



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**COMPORTAMIENTO DE UN TRAMO ELEVADO DE LA
LÍNEA 5 DEL METRO DURANTE EL SISMO DEL 27/02/2010**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CARLOS ROBERTO NEIRA SEPÚLVEDA

PROFESOR(A) GUÍA:
MARÍA OFELIA MORONI YADLIN

PROFESOR CO-GUÍA:
MAURICIO SARRAZÍN A.

PROFESOR INTEGRANTE:
AUGUSTO LUCERO A.

SANTIAGO DE CHILE
OCTUBRE 2011

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | | |
|-------------|--|----|
| CAPÍTULO 1: | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 | Introducción | 1 |
| 1.2 | Objetivos..... | 3 |
| 1.2.1 | Objetivo General..... | 3 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 3 |
| 1.3 | Estructura del trabajo | 3 |
| CAPÍTULO 2: | CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA..... | 5 |
| 2.1 | Antecedentes de la estructura en estudio | 5 |
| 2.1.1 | Propiedades de la estructura | 5 |
| 2.1.2 | Propiedades de los materiales..... | 8 |
| 2.1.3 | Propiedades del sistema de aislación..... | 9 |
| 2.1.4 | Modelación del suelo de fundación | 14 |
| 2.1.5 | Sistema de instrumentación | 16 |
| CAPÍTULO 3: | ANÁLISIS DE REGISTROS SÍMICOS..... | 18 |
| 3.1 | Estudio de aceleraciones máximas..... | 18 |
| 3.2 | Determinación de las propiedades dinámicas de la estructura..... | 29 |
| 3.2.1 | Análisis del sismo del 27/02/10 | 30 |
| 3.2.2 | Comentarios | 39 |
| CAPÍTULO 4: | DESARROLLO DEL MODELO | 42 |
| 4.1 | Deformaciones máximas del sistema de aislación | 42 |
| 4.2 | Modelo de la estructura | 43 |
| 4.2.1 | Criterios de Modelación | 44 |
| 4.2.2 | Criterios de Ajuste | 47 |
| 4.3 | Ajuste de las frecuencias modales | 49 |
| 4.3.1 | Ajuste propiedades del suelo..... | 50 |
| 4.3.2 | Ajuste propiedades de los aisladores..... | 53 |
| 4.3.3 | Ajuste de la longitud de las fundaciones estación | 57 |
| 4.3.4 | Ajuste de las propiedades del hormigón de la estructura | 61 |

| | | |
|-------------|---|----|
| 4.3.5 | Ajuste amortiguamiento modal de la estructura | 64 |
| 4.3.6 | Comentarios..... | 71 |
| CAPÍTULO 5: | CONCLUSIONES..... | 72 |
| REFERENCIAS | | 76 |
| ANEXOS | | 77 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Sección viga-losa viaducto (cm)..... | 6 |
| Figura 2.2 Sección columna interestación (cm)..... | 6 |
| Figura 2.3 Sección columna estación (cm). | 6 |
| Figura 2.4 Sección fundación (cm)..... | 7 |
| Figura 2.5 Detalle placa de neopreno reforzada (mm). | 9 |
| Figura 2.6 Curva G Promedio v/s deformación de goma de neopreno. | 11 |
| Figura 2.7 Curva B Promedio v/s deformación de goma de neopreno. | 11 |
| Figura 2.8 Curva ajuste G promedio. | 12 |
| Figura 2.9 Relación Fuerza Deformación para apoyo de neopreno. | 12 |
| Figura 2.10 Detalle ubicación sensores. | 17 |
| Figura 3.1 Relación de aceleraciones máximas longitudinales. | 20 |
| Figura 3.2 Relación de aceleraciones máximas transversales. | 21 |
| Figura 3.3 Relación de aceleraciones máximas verticales. | 21 |
| Figura 3.4 Registros de aceleración dirección longitudinal. | 23 |
| Figura 3.5 Registros de aceleración dirección transversal. | 24 |
| Figura 3.6 Registros de aceleración dirección vertical. | 25 |
| Figura 3.7 Registros de desplazamiento dirección longitudinal. | 26 |
| Figura 3.8 Registros de desplazamiento dirección transversal. | 27 |
| Figura 3.9 Registros de desplazamiento dirección vertical. | 28 |
| Figura 4.1 Modelo MDOF. | 44 |
| Figura 4.2 Secciones modelo. | 46 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1 Resultados probetas de neopreno..... | 10 |
| Tabla 2.2 Parámetros de los aisladores..... | 13 |
| Tabla 2.3 Rigidez vertical y giro..... | 15 |
| Tabla 2.4 Rigidez horizontal..... | 15 |
| Tabla 2.5 Ubicación de equipos..... | 17 |
| Tabla 3.1 Valores extremos de aceleración, registros sísmicos..... | 18 |
| Tabla 3.2 Razón de aceleraciones máximas para registros sísmicos..... | 19 |
| Tabla 3.3 Frecuencias modales sismo 27/02/10..... | 41 |
| Tabla 3.4 Frecuencias modales microvibraciones y sismos pequeños..... | 41 |
| Tabla 4.1 Deformación de los aisladores..... | 43 |
| Tabla 4.2 Propiedades secciones modelo..... | 47 |
| Tabla 4.3 Frecuencias modelo..... | 49 |
| Tabla 4.4 Frecuencias modelo empotrado en la base de las fundaciones..... | 51 |
| Tabla 4.5 Frecuencias modelo empotrado en la base de las columnas..... | 51 |
| Tabla 4.6 Frecuencias modelo con amplificación de rigidez horizontal del suelo..... | 52 |
| Tabla 4.7 Rangos de deformación de los apoyos de neopreno..... | 53 |
| Tabla 4.8 Rigidez horizontal ajuste de los aisladores..... | 54 |
| Tabla 4.9 Frecuencias modelo con variación propiedades del aislador..... | 54 |
| Tabla 4.10 Frecuencias modelo con variación de propiedades de aisladores y suelo..... | 56 |
| Tabla 4.11 Error de aceleraciones caso con resortes horizontales..... | 57 |
| Tabla 4.12 Error de aceleraciones caso con fundaciones empotradas..... | 58 |
| Tabla 4.13 Error de FFT al cuadrado caso con resortes horizontales..... | 58 |
| Tabla 4.14 Error de FFT al cuadrado caso con fundaciones empotradas..... | 59 |
| Tabla 4.15 Error de aceleraciones caso con resortes horizontales..... | 61 |
| Tabla 4.16 Error de aceleraciones caso con fundaciones empotradas..... | 62 |
| Tabla 4.17 Error de FFT al cuadrado caso con resortes horizontales..... | 62 |
| Tabla 4.18 Error de FFT al cuadrado caso con fundaciones empotradas..... | 63 |
| Tabla 4.19 Error de aceleraciones para diferentes amortiguamientos..... | 65 |
| Tabla 4.20 Error de FFT al cuadrado para diferentes amortiguamientos..... | 65 |
| Tabla 4.21 Error de aceleración con variación de amortiguamiento..... | 67 |
| Tabla 4.22 Error de FFT al cuadrado con variación de amortiguamiento..... | 69 |
| Tabla 4.23 Frecuencias modelo final..... | 71 |

RESUMEN

COMPORTAMIENTO DE UN TRAMO ELEVADO DE LA LÍNEA 5 DEL METRO DURANTE EL SISMO DEL 27/02/2010

Este trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de un tramo elevado de la línea 5 del Metro de Santiago durante el sismo del 27/02/2010. En dicho tramo, existe una red de acelerómetros de 12 sensores, que registró dicho sismo, que es el de mayor magnitud que ha afectado a la estructura.

La estructuración del tramo es tipo viaducto. Cuenta con un sistema de aislación consistente en placas de neopreno reforzadas, apoyadas sobre capiteles de hormigón postensado soportados por pilares tipo cajón. Sobre las placas de neopreno, se apoyan vigas de hormigón pre y postensado que soportan la losa de hormigón postensado del viaducto.

Este estudio comprende un análisis de los registros obtenidos para el sismo del 27/02/2010, tanto en el espacio del tiempo, como en el espacio de las frecuencias. Se comparan las aceleraciones máximas en campo libre, cepa y superestructura; y se determinan desplazamientos por doble integración de los registros en el tiempo.

Del análisis de aceleraciones máximas se desprende que en dirección longitudinal, sobre el tablero la aceleración es menor que en la cepa y en las direcciones transversal y vertical son mayores. Además, existe amplificación de las aceleraciones en el tope de la columna, respecto a la base de ésta, en ambas direcciones horizontales. En dirección transversal, es notorio el cambio de frecuencias predominantes entre la viga y la cepa.

A través de un análisis espectral, se identifican tres modos en la dirección longitudinal: 1,36 Hz, 2,47 Hz y 6,96 Hz; tres modos en la dirección transversal: 1,25 Hz, 3,03 Hz y 6,76 Hz; y dos modos en la dirección vertical: 5,04 Hz y 7,21 Hz.

Además, se calibra un modelo computacional considerando comportamiento no lineal, de manera que reproduzca la respuesta real de la estructura durante el evento sísmico mencionado. Esto se realiza variando la rigidez de los resortes horizontales que modelan el suelo, la rigidez de los apoyos de neopreno, la rigidez del hormigón de la estructura, y el amortiguamiento modal de la estructura.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Carlos y Magdalena, por su gran apoyo a lo largo de mi vida, especialmente en esta etapa donde finalizo la vida universitaria. Agradezco además, el gran esfuerzo que han hecho para que mi hermano y yo lleguemos a buen puerto.

También quiero agradecer a mis compañeros y amigos que me apoyaron en la vida universitaria, y con los cuales compartí grandes momentos.

No quiero dejar de mencionar a Margarita, a quien le agradezco su ayuda y compañía en esta etapa.

Finalmente agradezco a los profesores María Ofelia Moroni, Mauricio Sarrazín y Augusto Lucero, por su tiempo, ayuda y dedicación a lo largo de este trabajo.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Chile está situado en una de las zonas con más actividad sísmica del mundo, lo que implica un alto riesgo sísmico para las estructuras de nuestro país. Por esta razón el diseño sísmo resistente toma gran relevancia, el que está basado principalmente en resistir la demanda sísmica.

En las últimas décadas ha surgido un nuevo concepto, el cual es tratar de reducir la demanda sísmica de las superestructuras, de modo que se comporten elásticamente ante sollicitaciones sísmicas de larga duración, salvo una interfaz que disipa la energía sísmica y evita que ésta pase a la superestructura.

Dicho concepto, denominado “aislación sísmica”, se ha vuelto prácticamente realidad en el último tiempo, con el desarrollo de diversos mecanismos aislantes como placas de neopreno o goma reforzada y péndulos de fricción, entre otros.

El año 1997, se inauguró la línea 5 del Metro. Este proyecto incluía en su recorrido varios tramos de vía elevada, siendo la primera estructura de este tipo construida en Chile.

Con el fin de conocer el comportamiento de los tramos elevados del Metro ante sollicitaciones sísmicas de diversa intensidad, se instaló en un tramo cercano a la estación Mirador de la línea 5 del Metro, una red local de acelerómetros, que permite obtener registros de aceleración en forma continua.

El sistema de instrumentación fue instalado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, en acuerdo con la gerencia de Metro.

La estructuración del tramo instrumentado es tipo viaducto, con vigas de hormigón pre y postensado que soportan la losa de hormigón postensado, apoyadas en pilares centrados tipo

cajón, separados una distancia del orden de 36 m. El sistema de aislación con que cuenta la estructura, consiste en placas de neopreno reforzadas apoyadas sobre capiteles de hormigón postensado soportados por pilares tipo cajón.

En este trabajo se analizan los registros de aceleración obtenidos durante el sismo del 27 de febrero de 2010, que es el de mayor intensidad registrado a la fecha, y cuya magnitud fue 8.8 en la escala Richter.

Además, se desarrolla un modelo matemático basado en dos estudios realizados con anterioridad, que corresponden a dos modelos numéricos del tramo instrumentado y calibrados en base a registros sísmicos de menor intensidad. El primer modelo corresponde al desarrollado por Valdebenito (1999), que consideraba un comportamiento lineal de la estructura. Sin embargo debido al sistema de aislación con que cuenta la estructura, el comportamiento es altamente no lineal, por lo que Quintana (2001) desarrolló un segundo modelo incorporando elementos no lineales en los apoyos.

En este trabajo, se consideran como posibles mejoras a los modelos desarrollados anteriormente, la influencia de tramos vecinos al tramo instrumentado, interacción suelo estructura, nivel de empotramiento de la estructura, y disipación de energía de los apoyos de neopreno.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estudiar el comportamiento sísmico de la estructura durante el terremoto del 27 de febrero de 2010.

1.2.2 Objetivos Específicos

Actualizar la base de datos de sismos registrados en la red de acelerómetros.

Determinar las propiedades dinámicas de la estructura a partir de los registros del sismo del 27/02/2010.

Generar un modelo tridimensional de la estructura utilizando el programa SAP, y calibrarlo utilizando los registros sísmicos obtenidos en esa fecha.

Comparar la respuesta real de la estructura con la respuesta teórica del modelo generado.

1.3 Estructura del trabajo

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el tema de memoria, así como los objetivos generales y específicos. Además, se incluye la metodología de trabajo para cada etapa del estudio, y la estructura del trabajo.

Capítulo 2: CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA

En este capítulo se describen las características de la estructura, sus propiedades geométricas y mecánicas. También, se describe el sistema de aislación de la estructura así como la disposición de la red local de acelerómetros.

Capítulo 3: ANÁLISIS DE REGISTROS SÍSMICOS

Se analizan los registros sísmicos obtenidos a la fecha, determinando las aceleraciones máximas. Se determinan las propiedades dinámicas de la estructura basándose en los registros del sismo del 27/02/2010.

Capítulo 4: DESARROLLO Y AJUSTE DEL MODELO

Se desarrolla el modelo no lineal de la estructura, basado en modelos anteriores, incorporando la no linealidad de los apoyos de neopreno. Además, se calibra el modelo, ajustando la rigidez de los apoyos y el amortiguamiento de la estructura, tomando como base el sismo del 27/02/2010.

Capítulo 5: CONCLUSIONES

Se entregan las conclusiones del estudio de la estructura, al comparar la respuesta del modelo con la respuesta real.

CAPÍTULO 2: CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA

2.1 Antecedentes de la estructura en estudio

La línea 5 del metro fue inaugurada el año 1997, y su recorrido era desde Bellavista de la Florida hasta Baquedano, incluyendo en dicho recorrido, un tramo de vía elevada que fue el primero de este tipo proyectado en Chile.

El tramo elevado es tipo viaducto y tiene una longitud de 5810 m. Las estaciones que lo conforman son: Rodrigo de Araya, Carlos Valdovinos, Camino Agrícola, San Joaquín, Pedreros y Mirador.

La información estructural del tramo instrumentado, se obtuvo de los trabajos realizados anteriormente (ref. 1) y (ref. 2). Esto incluye las propiedades físicas y mecánicas de la estructura.

2.1.1 Propiedades de la estructura

La estructuración del viaducto es con losas de hormigón hechas in situ, postensadas longitudinal y transversalmente, de 30 cm de espesor, largos variables de 27 a 36 metros y anchos variables de 6,3 a 7,5 metros. Las losas están soportadas por vigas de hormigón prefabricadas, pre y postensadas, de 1,8 metros de altura, que se unen a la losa por su talón inferior.

La figura 2.1 muestra una sección transversal del sistema viga-losa del viaducto.

