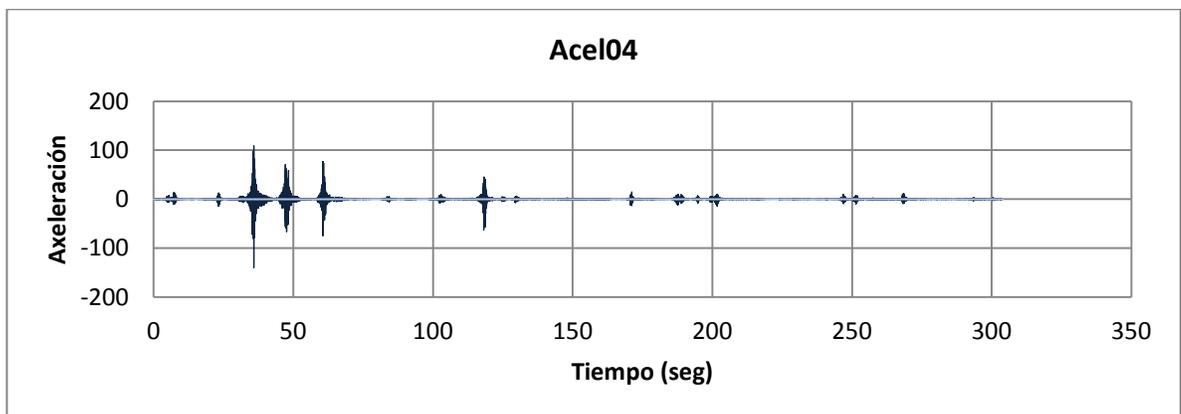
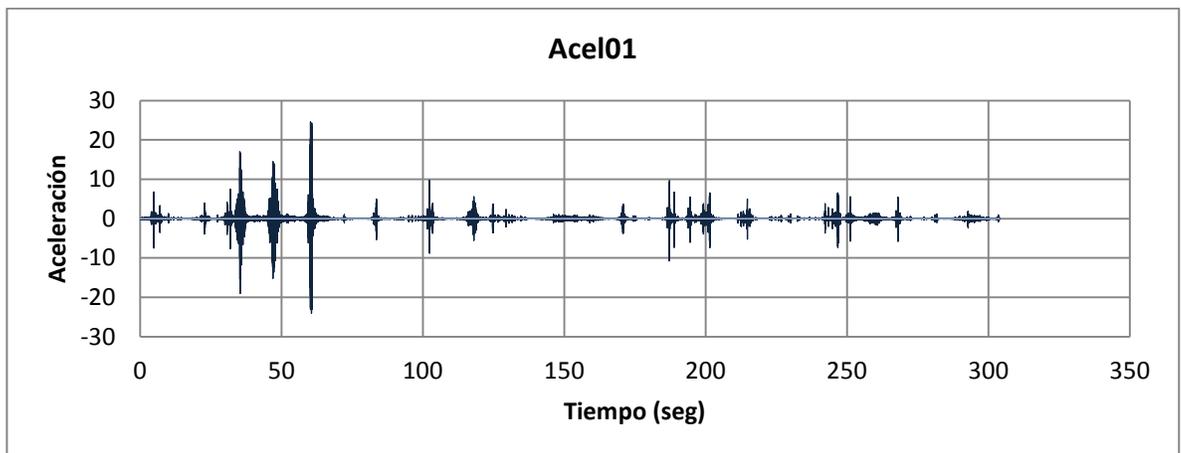


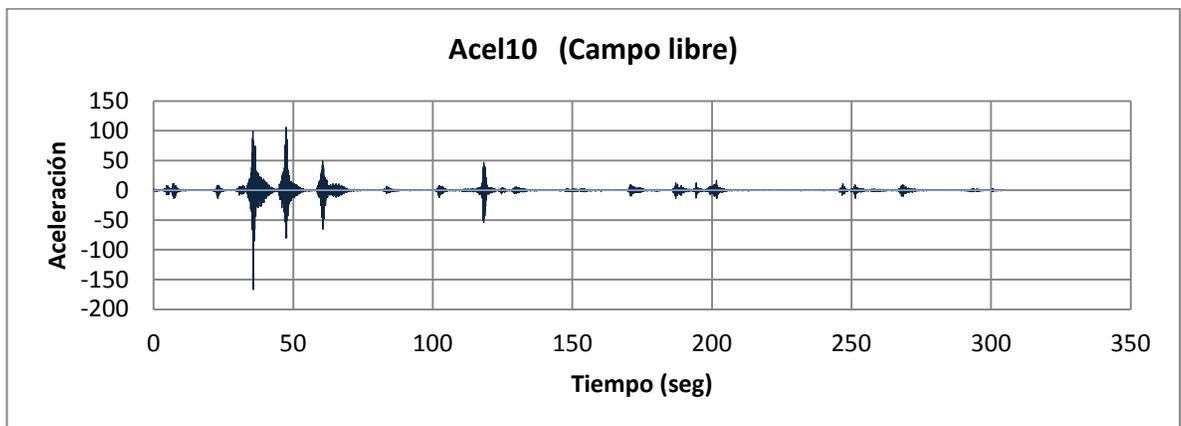
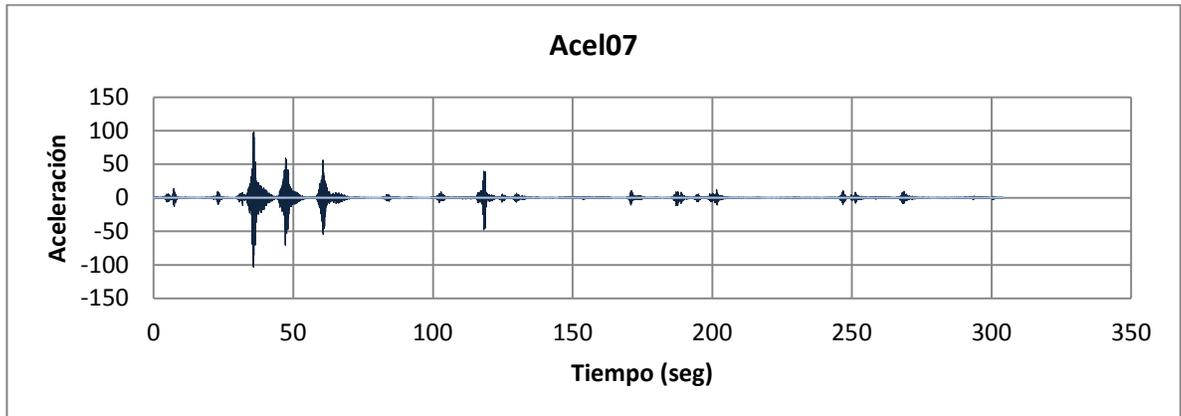


**Figura 6.6- Historia en el tiempo de las aceleraciones registradas en la dirección longitudinal.**



En la dirección transversal, las gráficas Acel01, Acel04 y Acel07 corresponden a los acelerómetros ubicados en el claro del puente y la gráfica Acel10 corresponde a un cuarto acelerómetro ubicado en campo libre.