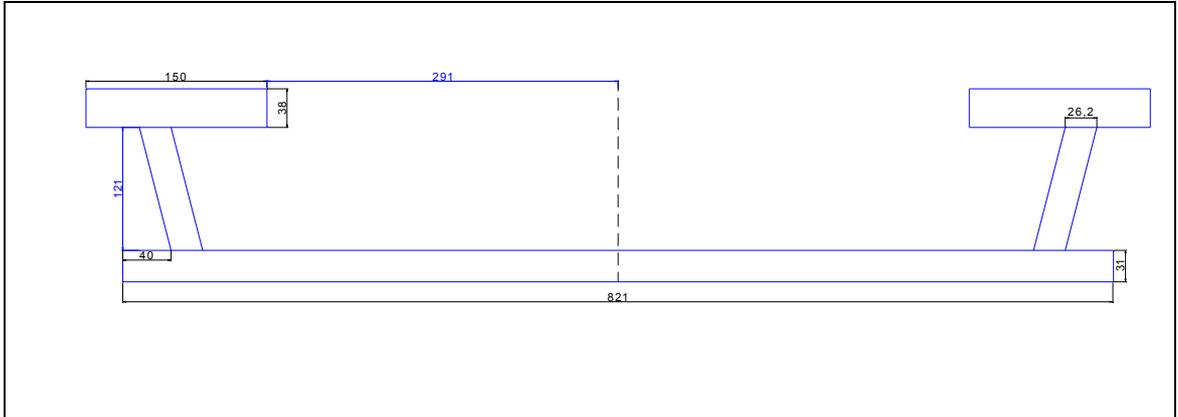


Figura 2.1 Sección viga-losa viaducto (cm).

Las vigas están simplemente apoyadas a través de placas de neopreno reforzadas, en los extremos de capiteles de hormigón postensado, apoyados sobre una columna central hueca de hormigón armado de sección rectangular y pared de espesor 30 cm.

Las columnas, de 8 m. de alto, tienen dos secciones típicas, una para las columnas interestación y otra para las columnas estación. Estas secciones se muestran en las figuras 2.2 y 2.3 respectivamente.

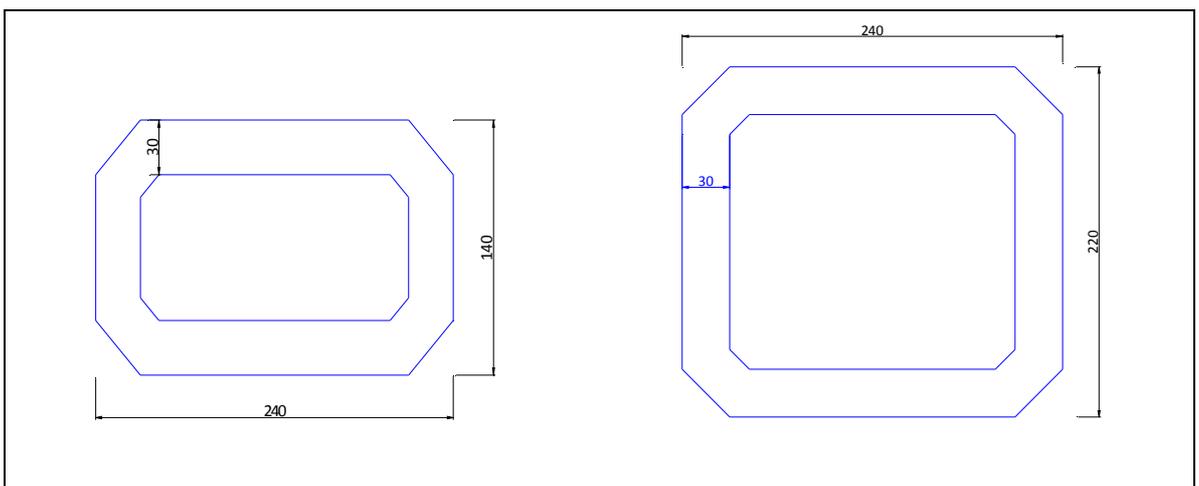


Figura 2.2 Sección columna interestación (cm).

Figura 2.3 Sección columna estación (cm).

Por otra parte, las columnas se conectan monolíticamente a las fundaciones de hormigón armado, las cuales son secciones cuadradas huecas de espesor de 50 cm. y longitud variable entre 7 y 12 metros, con macizo superior de 150 cm. de altura, macizo inferior de 100 cm. de altura y relleno interior de material de excavación compactado. La figura 2.4 muestra la sección de las fundaciones.

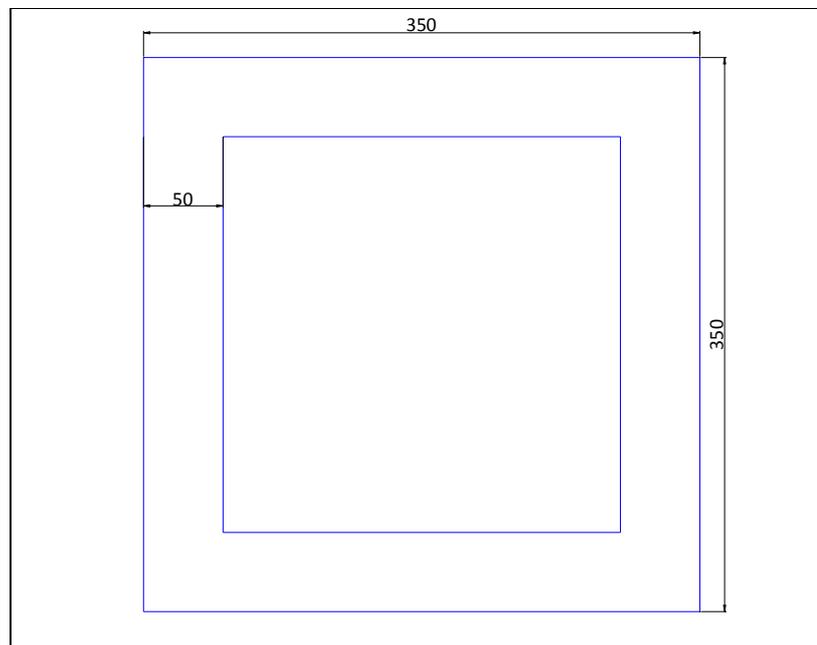


Figura 2.4 Sección fundación (cm).

Finalmente, el suelo de fundación corresponde al típico ripio de Santiago, cuyas propiedades mecánicas son: Peso unitario de $2,25 \text{ Ton/m}^3$, ángulo de fricción interna de 45° y Cohesión de $1,5 \text{ Ton/m}^2$.

2.1.2 Propiedades de los materiales

A continuación se detallan las características físicas de los materiales utilizados en la estructura.

- Hormigón armado:

$R_{28} = 30$ MPa con 95 % nivel de confianza.

A emplear en columnas y fundaciones.

- Hormigón no armado:

$R_{28} = 15$ MPa con 90 % nivel de confianza.

A emplear en rellenos.

- Hormigón Pretensado y Postensado:

$R_{28} = 42$ MPa con 95 % nivel de confianza.

A emplear en vigas prefabricadas, losas entre vigas y capiteles.

- Acero para hormigón armado:

A63-42.

- Acero para armaduras pasivas de hormigón pre y postensado:

A63-42.

2.1.3 Propiedades del sistema de aislación

El sistema de aislación de la estructura está conformado por placas de neopreno reforzadas que se encuentran en los extremos de cada capitel, y sirven de apoyo al sistema viga-losa.

En la figura 2.5 se muestra el detalle de las placas de neopreno utilizadas en la estructura.

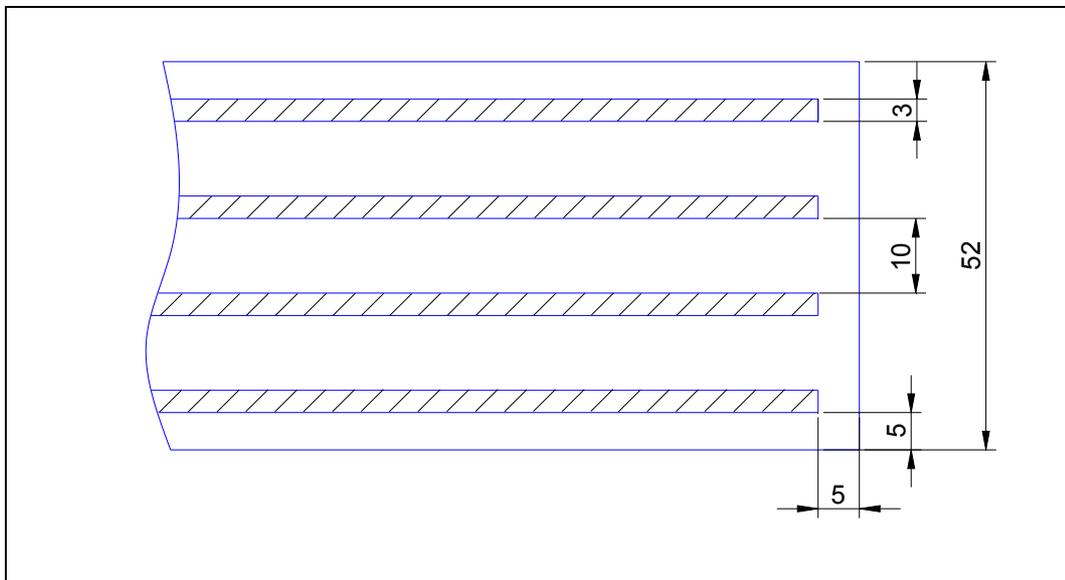


Figura 2.5 Detalle placa de neopreno reforzada (mm).

Para determinar los parámetros que caracterizan los aisladores de la estructura, se utiliza una serie de ensayos sobre probetas de neopreno (ref. 1), realizados por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, de los cuales se obtuvieron curvas que relacionan el módulo de corte (G) promedio con la deformación de las probetas.

Con estos ensayos, es posible determinar mediante una regresión lineal, una función de ajuste $G=f(\text{def})$, de la cual es posible generar una curva fuerza – deformación efectiva para los aisladores, y determinar de esta manera los parámetros necesarios para el modelo computacional del capítulo 4: rigidez inicial (k_1), rigidez post fluencia (k_2) y fuerza de fluencia (F_y).

Los resultados de los ensayos realizados se muestran a continuación.

Fecha ensayo : 24-01-1996
 Tipo carga : Seno
 N° probetas : 4
 Frecuencia de carga : 1 Hz probetas 1,2,3; 2 Hz para probeta 4

Tabla 2.1 Resultados probetas de neopreno.

| Deformación (mm/mm) | G Promedio (Kg/cm/cm) | | | | B Promedio (%) | | | |
|------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0,05 | 21,69 | 23,12 | 21,81 | 19,79 | 11,61 | 11,81 | 11,28 | 12,92 |
| 0,10 | 18,38 | 20,40 | 18,62 | 16,87 | 9,89 | 9,69 | 9,66 | 11,12 |
| 0,20 | 15,15 | 16,84 | 15,57 | 14,16 | 8,61 | 8,65 | 8,40 | 9,84 |
| 0,50 | 11,31 | 12,42 | 11,35 | 9,39 | 7,99 | 8,18 | 8,25 | 10,28 |
| 0,75 | 9,90 | 10,87 | 8,46 | | 7,89 | 8,05 | 8,73 | |
| 1,00 | 8,55 | 9,74 | | | 7,99 | 8,02 | | |

De la tabla anterior se obtienen las curvas Fuerza- deformación de los apoyos de neopreno.

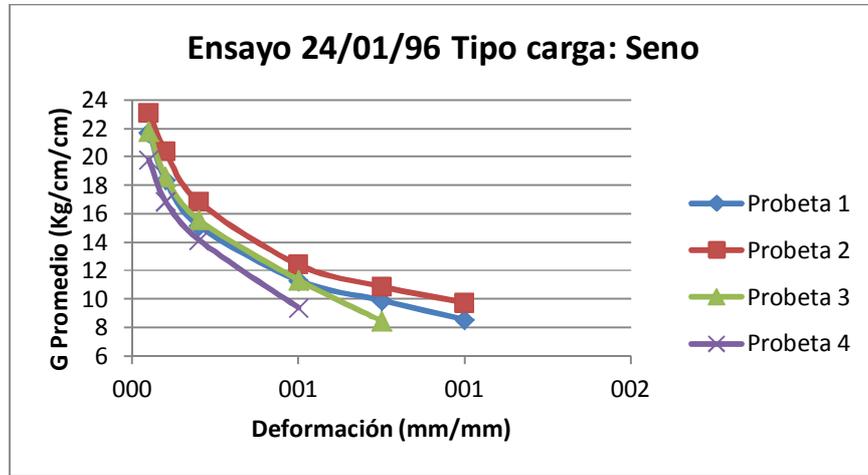


Figura 2.6 Curva G Promedio v/s deformación de goma de neopreno.

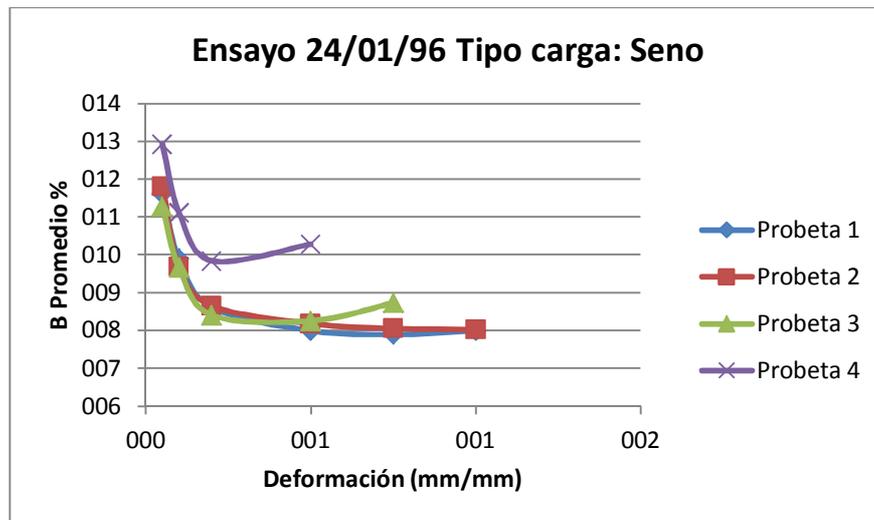


Figura 2.7 Curva B Promedio v/s deformación de goma de neopreno.

La función de ajuste obtenida es de la siguiente forma $G = a \times \gamma^b$.

En que: $a = 8,951$; $b = -0,306$; correlación 0,996. La curva de ajuste se muestra a continuación.

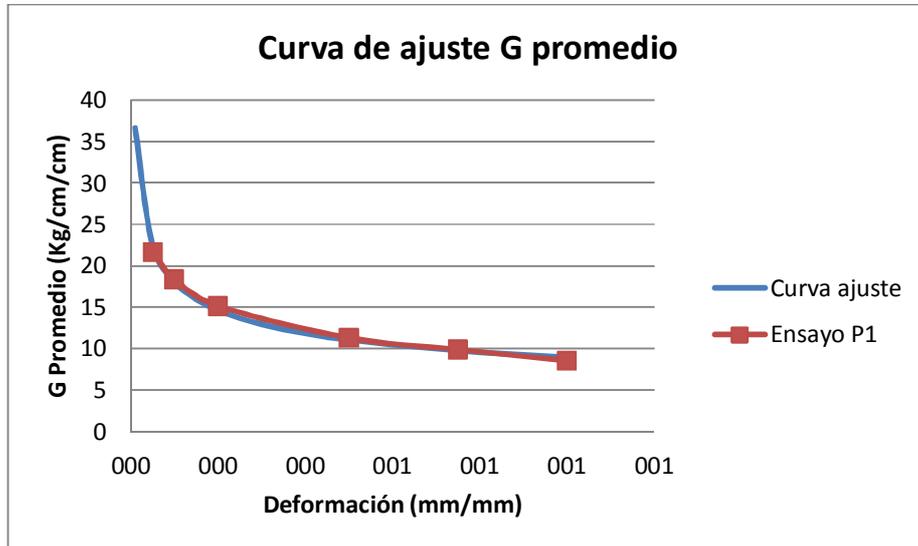


Figura 2.8 Curva ajuste G promedio.