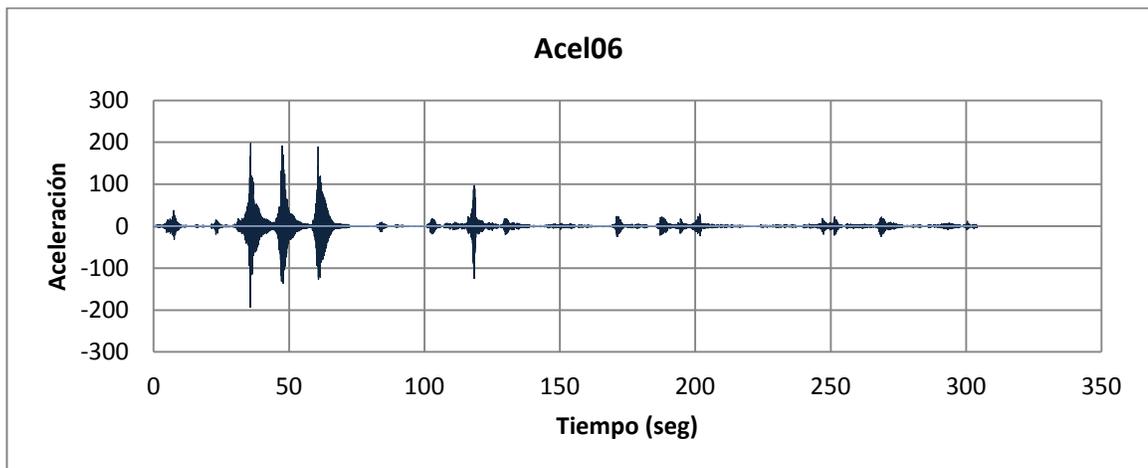
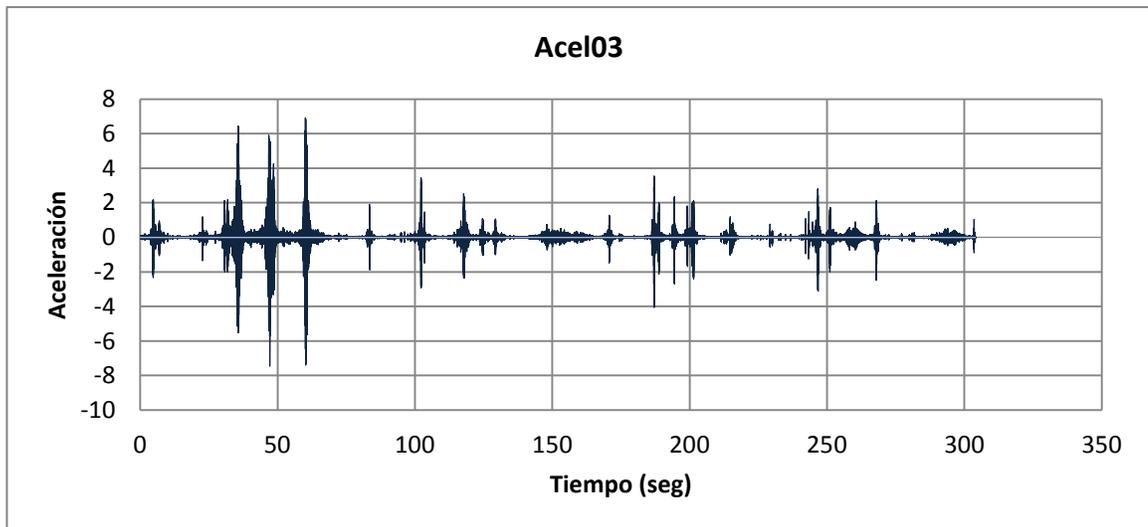


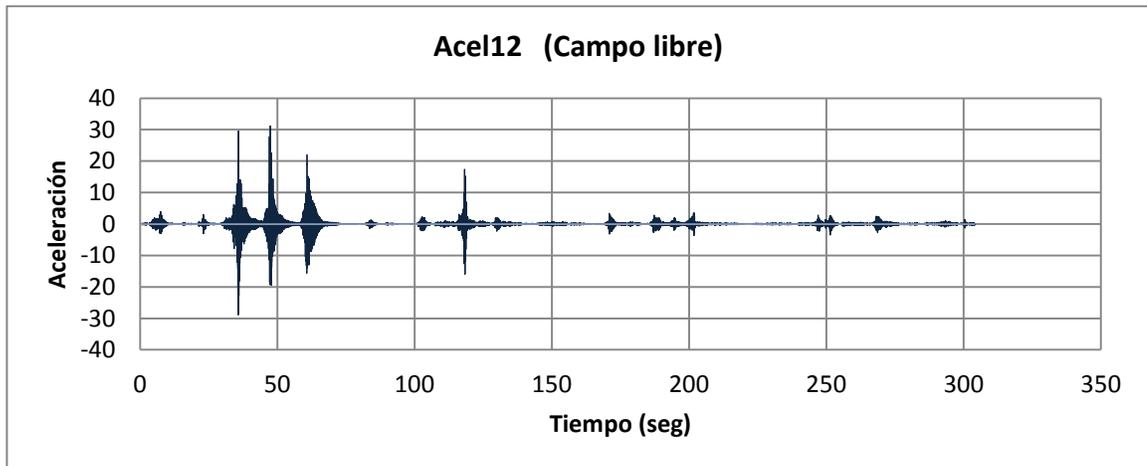
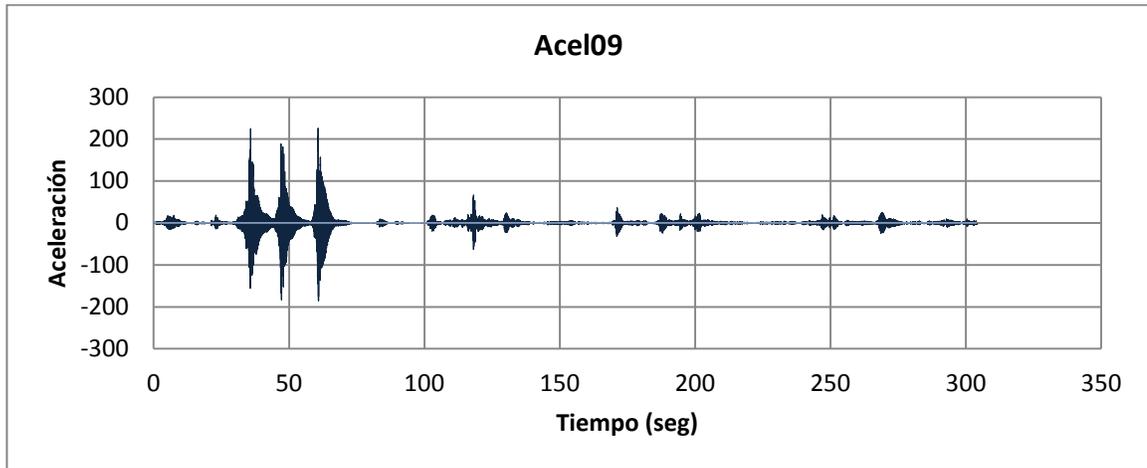


**Figura 6.7- Historia en el tiempo de las aceleraciones registradas en la dirección transversal.**



Finalmente, en la dirección vertical, las graficas Acel03, Acel06 y Acel09 corresponden a los acelerómetros ubicados en el claro del puente y la gráfica Acel12 corresponde a un cuarto acelerómetro ubicado en campo libre.