A partir de la curva de ajuste G, y dado que $K = G \times A/H$ y $F = K \times d$, es posible determinar una curva Fuerza vs Deformación mediante la relación $F = a \times A \times \gamma^{b+1}$.

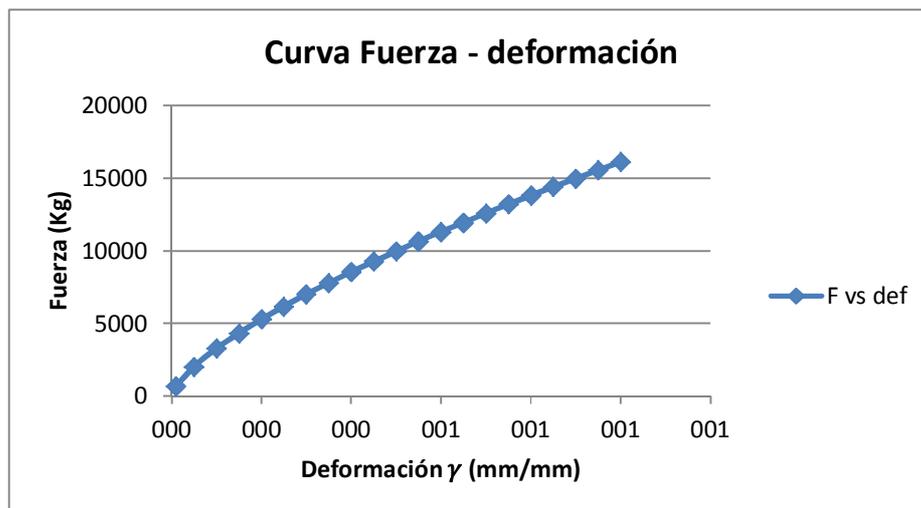


Figura 2.9 Relación Fuerza Deformación para apoyo de neopreno.

El procedimiento para determinar los parámetros característicos de los aisladores se encuentra en la referencia 2.

A continuación se detallan los valores obtenidos.

Tabla 2.2 Parámetros de los aisladores.

| | | | |
|--|----------|---------|---------------------|
| Área de la sección transversal del apoyo | (A) | 30 x60 | cm ² |
| Altura de la goma | (H) | 4 | Cm |
| Rigidez inicial | (k1) | 10580 | Kgf/cm |
| Rigidez Post fluencia | (k2) | 3326 | Kgf/cm |
| Fuerza de fluencia | (Fy) | 4439 | Kgf |
| Módulo de corte promedio | (*) (G) | 10,1146 | Kgf/cm ² |
| Módulo de elasticidad equivalente | (Ec) | 9857,61 | Kgf/cm ² |
| Rigidez vertical | (kv) | 4435922 | Kgf/cm |
| Rigidez horizontal | (*) (kh) | 4551,5 | Kgf/cm |
| Amortiguamiento efectivo | (keff) | 0,106 | - |
| Momento de Inercia en x | (Ixx) | 540000 | cm ⁴ |
| Momento de Inercia en y | (Ixx) | 135000 | cm ⁴ |
| Momento de Inercia en z | (Ixx) | 370786 | cm ⁴ |

Ec se calcula con G para 20% de deformación, lo que influye el valor de Kv.

(*) Parámetro que depende del nivel de deformación máximo de las placas 67% (2.683 cm), calculado para el sismo del 27/02/10.

2.1.4 Modelación del suelo de fundación

El suelo en torno a las cepas se modela como resortes horizontales elásticos, cuyas propiedades varían con la profundidad. En la base de las cepas se restringe el movimiento en la dirección vertical, y se incluye un resorte de giro en torno a esta dirección.

Se utilizan las propiedades determinadas en la fase de diseño de las fundaciones del viaducto (ver referencia 1), donde las deformaciones esperadas bajo la zapata de la estructura son de tipo elástica y se calculan mediante la siguiente ecuación, determinada por la mecánica de suelos.

$$E = 6500 \times \sqrt{z} \quad \text{T/m}^2, \text{ con } z \text{ en metros.}$$

A partir de la ecuación anterior, es posible determinar la ecuación para la constante de balasto vertical estática, en función de la profundidad (z).

$$Kv, est(z) = \frac{6500 \times \sqrt{z}}{0,7195 \times B} \quad \text{T/m}^3, \text{ con } B \text{ ancho de la zapata en metros.}$$

Finalmente se obtiene la ecuación que relaciona la constante de balaste estática con la dinámica.

$Kv, din(z) = 3,5 \times f \times Kv, est \quad \text{T/m}^3$, con f factor de forma (1,37 para fundación cuadrada).

Se supone la constante de balasto estática horizontal igual a la constante de balasto vertical, por lo que al calcular la constante dinámica, solo cambia el factor f (1 para forma rectangular).

2.1.4.1 Propiedades de los resortes

La rigidez de los resortes que modelan el suelo, se determinan de las siguientes ecuaciones:

$$kv(z) = Kv(z) \times Area_basal \quad \text{T/m, con Área basal } 12,25 \text{ m}^2.$$

$$kh(z) = Kh(z) \times 3,5 \times h \quad \text{T/m, con } h \text{ separación entre resortes.}$$

$$k\theta(z) = Kv(z) \times I \quad \text{Tm, con } I \text{ momento de inercia fundación} = 12,51 \text{ m}^4.$$

Los valores de los resortes que modelan el suelo se muestran en las tablas 2.3 y 2.4.

Tabla 2.3 Rigidez vertical y giro.

| z (m) | kv (T/cm) | k θ (T-m) |
|-------|-----------|------------------|
| 7 | 4011,118 | 40962520 |
| 8 | 4288,065 | 43790770 |

Tabla 2.4 Rigidez horizontal.

| z (h= 0,5 m) | kh (T/cm) |
|------------------|-----------|
| 0,0 | 0 |
| 0,5 | 111,7908 |
| 1,0 | 158,0961 |
| 1,5 | 193,6273 |
| 2,0 | 223,5816 |
| 2,5 | 249,9718 |
| 3,0 | 273,8304 |
| 3,5 | 295,7706 |
| 4,0 | 316,1921 |
| 4,5 | 335,3724 |
| 5,0 | 353,5135 |
| 5,5 | 370,7681 |
| 6,0 | 387,2547 |
| 6,5 | 403,0674 |
| 7,0 | 418,2828 |
| 7,5 | 432,9639 |
| 8,0 (h = 0,25 m) | 223,5816 |
| 7,0 (h = 0,25 m) | 209,1410 |

De la ecuación para determinar la rigidez horizontal, se tiene que ésta depende de la separación entre los resortes (h), que es de 0,5 m. en el modelo. Sin embargo, por criterios de modelación se considera una separación de 0,25 m. para calcular la rigidez horizontal en las fundaciones.

2.1.5 Sistema de instrumentación

El sistema de instrumentación con que cuenta la estructura, consiste en una red local de acelerómetros de fuerza balanceada para el registro de movimientos fuertes. Los sensores se encuentran ubicados al sur de la estación Mirador y el detalle de su ubicación se muestra en la tabla 2.2 y en la figura 2.6.

La red de sensores la constituyen tres sensores FBA-11 (Force Balance Accelerometer Kinematics), que constan de una masa asociada a un capacitor y un resorte muy sensible, pudiendo registrar movimientos unidimensionales. Además, tres sensores FBA-23 que registran movimientos tridimensionales y están compuestos por tres acelerómetros ortogonales. De esta manera se cuenta con 12 canales de registro, que se inician automáticamente cuando ocurre un sismo.

Los acelerómetros están conectados a una unidad de registro denominada K2, la cual se encuentra al interior de la estación Mirador.

Tabla 2.5 Ubicación de equipos.

| Canal | Tipo de Sensor | Ubicación | Dirección de Registro |
|-------|----------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | FBA-23 | Pozo | Norte-Sur |
| 2 | FBA-23 | Pozo | Vertical |
| 3 | FBA-23 | Pozo | Este-Oeste |
| 4 | FBA-23 | Viga, lado norte | Norte-Sur |
| 5 | FBA-23 | Viga, lado norte | Vertical |
| 6 | FBA-23 | Viga, lado norte | Este-Oeste |
| 7 | FBA-23 | Columna (norte) | Vertical |
| 8 | FBA-23 | Columna (norte) | Norte-Sur |
| 9 | FBA-23 | Columna (norte) | Este-Oeste |
| 10 | FBA-11 | Base columna (norte) | Este-Oeste |
| 11 | FBA-11 | Base columna (norte) | Norte-Sur |
| 12 | FBA-11 | Viga, lado sur | Este-Oeste |

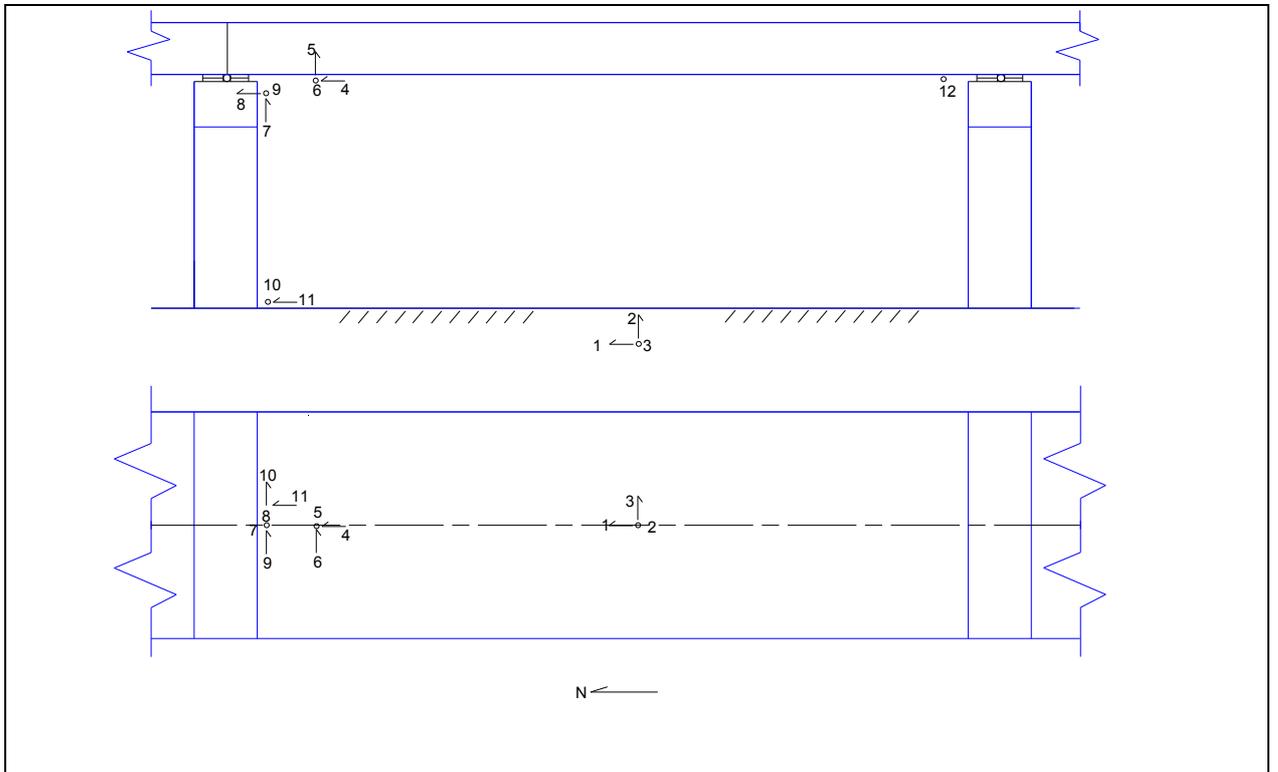


Figura 2.10 Detalle ubicación sensores.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE REGISTROS SÍMICOS

3.1 Estudio de aceleraciones máximas.

La tabla 3.1 presenta las aceleraciones máximas obtenidas a partir del registro del 27/02/2010 y réplicas posteriores. En negrita se muestran las aceleraciones correspondientes a los máximos en el campo libre y en la estructura.

Tabla 3.1 Valores extremos de aceleración, registros sísmicos.

| Aceleración (g) | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------|-----------|--------------|--------------|--------------|----------|------------|----------|--------------|--------------|------------|---------------|
| Ubicación | Pozo | | | Viga | | | Columna | | | Base Columna | | Viga lado Sur |
| | Dirección | Norte-Sur | Vertical | Este-Oeste | Norte-Sur | Vertical | Este-Oeste | Vertical | Norte-Sur | Este-Oeste | Este-Oeste | |
| Fecha/Canal | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 27/02/10 (1) | 0,236 | 0,13 | 0,165 | 0,377 | 0,309 | 0,554 | 0,165 | 0,378 | 0,476 | 0,212 | 0,226 | 0,651 |
| 27/02/10 (2) | 0,012 | 0,008 | 0,014 | 0,029 | 0,012 | 0,017 | 0,008 | 0,022 | 0,017 | 0,015 | 0,011 | 0,021 |
| 27/02/10 (3) | 0,005 | 0,004 | 0,008 | 0,007 | 0,006 | 0,008 | 0,003 | 0,009 | 0,01 | 0,005 | 0,004 | 0,007 |
| 28/02/10 | 0,015 | 0,009 | 0,015 | 0,021 | 0,015 | 0,019 | 0,008 | 0,016 | 0,021 | 0,014 | 0,014 | 0,032 |
| 11/03/10 (5) | 0,026 | 0,013 | 0,022 | 0,051 | 0,026 | 0,025 | 0,018 | 0,033 | 0,03 | 0,022 | 0,023 | 0,034 |
| 11/03/10 (6) | 0,018 | 0,011 | 0,020 | 0,049 | 0,018 | 0,029 | 0,014 | 0,029 | 0,029 | 0,02 | 0,019 | 0,037 |
| 29/03/10 | 0,004 | 0,003 | 0,007 | 0,011 | 0,006 | 0,011 | 0,003 | 0,007 | 0,007 | 0,006 | 0,004 | 0,015 |
| 04/04/10 | 0,031 | 0,015 | 0,031 | 0,022 | 0,02 | 0,015 | 0,017 | 0,028 | 0,039 | 0,028 | 0,025 | 0,016 |
| 02/05/10 | 0,004 | 0,004 | 0,006 | 0,012 | 0,019 | 0,010 | 0,004 | 0,009 | 0,010 | 0,006 | 0,005 | 0,011 |

Se observa que las aceleraciones de las réplicas del sismo del 27/02/10 son despreciables respecto a las del propio sismo. Además, los valores máximos de aceleraciones en el pozo de la estructura, para el sismo en estudio, son cercanos a los valores obtenidos en otras estructuras de la capital, como el edificio de Andalucía y el edificio de La Cámara Chilena de la Construcción.

Se observa, tanto para el sismo como para las réplicas, que las aceleraciones máximas en la vertical son menores que las aceleraciones horizontales, excepto para algunos casos de la viga.