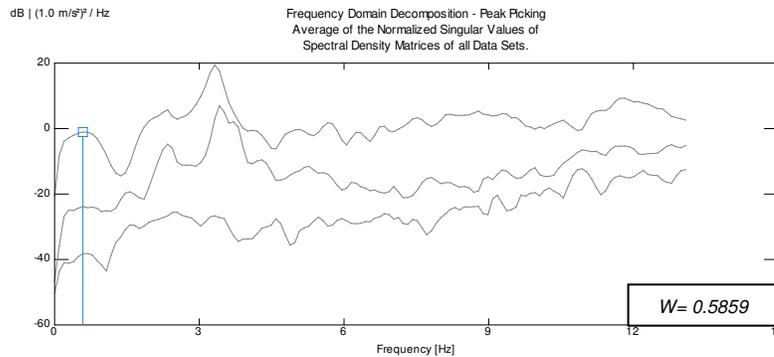


**Figura 6.8- Historia en el tiempo de las aceleraciones registradas en la dirección vertical.**

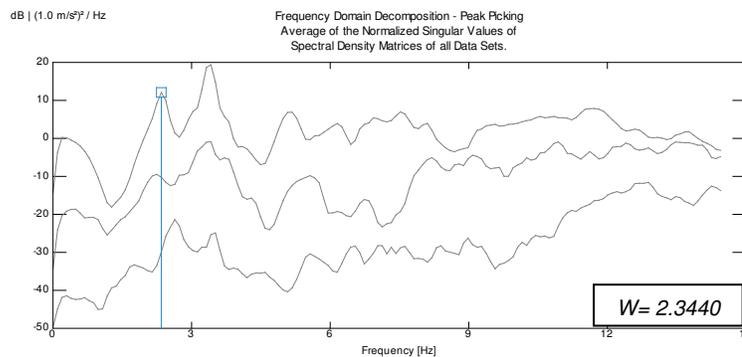


## 6.2- Obtención de las propiedades dinámicas del puente Km 463-464 con el software ARTeMIS.

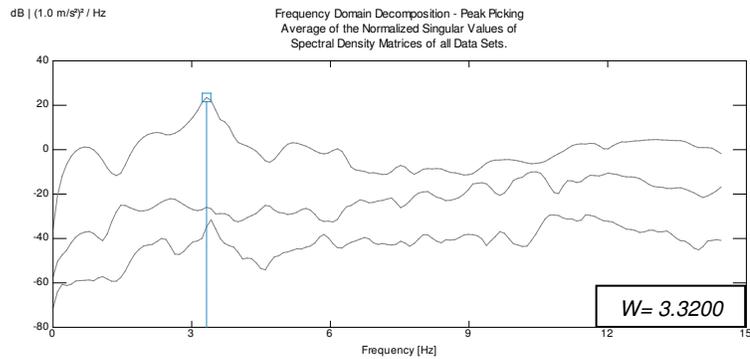
Nuevamente, las siguientes figuras muestran los resultados de la selección de las frecuencias de vibrar obtenidas mediante el proceso numérico realizado por el programa Artemis.



### ***Frecuencia natural longitudinal Puente Km 463-464***



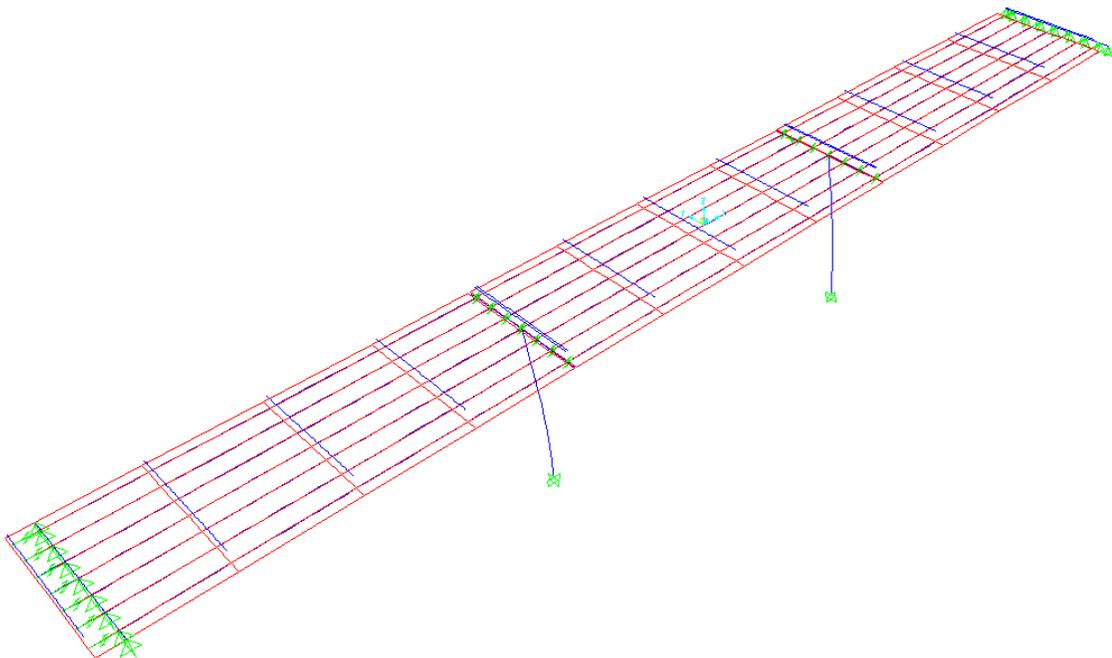
### ***Frecuencia natural transversal Puente Km 463-464***



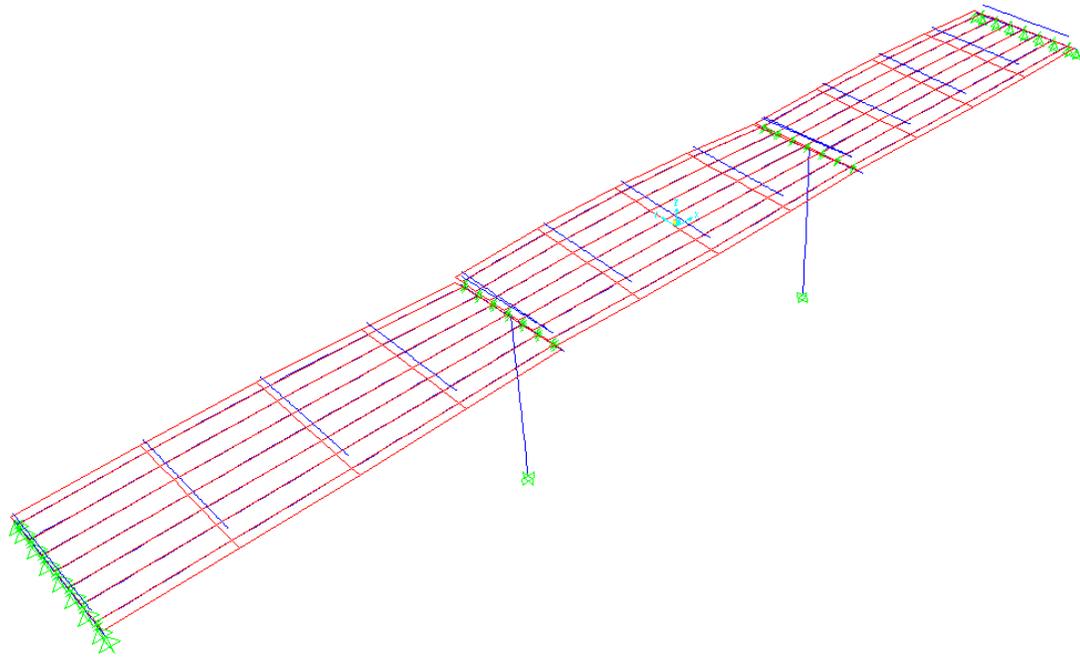
**Frecuencia natural vertical Puente Km 463-464**