Con el fin de visualizar el nivel de amplificación del movimiento entre: campo libre y base de la columna (sensores 11/1 y 10/3), base y extremo superior de la columna (sensores 8/11 y 9/10), extremo superior de la columna y viga (sensores 4/8, 6/9, 5/7 y 12/9); se muestran en la tabla 3.2 las razones entre las aceleraciones máximas de los sensores mencionados anteriormente, para el sismo principal del 27/02/10 y sus réplicas.

Tabla 3.2 Razón de aceleraciones máximas para registros sísmicos.

| Razón de aceleraciones máximas | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Fecha / Par de sensores | a11/a1 | a10/a3 | a8/a11 | a9/a10 | a7/a2 | a4/a8 | a6/a9 | a5/a7 | a12/a9 |
| 27/02/10 (1) | 0,96 | 1,28 | 1,67 | 2,25 | 1,27 | 1,00 | 1,16 | 1,87 | 1,37 |
| 27/02/10 (2) | 0,92 | 1,07 | 2,00 | 1,13 | 1,00 | 1,32 | 1,00 | 1,50 | 1,24 |
| 27/02/10 (3) | 0,80 | 0,63 | 2,25 | 2,00 | 0,75 | 0,78 | 0,80 | 2,00 | 0,70 |
| 28/02/10 | 0,93 | 0,93 | 1,14 | 1,50 | 0,89 | 1,31 | 0,90 | 1,88 | 1,52 |
| 11/03/10 (5) | 0,88 | 1,00 | 1,43 | 1,36 | 1,38 | 1,55 | 0,83 | 1,44 | 1,13 |
| 11/03/10 (6) | 1,06 | 1,00 | 1,53 | 1,45 | 1,27 | 1,69 | 1,00 | 1,29 | 1,28 |
| 29/03/10 | 1,00 | 0,86 | 1,75 | 1,17 | 1,00 | 1,57 | 1,57 | 2,00 | 2,14 |
| 04/04/10 | 0,81 | 0,90 | 1,12 | 1,39 | 1,13 | 0,79 | 0,38 | 1,18 | 0,41 |
| 02/05/10 | 1,25 | 1,00 | 1,80 | 1,67 | 1,00 | 1,33 | 1,00 | 4,75 | 1,10 |

En la dirección longitudinal (a4/a8), se observa una amplificación de las aceleraciones en la viga para pequeñas aceleraciones (< 0,05 g), pero para el sismo del 27/02 /10 el factor de amplificación es prácticamente igual a uno, por lo que no existe amplificación entre la viga y la cepa, para eventos importantes.

En la dirección transversal (a6/a9), al contrario que en la dirección longitudinal, se observa en general para pequeñas aceleraciones (< 0,05 g) una disminución de las aceleraciones en la viga. Para el sismo principal se observa una leve amplificación de las aceleraciones.

En la cepa hay amplificación en ambas direcciones horizontales (a_8/a_{11} y a_9/a_{10}).

En la dirección vertical (a_5/a_7) se observa que el factor de amplificación de las aceleraciones en la viga es mayor que uno, tanto para las réplicas como para el sismo analizado, lo cual es característico de los sistemas de aislación con apoyos de neopreno.

Cabe mencionar que el sistema de riel-viga y riel-capitel, además de la existencia de la estación Mirador al norte del tramo instrumentado y la existencia de más tramos a lo largo del viaducto, pueden rigidizar la estructura y restringir el movimiento en la dirección longitudinal.

En las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se pueden observar las relaciones entre las aceleraciones máximas obtenidas en el suelo y el factor de amplificación que se produce en la viga, pie y tope de la columna, en las direcciones longitudinal, transversal y vertical respectivamente. Se debe mencionar que en la dirección transversal se alcanza un factor de amplificación cercano a 4 para el extremo sur de la viga, aunque la mayor amplificación proviene de la columna. Esta amplificación se puede deber a algún impacto de la estructura en tal dirección debido a mecanismos presentes en la estructura que restringen el movimiento en dicha dirección.

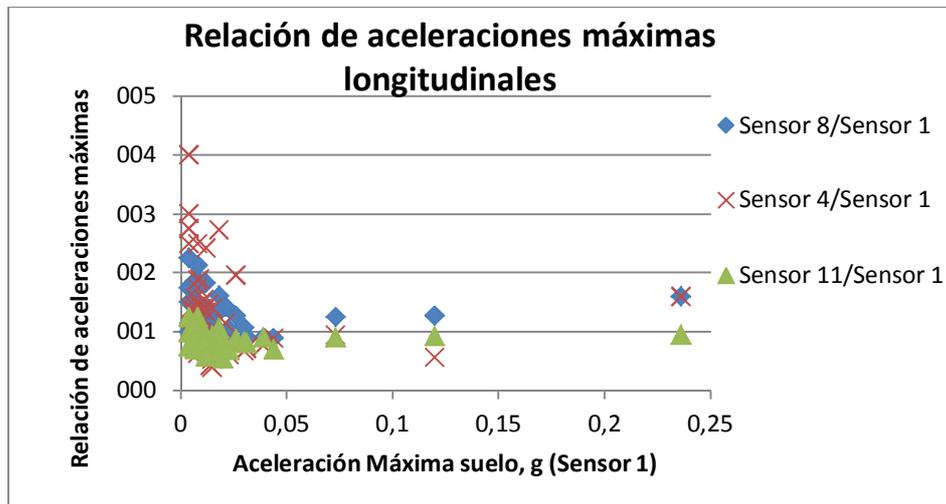


Figura 3.1 Relación de aceleraciones máximas longitudinales.

De la figura 3.1 se desprende que la base de la columna se mueve en forma similar al suelo, para todo el rango de aceleraciones. En el extremo superior de la columna, al igual que en la viga, se produce una amplificación de las aceleraciones respecto al suelo, tanto para aceleraciones pequeñas como grandes.

En la dirección transversal, se observa en general una amplificación de las aceleraciones en la estructura respecto al suelo, excepto en la base de la columna donde se observa una disminución de las aceleraciones para aceleraciones muy pequeñas ($< 0,05$ g).

En la figura 3.3 se observa un factor de amplificación mayor que uno en la viga, para aceleraciones pequeñas y grandes, mientras que en el extremo superior de la columna las aceleraciones disminuyen para aceleraciones pequeñas, mientras que aumentan para aceleraciones mayores ($> 0,01$ g).

A continuación se presentan los registros de aceleración y desplazamiento, obtenidos el 27/02/2010 para los doce canales, ordenados por dirección (longitudinal, transversal y vertical).

Los registros de aceleración se filtran entre 0,1 y 10 Hz. y a partir de estos resultados se determinan los espectros de densidad de potencia.

Las series de tiempo de desplazamiento se determinan por doble integración de los registros de aceleración.

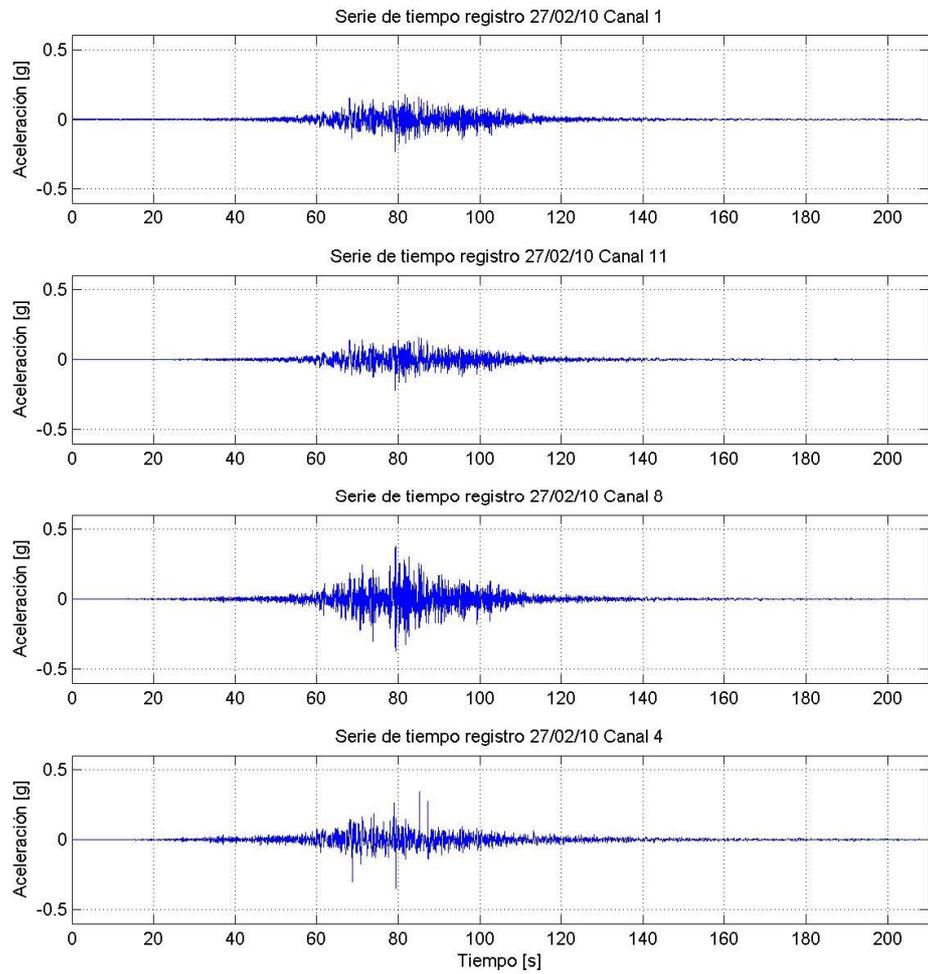


Figura 3.4 Registros de aceleración dirección longitudinal.

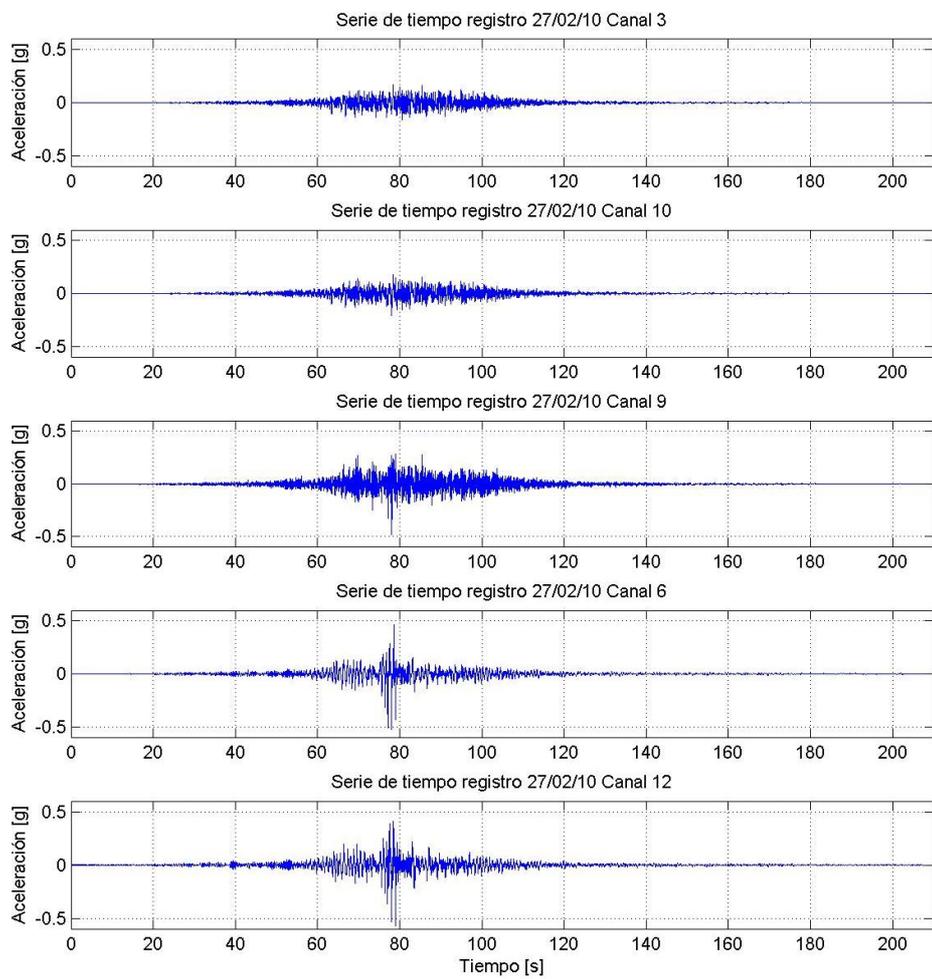


Figura 3.5 Registros de aceleración dirección transversal.

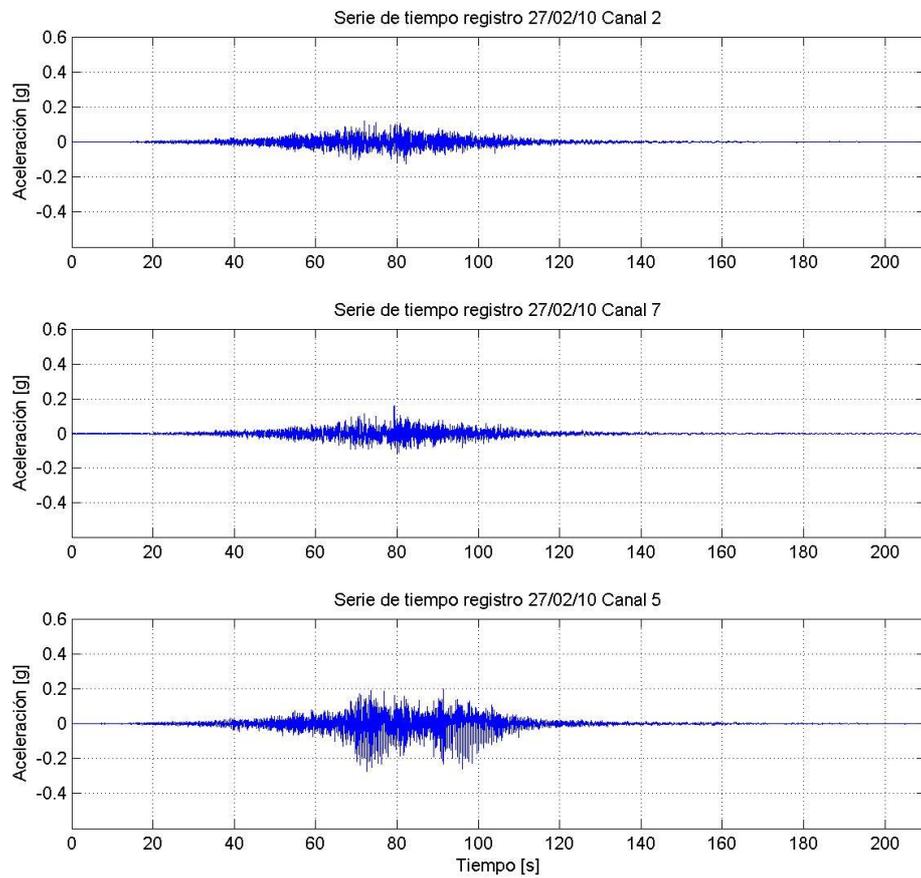


Figura 3.6 Registros de aceleración dirección vertical.

Los registros de aceleración entre el campo libre y la base de la estructura son similares, por lo que se desprende que no existe interacción suelo – estructura.

Se nota una amplificación del movimiento en la cepa de la estructura del orden de 2, en las direcciones longitudinal y transversal.