**Figura 6.9- Frecuencias obtenidas del software ARTEMIS, Puente km 463-464.**

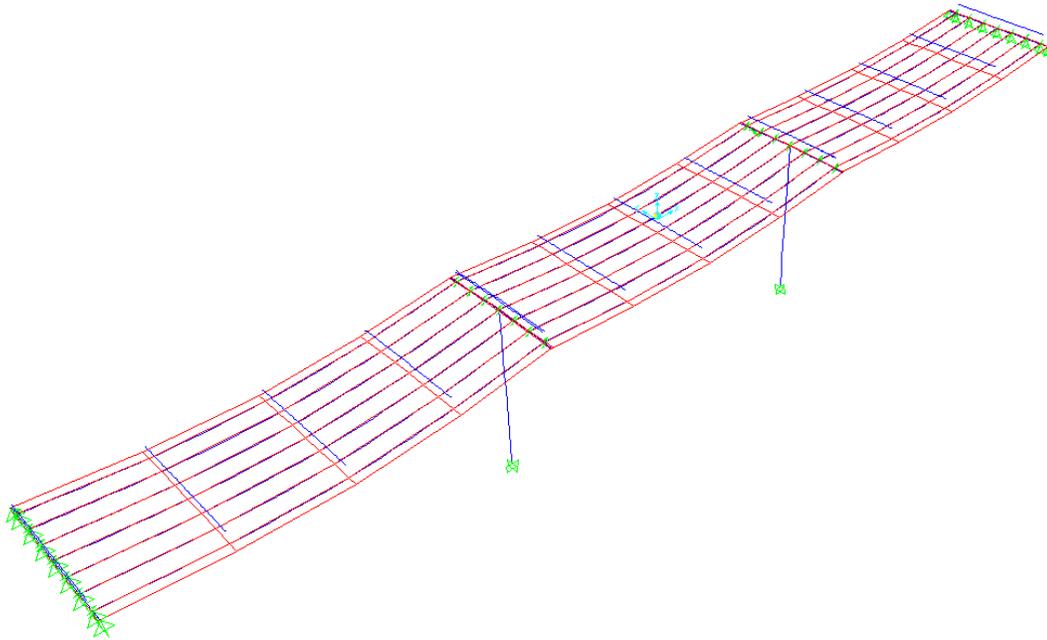
**6.2.1- Características dinámicas del modelo analítico del Puente Km 463-464.**



**Primer modo longitudinal  $T= 2.8649$  seg**



**Segundo modo transversal  $T= 0.5999$  seg**



**Tercer modo vertical  $T= 0.3724$  seg**

**Figura 6.10- Formas modales y periodos del modelo analítico desarrollado en el programa SAP2000-14, Puente Km 463-464.**



Los resultados obtenidos del programa analítico SAP2000-14 y el software ARTeMIS se encuentran resumidos en la tabla 6.2.

Se puede ver claramente que las frecuencias identificadas en el ARTeMIS comparadas con las obtenidas en el modelo analítico desarrollado en el programa SAP2000-14 varían un poco en la dirección X y Y, mientras que en la dirección Z es el mismo valor.

**Tabla 6.2- Resumen de resultados.**

<b>PUENTE KM 463-464</b>			
	<b>SAP (T)</b>	<b>FRECUENCIA (Hz)</b>	<b>ARTeMIS (T)</b>
<b>X</b>	2.8649	0.5859	1.7067
<b>Y</b>	0.5999	2.3440	0.4266
<b>Z</b>	0.3724	3.3200	0.30120



## 7- Conclusión

Para la obtención de las propiedades dinámicas de los puentes en estudio fue necesario involucrar los parámetros físicos con el objetivo de obtener una mejor correlación entre la prueba y el modelo analítico.

Los resultados obtenidos de el modelo analítico de elementos finitos desarrollados en el programa SAP2000-14 en comparación con es software ARTeMIS Extractor 3.4, fueron exactamente los mismos en la dirección Z para ambos puentes, mientras que para las direcciones X y Y variaron un poco.

Para poder llegar a estos resultados fue necesaria la modificación iterativa de las rigideces de los apoyos dentro del modelo analítico tratando de calibrarlo con los datos reales que se representan en las graficas de los conjuntos de datos que de las aceleraciones que se tenían dentro del software ARTeMIS.