Se nota una clara reducción del movimiento longitudinal y transversal, entre los canales 8-4 y 9-6, respectivamente, y notables diferencias en el contenido de frecuencias, especialmente en

la dirección transversal, esto debido posiblemente a la acción de los apoyos de neopreno. En la dirección vertical se observa una amplificación del movimiento muy importante entre 2-5 y 7-5.

Los registros del canal 6 y el canal 12 son bastantes similares.

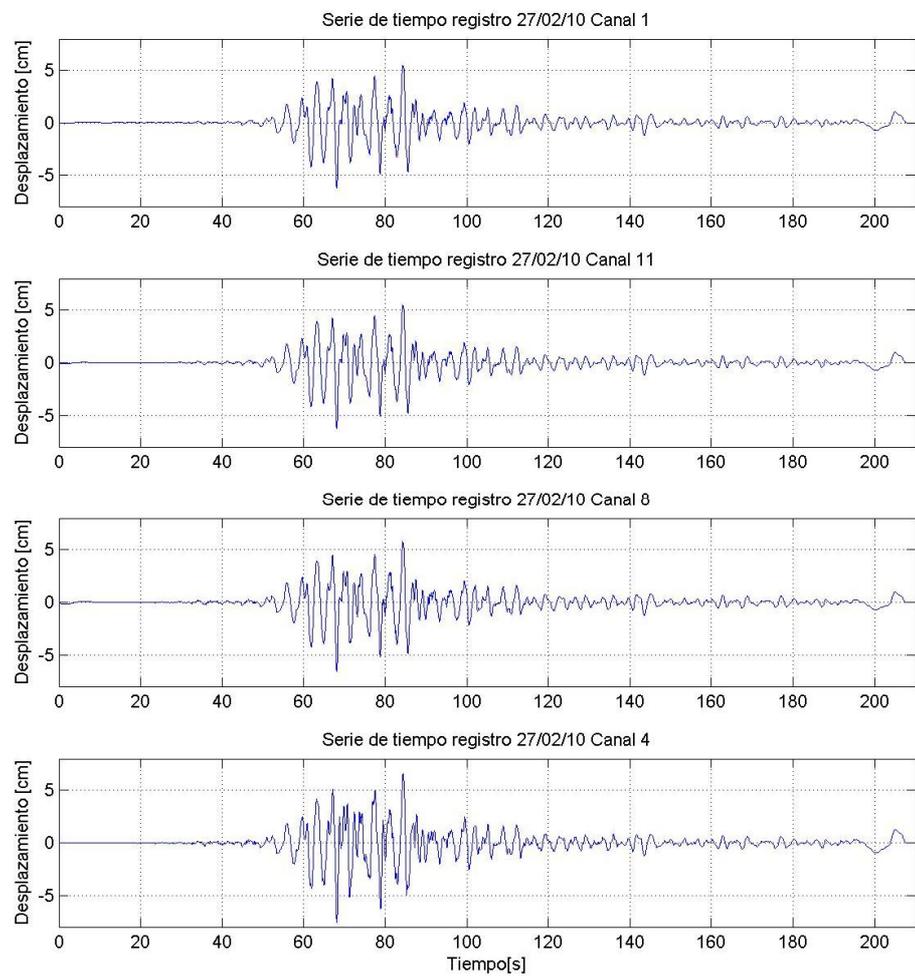


Figura 3.7 Registros de desplazamiento dirección longitudinal.

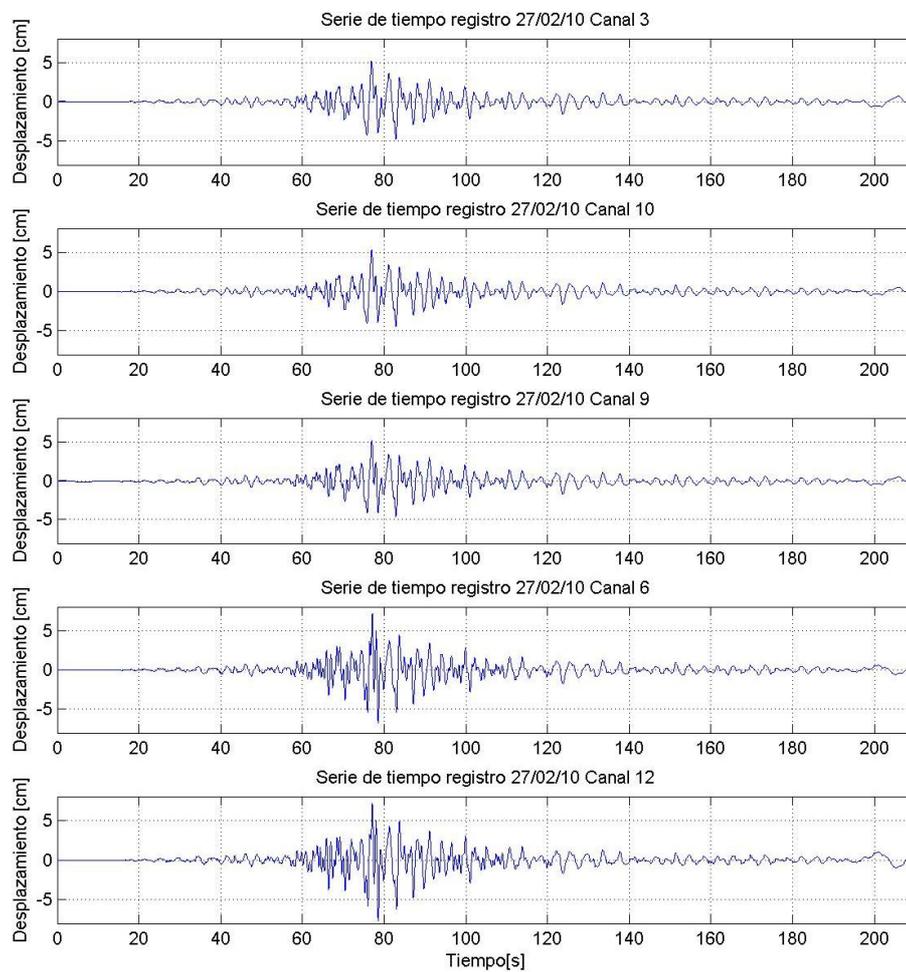


Figura 3.8 Registros de desplazamiento dirección transversal.

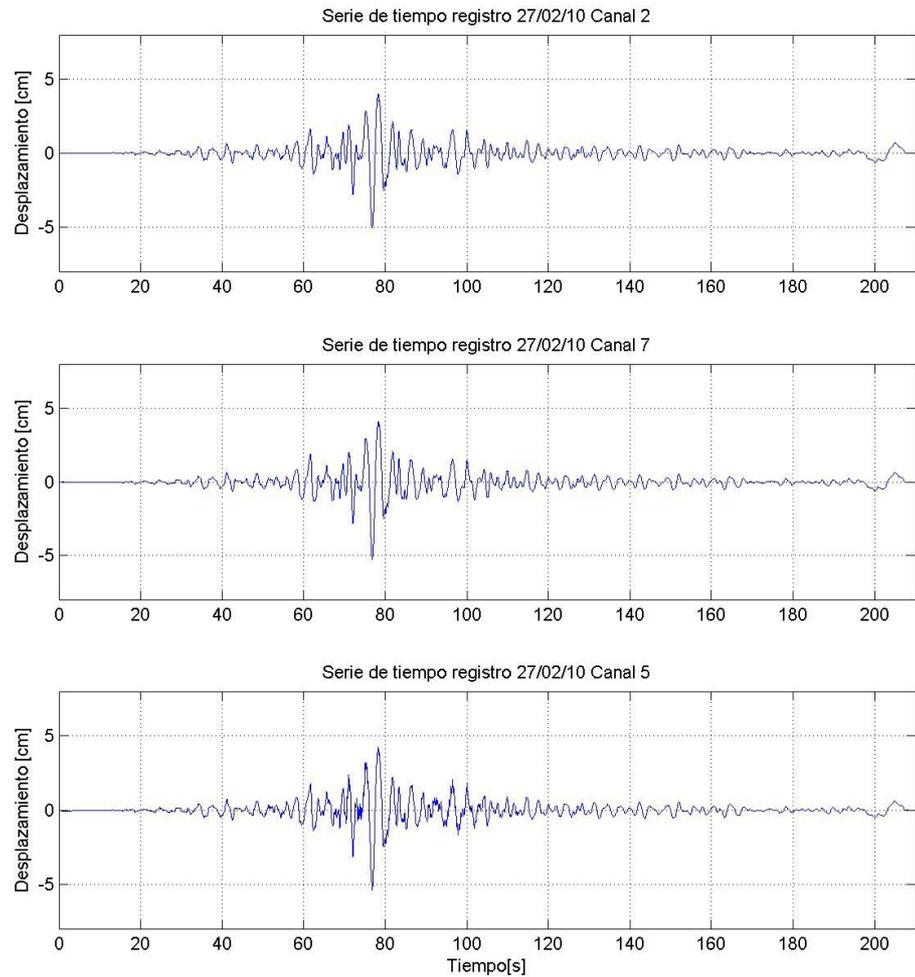


Figura 3.9 Registros de desplazamiento dirección vertical.

De las series de tiempo para desplazamientos, se observa un comportamiento como cuerpo rígido entre el suelo y la cepa para las tres direcciones del análisis, mientras que los desplazamientos son mayores en la viga, para la dirección transversal, debido al accionar de los apoyos elastoméricos.

Resulta curioso que de registros de aceleración bastante diferentes, se obtengan series de desplazamiento parecidas y con leve variación en contenido de frecuencias. No se ha podido descubrir si existe algún error en el proceso de doble integración.

3.2 Determinación de las propiedades dinámicas de la estructura

Para determinar las propiedades dinámicas de la estructura, se aplican técnicas no paramétricas a los registros de aceleración. Este análisis identifica variables típicas de los registros y las asocia con parámetros de la estructura.

Las técnicas no paramétricas se pueden aplicar en el dominio del tiempo o de las frecuencias. Para la identificación en el dominio de las frecuencias, se utilizan los espectros de Fourier, funciones de transferencia y fase.

Los espectros de Fourier permiten asociar las frecuencias modales de la estructura (en las tres direcciones) a los máximos de la ordenada espectral. Esto se realiza a la totalidad de los sensores.

Las funciones de transferencia y fase permiten visualizar el nivel de amplificación de la respuesta para una excitación dada, y la diferencia de fase entre la excitación y la respuesta respectiva, lo que permite identificar un posible modo de la estructura.

3.2.1 Análisis del sismo del 27/02/10

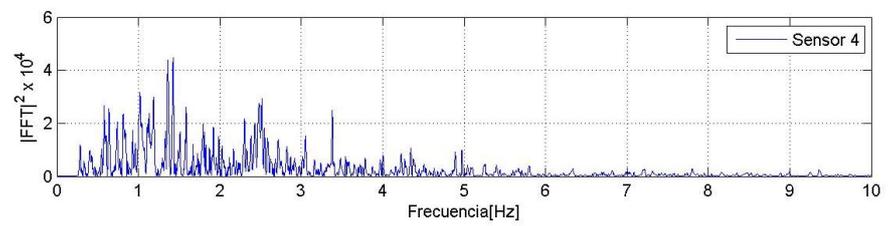
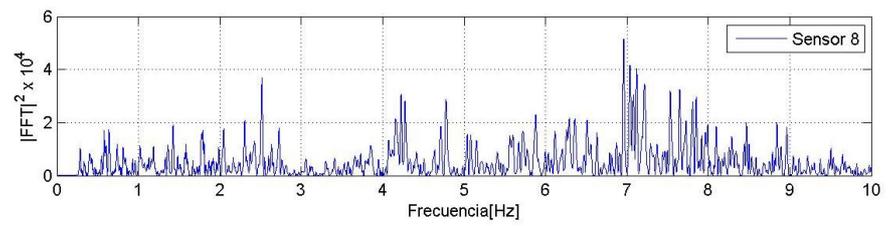
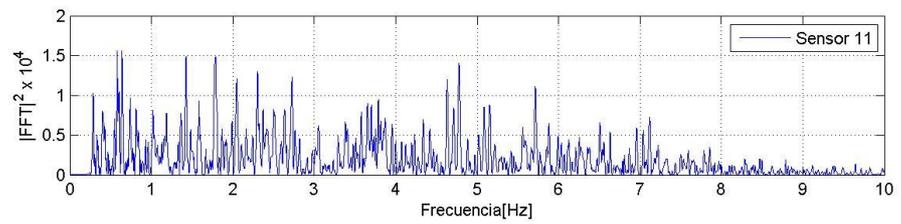
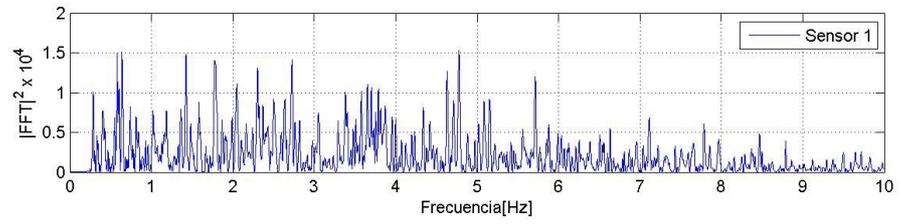
A continuación se muestran los espectros de Fourier al cuadrado, funciones de transferencia y de fase para todos los canales analizados, ordenados por dirección.

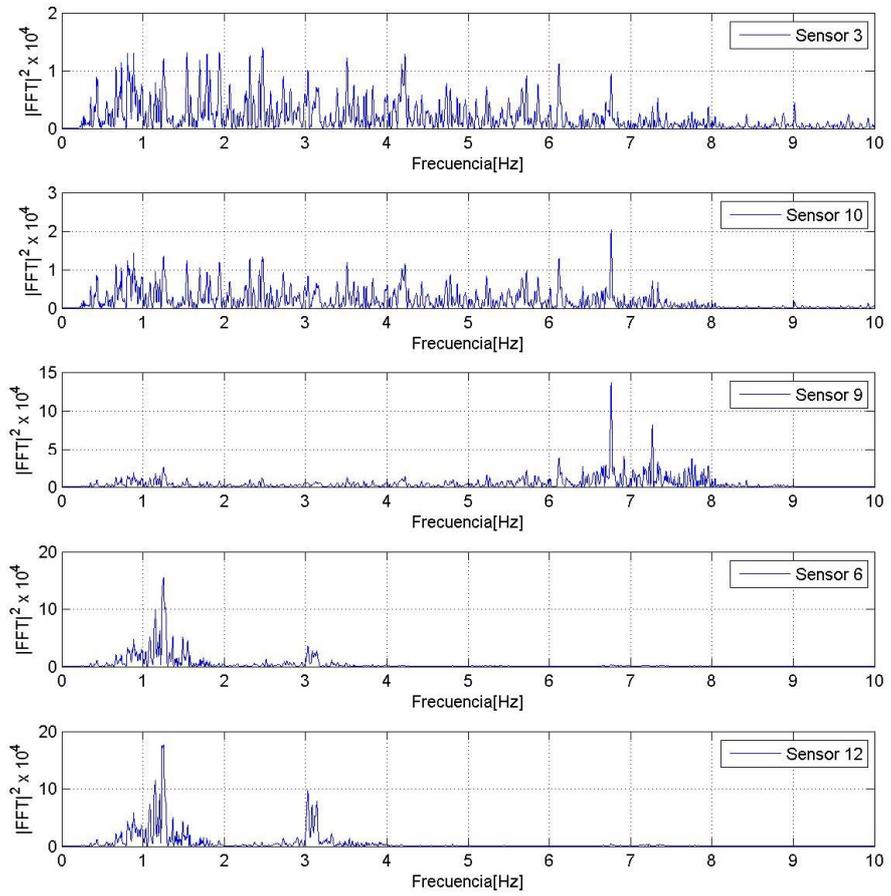
Para todos los canales, se consideró un intervalo en el dominio de las frecuencias entre 0 – 10 Hz.