Los resultados mostraron que debe estudiarse con mayor detenimiento ambos modelos (analítico y experimental) para entender y justificar adecuadamente las diferencias apreciables obtenidas entre los modos de vibrar comentados.



## 8- Bibliografía y referencias

Crespo, C. (2008), Vías de Comunicación: caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos, Limusa, 4ta Edición.

Bazán, E y Meli, R. (2001), Diseño Sísmico de Edificios, Limusa.

Olmos, B. A, Stubbs, N, Roesset, J. M. Identificación de las Propiedades Dinámicas de un Puente Peatonal en la Ciudad de México Usando la Técnica de Descomposición en el Dominio del Tiempo, XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural.

Paz, M. (2002), Dinámica Estructural, Teoría y cálculo, Editorial Reverté.

Madrigal, E. (2009), Capacidad y Demanda Sísmica del Puente Infiernillo II, Tesis, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia Michoacán México.

Guerrero, V. (2009), Tiempo atrás Puentes de concreto de México.

Ortiz, O., Patrón, A., Reyes, E., Robles, V., Ruiz-Sandoval, M.E. y Cremona, E. (¿??????), Evaluación de la Capacidad de Carga del Puente Antonio Aovalí Jaime, Mediante el Uso de Pruebas de Carga Estáticas y Dinámicas.

PuenteenvoladizoMedway,Inglaterra:<http://www.google.com/images?um=1&hl=es&q=Puente+medway&ie=UTF8&source=og&sa=N&tab=wi&biw=1259&bih=615>

Puente tipo viga:<http://www.miliarium.com/monografias/Puentes/TiposPuentes.asp>

Puenteenarco,JardínBotánico,ViñadelMar,Chile<http://www.google.com/images?um=1&hl=es&biw=1259&bih=615&tbs=isch%3A1&sa=1&q=puente+en+arco&aq=f&aqi=&aql=&oq=>



Puente atirantado: <http://www.anippac.org.mx/capitulo09.pdf>

Puentecolgante(SanFranciscoGoldenGate):[://guiasviajar.com/estadosunidos/california/san-francisco-golden-gate-puente-colgante-sobre-bahia/](http://guiasviajar.com/estadosunidos/california/san-francisco-golden-gate-puente-colgante-sobre-bahia/)

Puentemovil:[http://www.google.com/images?um=1&hl=es&biw=1021&bih=492&tbs=isch %3A1&sa=1&q=puente+newcastle&aq=f&aqi=&aql=&oq=](http://www.google.com/images?um=1&hl=es&biw=1021&bih=492&tbs=isch%3A1&sa=1&q=puente+newcastle&aq=f&aqi=&aql=&oq=)

[http://es.wikipedia.org/wiki/Puente#Por\\_su\\_uso.](http://es.wikipedia.org/wiki/Puente#Por_su_uso)

<http://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/09/concreto-presforzado.pdf>

AcueductodeQuerétaro:<http://www.google.com/#sclient=psy&hl=es&q=acueducto+de+queretaro&aq=f&aqi=g5&aql=&oq=&psj=1&fp=c846dafa647a4692>

<http://www.buenastareas.com/ensayos/Situacion-Alcutual-De-Las-Carreteras-En/1285040.html>

<http://www.imcyc.com/ct2009/feb09/recuento.htm>

<http://www.arqhys.com/construccion/vigas-de-concreto.html>

<http://ingenieria-civil2009.blogspot.com/2009/07/partes-constructivas-de-un-puente.html>

[http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar\\_2010/Topico%204/CINPAR%20044.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar_2010/Topico%204/CINPAR%20044.pdf)

<http://www.construaprende.com/tesis02/2006/09/11-historia-de-los-puentes.html>

<http://ecotecnia.org/dimensio/concreto/concreto.htm>

<http://cienciapc.idict.cu/index.php/cienciapc/article/view/25/80>(contiene el necesario para la introducción de la tesis)