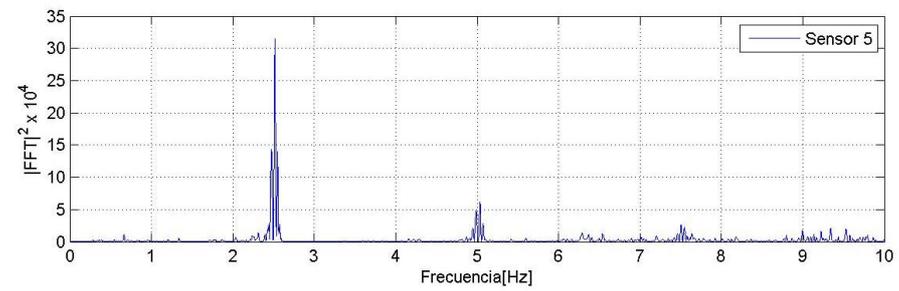
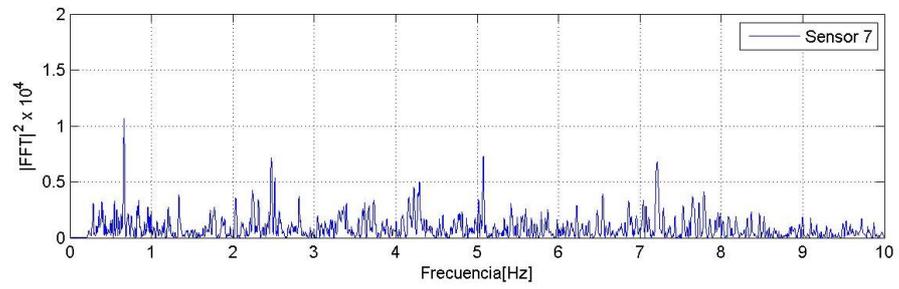
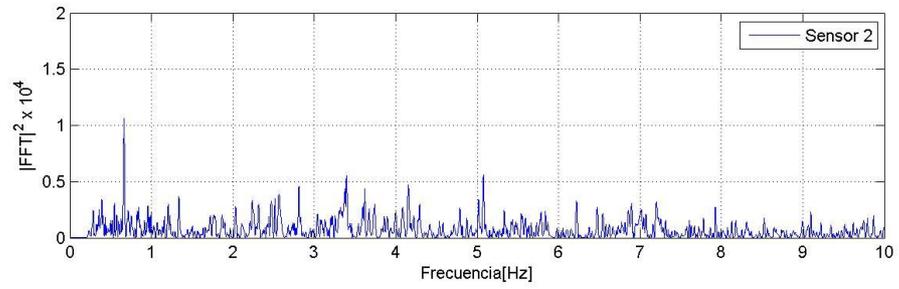
Además, se utilizaron espectros de densidad de potencia, para visualizar de mejor manera los peaks espectrales.

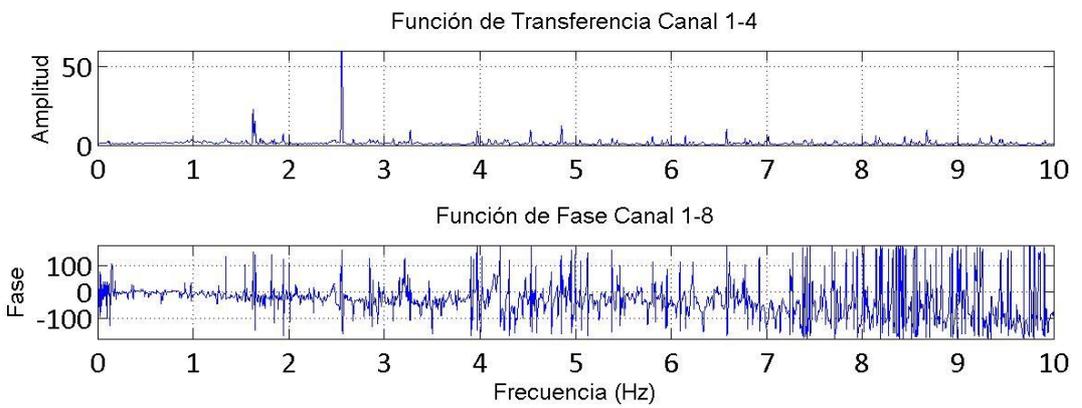
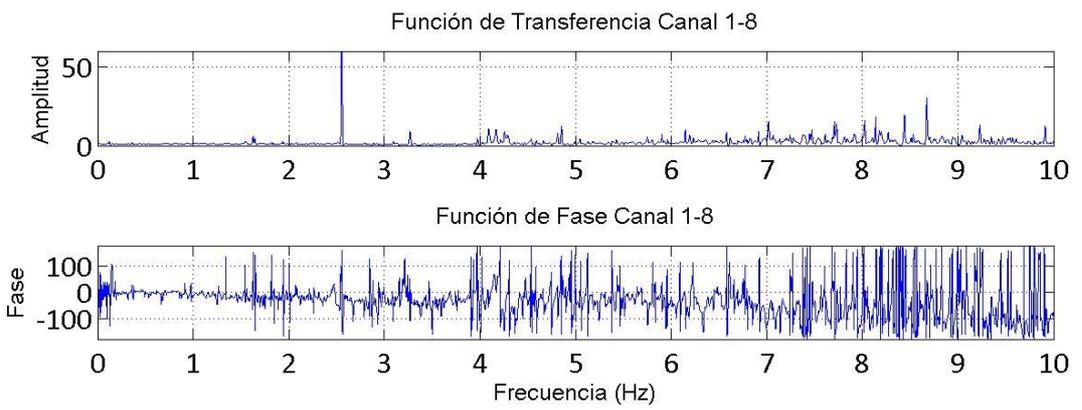
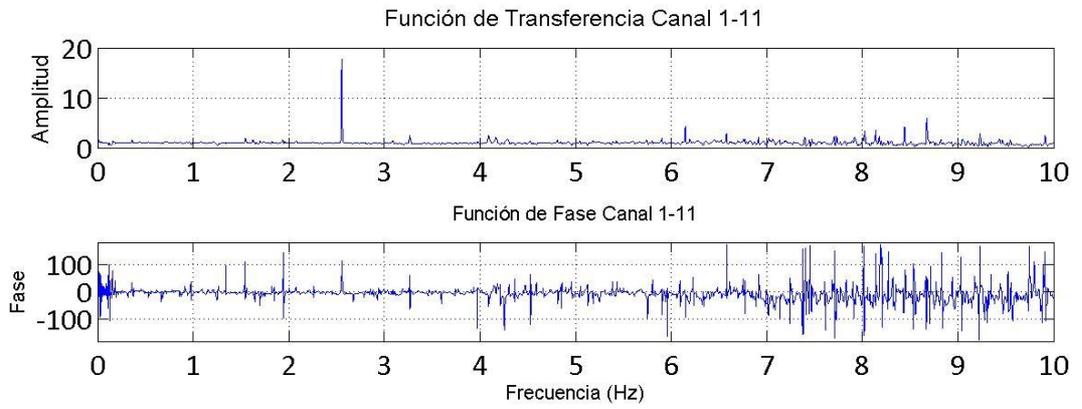
Las funciones de transferencia al igual que los espectros de densidad de potencia permiten visualizar un posible modo de la estructura, a través de los peaks predominantes en su registro. Las funciones de fase permiten verificar si los peaks obtenidos en las funciones de transferencia corresponden a modos de vibración de la estructura, o a peaks de la excitación. Modos en fase o en desfase de 180° , corresponden a modos de la estructura.

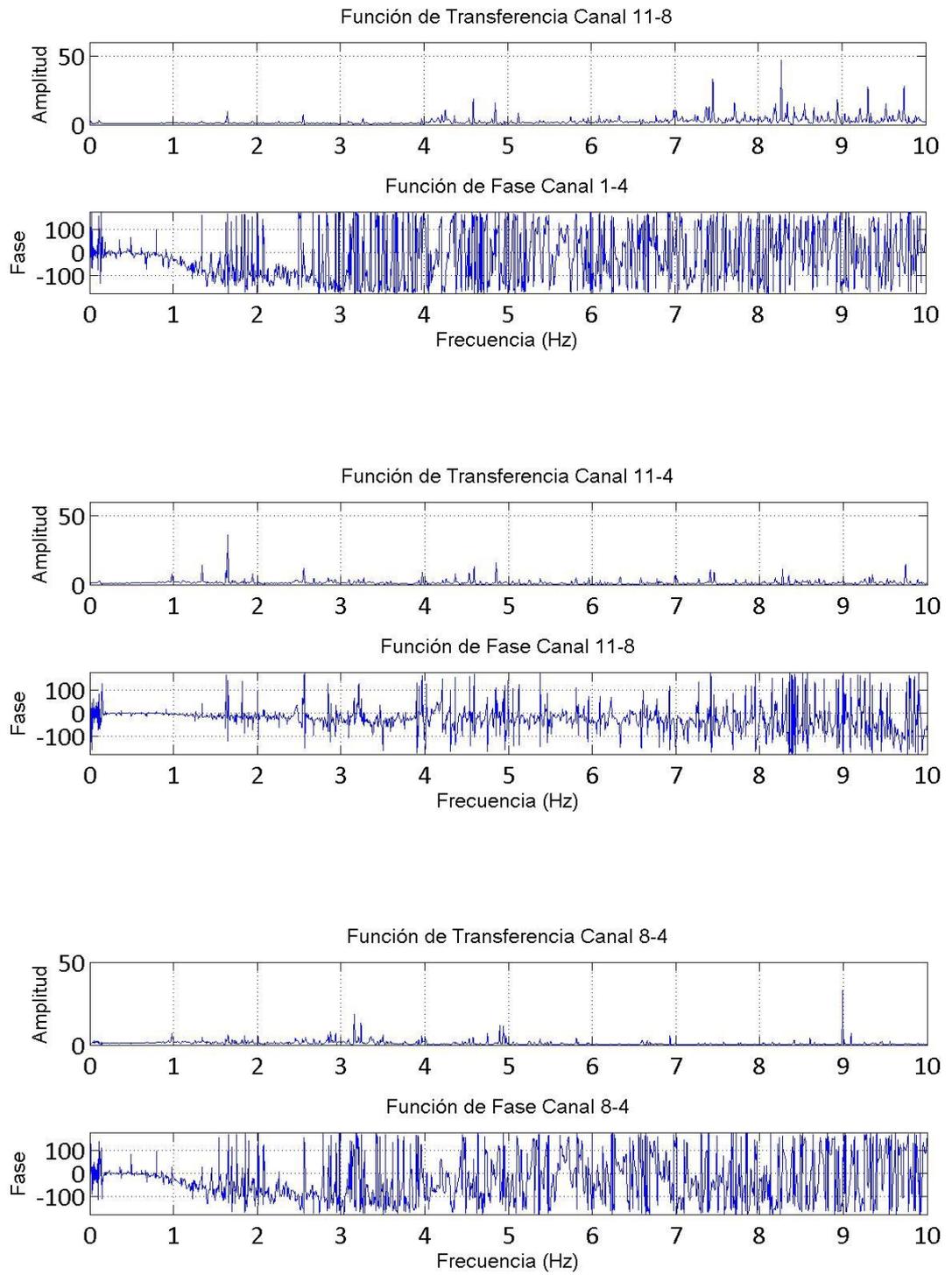
Por otra parte, para frecuencias en que un peak en las funciones de transferencia se debe a peaks espectrales en la excitación, la función de fase resulta distinta de 0 ó 180° .

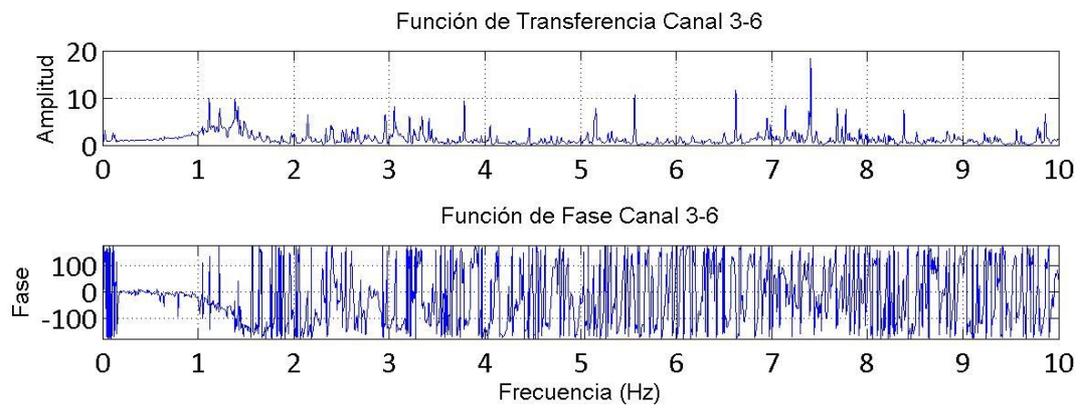
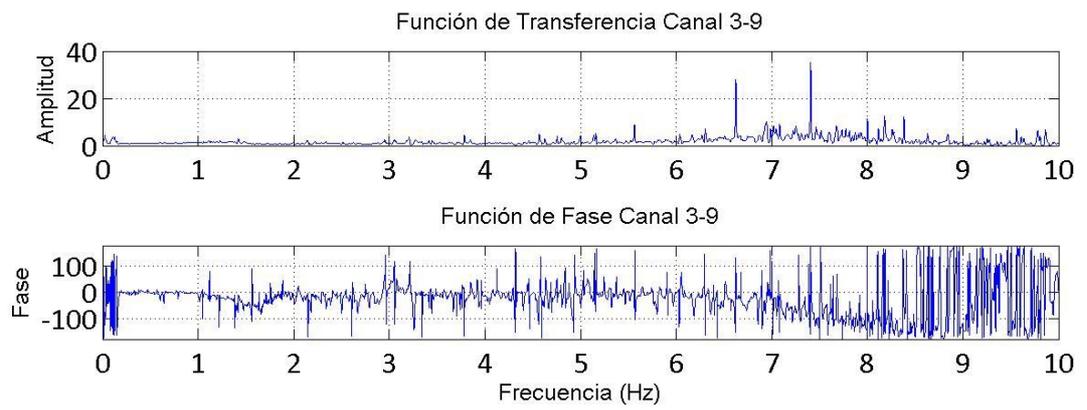
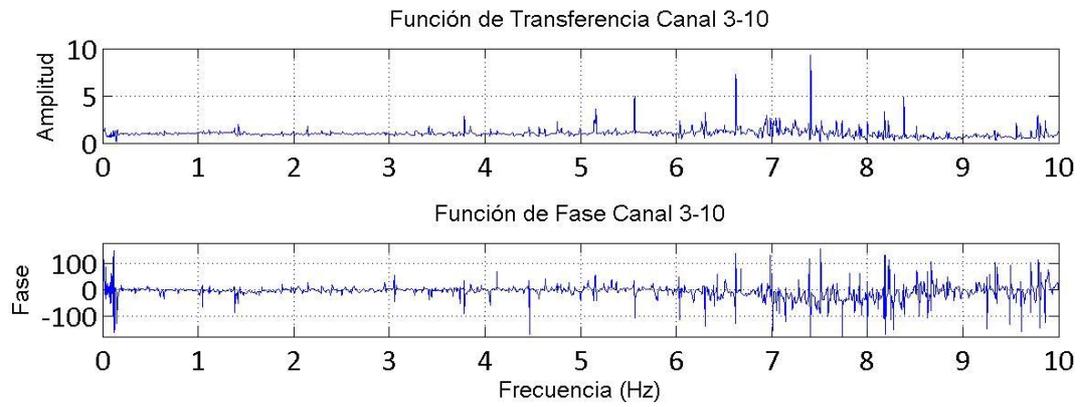


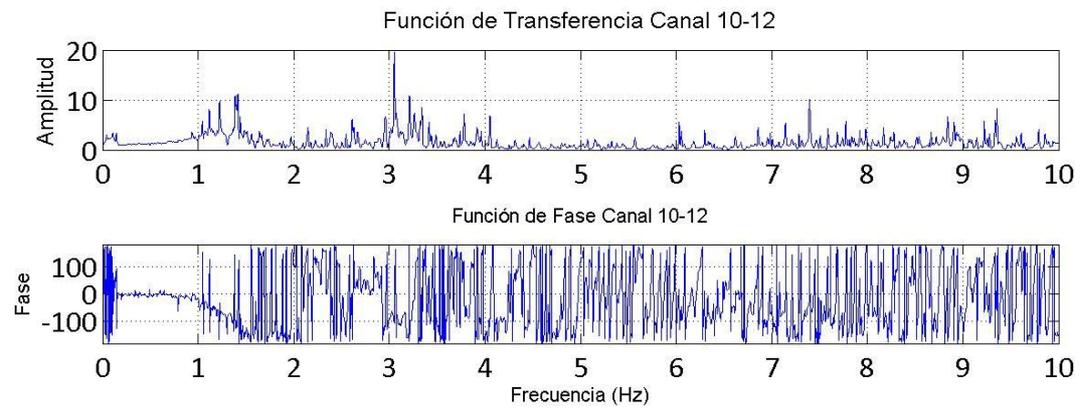
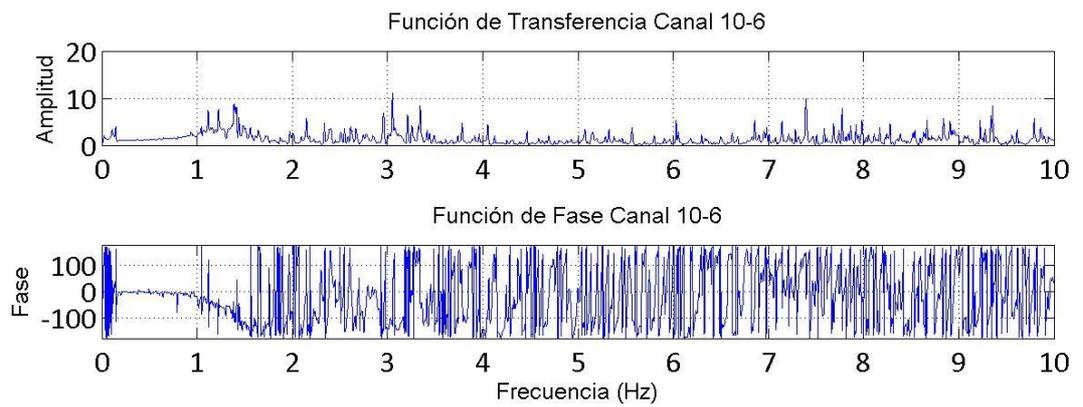
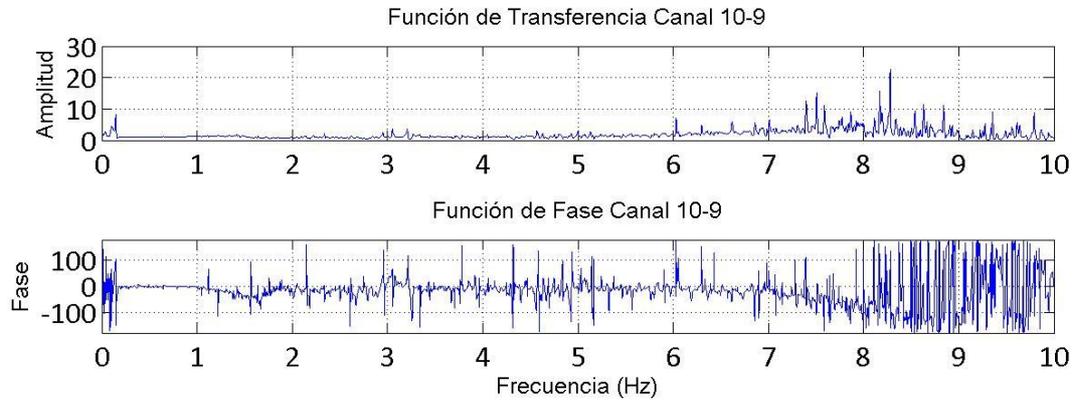


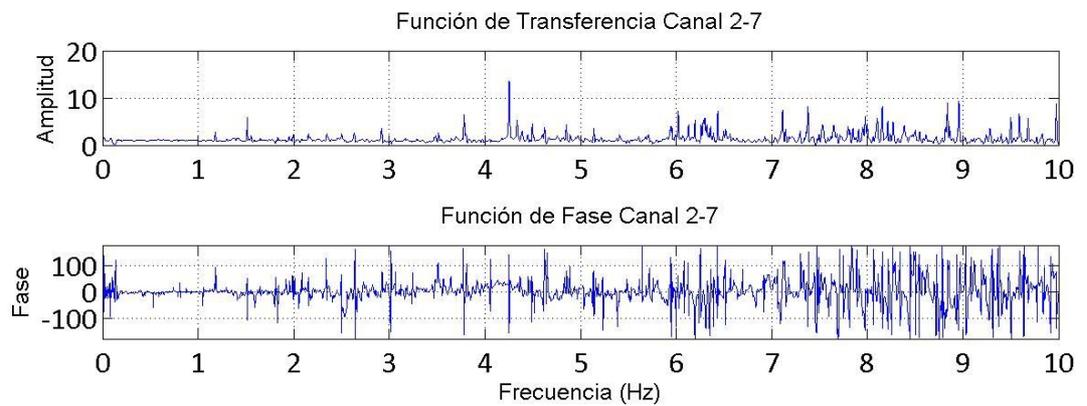
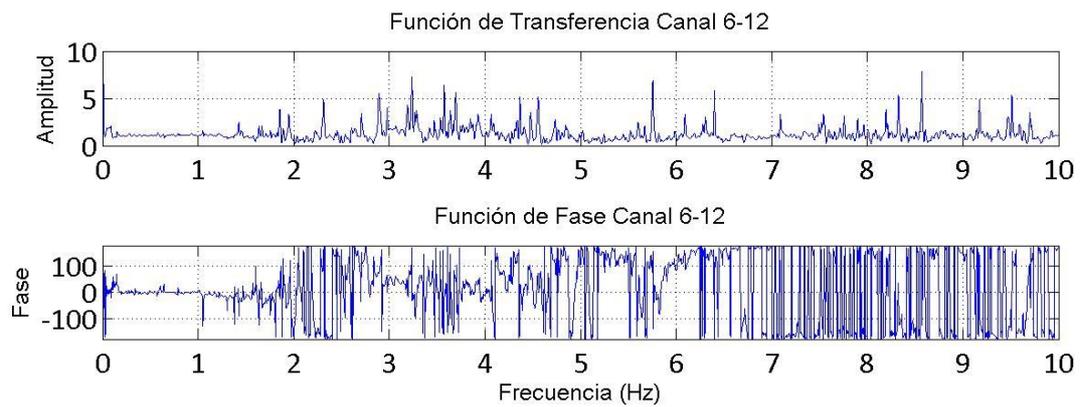
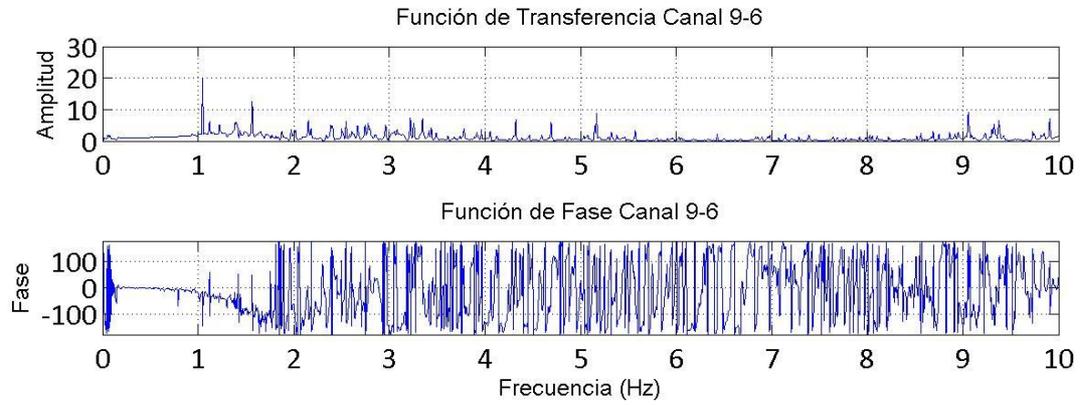


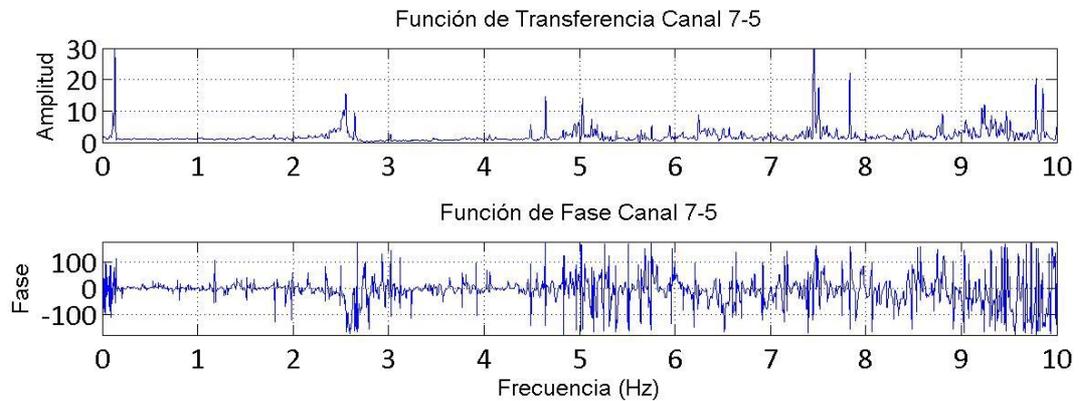












3.2.2 Comentarios

De las FFT al cuadrado se tiene en la dirección longitudinal, que los sensores 1 y 11 son bastante parecidos. Existen varios máximos, por lo que los espectros parecen ruido blanco hasta los 6 Hz aproximadamente. Los peaks entre 0,28 y 2,73 Hz alcanzan valores están entre $1 - 1,5 \times 10^4$. También existen dos máximos de $1,4 \times 10^4$ y $1,2 \times 10^4$, en 4,8 y 5,72 Hz respectivamente. Desde los 6 Hz en adelante la energía es casi despreciable.

La FFT al cuadrado del sensor 8 es similar a los dos anteriores hasta los 2,2 Hz, luego se puede ver un máximo de $3,67 \times 10^4$ en 2,52 Hz, y un peak máximo de $5,13 \times 10^4$ en 6,96 Hz.

En la viga se observa un peak máximo de $4,37 \times 10^4$ en 1,4 Hz y un peak menor de $2,92 \times 10^4$ en 2,51 Hz. Desde los 4 Hz hacia adelante se observa poca energía.

En la dirección transversal, los espectros de los sensores 3 y 10 son similares hasta los 6,4 Hz, sin frecuencias predominantes. En el sensor 10 se observa un peak máximo de $2,02 \times 10^4$ en 6,76 Hz. Desde los 7,3 Hz en adelante la energía es despreciable en ambos sensores.

El sensor del tope de la columna es similar a los dos anteriores hasta los 4,4 Hz (notar cambio de escala), luego la energía de éste último es mayor, y se observa un peak máximo de 13,67 en 6,76 Hz que coincide con el máximo del sensor 10.

Los espectros de los canales 6 y 12 son similares, y se observa un peak máximo de $17,74 \times 10^4$ en 1,25 Hz para el sensor 12, se puede ver otro peak de $9,73 \times 10^4$ en 3,03 Hz. Desde los 4 Hz hacia adelante la energía es despreciable.

En la dirección vertical coincide el peak máximo en 0,67 Hz, en el campo libre y la columna, con un valor en el tope de la columna de $1,07 \times 10^4$. Se observa un peak de menor valor en ambos canales en 5,08 Hz.

En la viga se puede ver un peak máximo de $31,4 \times 10^4$ en 2,51 Hz, y otro de amplitud $5,85 \times 10^4$ en 5,04 Hz, que coincide con el de los sensores 2 y 7.

En las funciones de transferencia se observa para la dirección longitudinal una concentración de energía en 2,56 Hz, corroborando un máximo observado en el sensor 8. Transversalmente se observa una acumulación de energía en 1,39 Hz y 3,05 Hz, corroborando lo observado en las FFT al cuadrado. Además, hay otra acumulación de energía en torno a los 6,6 Hz y 7,4 Hz para la dirección transversal.

En la dirección vertical, se observa una acumulación de energía en torno a los 2,5 y otra acumulación de energía entre 4,26 – 5,03 Hz.

Además se observa que la parte inferior de la cepa tiene un movimiento similar al del campo libre, y no se identifican claramente frecuencias dominantes, debido a la gran cantidad de peaks presentes en los espectros al cuadrado. Esto puede deberse a que la fundación no es totalmente de hormigón, sino más bien una sección cajón rellena con material compactado. Además, el pozo del campo libre está sólo a un par de metros por debajo de la estructura.

Finalmente, se presentan dos tablas resumen con las frecuencias modales encontradas, junto con las frecuencias obtenidas del análisis de microvibraciones (ref. 2). Además se determinan los amortiguamientos modales a partir de las FFT al cuadrado, mediante el método desarrollado por Tanaka (ref. 3)

Tabla 3.3 Frecuencias modales sismo 27/02/10.

| Modo N° | Dirección asociada | Sismo 27/02/10 | | Amortiguamiento Modal (%) |
|---------|--------------------|-----------------|------|---------------------------|
| | | Frecuencia (Hz) | | |
| 1 | Transversal | 1,25 | - | 1,8 |
| 2 | Longitudinal | 1,36 | 1,43 | 0,8 |
| 3 | Longitudinal | 2,47 | 2,52 | 0,5 |
| | Vertical | | | |
| 4 | Transversal | 3,03 | - | 0,6 |
| 5 | Vertical | 5,04 | 5,08 | 0,2 |
| 6 | Transversal | 6,76 | | 0,2 |
| 7 | Longitudinal | 6,96 | 7,12 | 0,2 |
| 8 | Vertical | 7,21 | - | 0,3 |

Tabla 3.4 Frecuencias modales microvibraciones y sismos pequeños.

| Modo N° | Dirección asociada | Sismo 29/07/98 | | Sismo 01/08/99 | | Microvibraciones 22/08/98 |
|---------|--------------------|-----------------|------|-----------------|------|---------------------------|
| | | Frecuencia (Hz) | | Frecuencia (Hz) | | Frecuencia (Hz) |
| 1 | Longitudinal | 1,90 | 2,59 | 1,49 | 1,9 | 2,44 |
| | Vertical | | | | | |
| 2 | Transversal | 1,71 | 2,44 | 1,44 | 1,78 | 2,44 |
| 3 | Vertical | 2,78 | 3,12 | 2,64 | 2,85 | 2,90 |
| 4 | Longitudinal | 3,22 | 3,51 | - | - | 3,69 |
| | Vertical | | | | | |
| 5 | Longitudinal | 3,61 | 4,05 | - | - | 3,86 |
| | Vertical | | | | | |
| 6 | Transversal | 3,36 | 3,95 | - | - | 3,86 |
| 7 | Transversal | 4,10 | 4,33 | - | - | 4,34 |
| 8 | Transversal | 4,69 | 5,12 | - | - | 4,91 |

Se observa que para todos los modos, hubo una disminución de la frecuencia respecto a los valores obtenidos para sismos de menor intensidad, y microvibraciones.

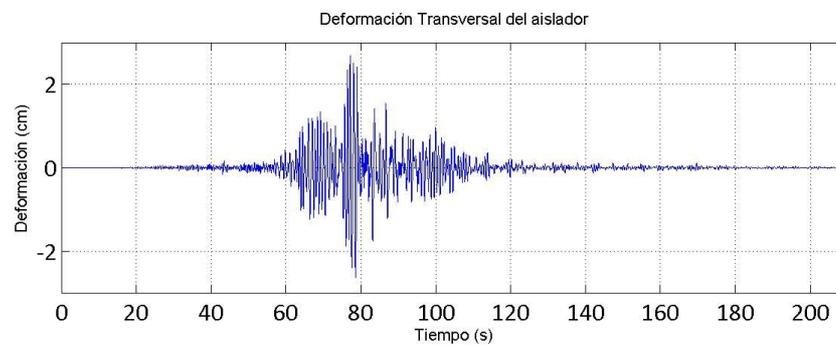
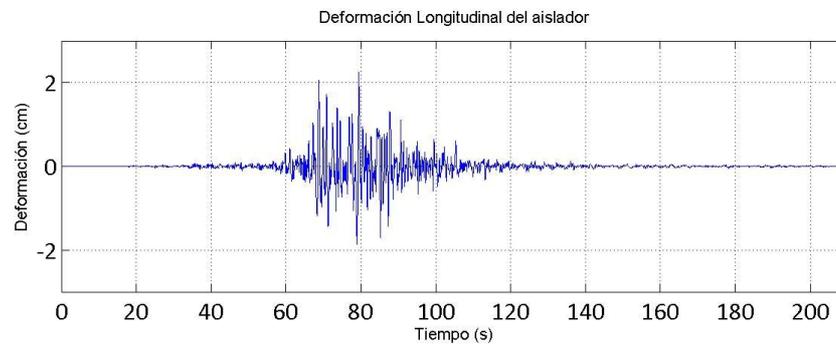
Los amortiguamientos determinados son bastante menores a los obtenidos por Quintana para un sismo de menor intensidad (ref. 2), por lo que se calculan utilizando otro criterio detallado más adelante.

CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL MODELO

En este capítulo se desarrolla un modelo matemático del tramo instrumentado. Se presentan los criterios utilizados para su modelación y calibración, de modo que se reproduzcan los registros obtenidos durante el sismo del 27/02/2010.

4.1 Deformaciones máximas del sistema de aislación

A continuación se muestran las series de tiempo de deformación de los aisladores, obtenidas a partir del desplazamiento relativo entre el desplazamiento de la viga, y el desplazamiento del tope de la columna.



La rigidez transversal (kh) de los aisladores, detallada en la tabla 2.1, fue calculadas a partir de la deformación máxima de ésta en la dirección transversal.

Las deformaciones máximas obtenidas para el sismo del 27/02/10, son las siguientes:

Tabla 4.1 Deformación de los aisladores.

| Dirección | Deformación máxima | |
|--------------|--------------------|--------|
| | cm | % |
| Longitudinal | 2,258 | 56,450 |
| Transversal | 2,683 | 67,075 |

4.2 Modelo de la estructura

Un modelo de un tramo no parece apropiado, ya que hay que considerar la influencia de tramos vecinos y la estación Mirador. En este caso se considera el tramo instrumentado, y un tramo a cada lado de éste, resultando el modelo de la fig. 4.1.

Se tomó como base para este modelo, el desarrollado por Valdebenito (ref. 1).

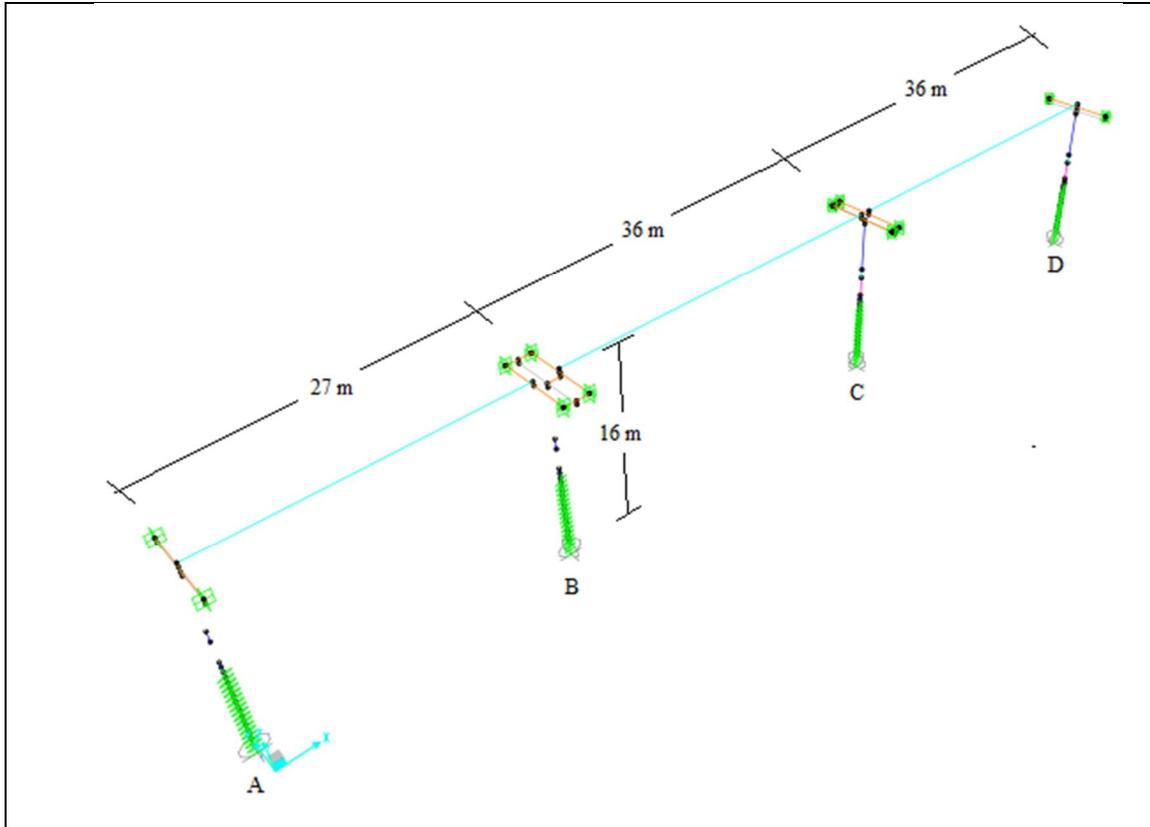


Figura 4.1 Modelo MDOF.

4.2.1 Criterios de Modelación

4.2.1.1 Propiedades geométricas de los elementos

Como se mencionó anteriormente, se consideró como base para la modelación, el modelo realizado por Valdebenito (ref. 1), considerando las siguientes modificaciones:

- Las propiedades geométricas y mecánicas de la estructura, son las específicas de cada tramo. El tramo del extremo izquierdo de la figura 4.1 corresponde al adyacente a la estación Mirador, y su largo es de 27 m. Los dos tramos restantes tienen 36 m. de largo.

- Las dos primeras columnas, desde la izquierda, corresponden a columnas estación, mientras que las dos restantes a columnas interestación. El largo de todas las columnas es de 8 m.

- El largo real de las fundaciones del viaducto, varía entre 7 y 12 metros. Las fundaciones correspondientes a columnas estación, se modelan con un largo de 8 metros, mientras que las correspondientes a columnas interestación con 7 metros de largo.

- Para considerar la flexibilidad del suelo, se estudian dos casos. El primer caso considera un empotramiento perfecto en la base de las fundaciones, y el segundo caso, considera resortes de rigidez variable con la profundidad, colocados en ambas direcciones horizontales, puestos en el modelo cada 0,5 m (ver tabla 2.4).

- Los apoyos de neopreno se modelaron con el elemento Rubber Isolator de Sap2000, cuyo comportamiento histerético es bilineal, y permite modelar la no linealidad de los apoyos.

- No se consideran cargas vivas ni sobrecargas.

- En la base de las fundaciones se restringe el movimiento, dependiendo de los casos considerados para estudiar la flexibilidad del suelo. En el caso de empotramiento perfecto, se restringe el movimiento en la dirección vertical, las dos horizontales y la rotación en torno a los tres ejes. En el caso que incluye resortes horizontales, se restringe el movimiento en la dirección vertical y la rotación en torno a este eje.

Las propiedades mecánicas y geométricas de cada sección del viaducto, y las propiedades del suelo, se encuentran detalladas en la referencia 1.

4.2.1.2 Propiedades de los materiales

La figura 4.2 muestra el tramo central del viaducto, donde la columna del lado izquierdo corresponde a una tipo estación, y la derecha, a una tipo interestación. La tabla 4.2 muestra las propiedades mecánicas de los materiales de las secciones numeradas en esta figura.

El sistema viga losa, capiteles, fundaciones y parte de las columnas son de hormigón armado. En el caso de las columnas rellenas, se calcula un módulo de elasticidad equivalente entre el hormigón armado y el hormigón de relleno de menor resistencia, y se mantienen las dimensiones originales de las secciones de las columnas. Para calcular el peso de las secciones rellenas se realiza algo similar.

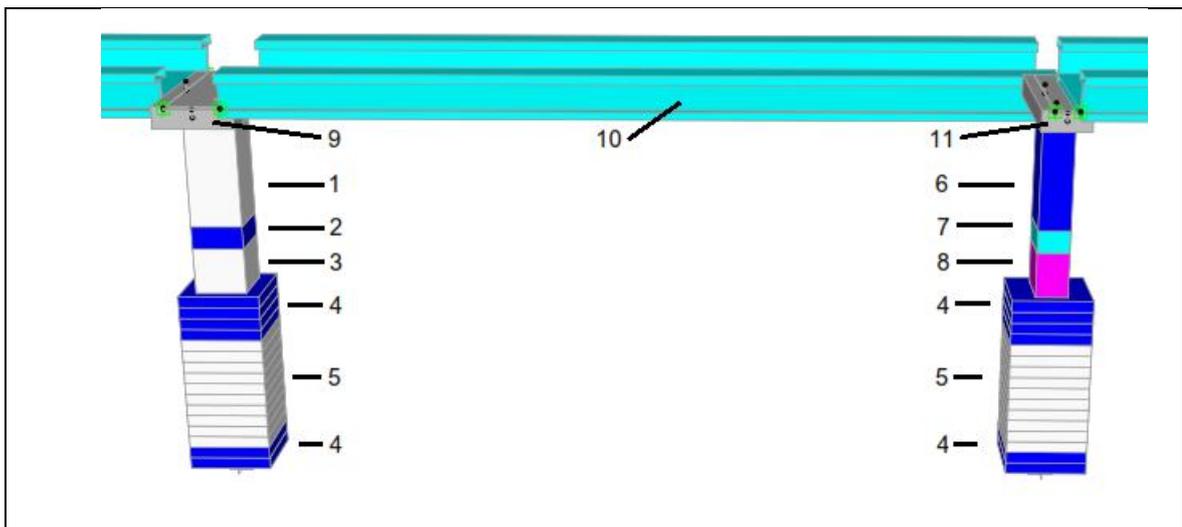


Figura 4.2 Secciones modelo.

Tabla 4.2 Propiedades secciones modelo.

| Sección | Numeración | Peso por unidad de volumen | Módulo de elasticidad | Razón de Poisson |
|--------------------------------|------------|----------------------------|-----------------------|------------------|
| | | Tonf/cm ³ | Tonf/cm ² | - |
| Columna hueca estación | 1 | 2,54 E-06 | 329,1 | 0,25 |
| Columna rellena estación | 2 | 2,13 E-06 | 276,5 | 0,20 |
| Columna completa estación | 3 | 2,54 E-06 | 329,1 | 0,25 |
| Fundación completa | 4 | 2,54 E-06 | 329,1 | 0,25 |
| Fundación rellena | 5 | 2,16 E-06 | 329,1 | 0,25 |
| Columna hueca interestación | 6 | 2,54 E-06 | 329,1 | 0,25 |
| Columna rellena interestación | 7 | 2,22 E-06 | 287,8 | 0,25 |
| Columna completa interestación | 8 | 2,54 E-06 | 329,1 | 0,25 |
| Capitel estación | 9 | 2,54 E-06 | 389,4 | 0,25 |
| Viga – Losa | 10 | 2,54 E-06 | 389,4 | 0,25 |
| Capitel interestación | 11 | 2,54 E-06 | 389,4 | 0,25 |
| Material rígido | - | - | 500 | 0,25 |

4.2.2 Criterios de Ajuste

En primera instancia se determinan las frecuencias del modelo realizando un análisis elástico, estimando la rigidez de los aisladores de acuerdo a la deformación máxima obtenida de los registros.

Luego, para ajustar las frecuencias obtenidas del análisis elástico con las obtenidas en el análisis experimental, se modifican las propiedades de los aisladores y los resortes en el suelo, y se realiza un análisis no lineal en el tiempo con el registro del sismo del 27/02/2010; comparando aceleraciones absolutas, desplazamientos relativos y espectros de densidad de potencia, para diferentes valores de amortiguamiento modal, comenzando con los obtenidos con el método de Tanaka los cuales resultan bastante pequeños.

Para cada análisis en el tiempo realizado, se calcula el error como la raíz media cuadrática de la diferencia entre los registros obtenidos y la predicción del modelo, normalizada por la raíz

media cuadrática de los registros obtenidos. Se determina el error para cada sensor, y el error global que incluye todos los sensores.

$$\text{Error sensor } j: \quad E_{Sj} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_i^n (X_{rij} - X_{mij})^2}{n}}}{\sqrt{\frac{\sum_i^n X_{rij}^2}{n}}}$$

$$\text{Error global:} \quad E_g = \frac{\sqrt{\frac{\sum_4^{12} \sum_i^n (X_{rij} - X_{mij})^2}{9 \times n}}}{\sqrt{\frac{\sum_4^{12} \sum_i^n X_{rij}^2}{9 \times n}}}$$

Además, se utiliza otro indicador para comparar la respuesta real con la respuesta de los modelos, llamado factor de amplificación (FA) promedio (Ref. 1 y Ref. 2) que se calcula de la siguiente manera.

$$\text{Factor de amplificación sensor } j: \quad FA_j = \frac{\frac{\sum_i^n X_{mij}}{n}}{\frac{\sum_i^n X_{rij}}{n}}$$

$$\text{Factor de amplificación global:} \quad FA = \frac{\frac{\sum_4^{12} \sum_i^n X_{mij}}{9 \times n}}{\frac{\sum_4^{12} \sum_i^n X_{rij}}{9 \times n}}$$

En que:

X_{rij} = Amplitud de la respuesta del modelo en el instante de tiempo i , en el sensor j .

X_{mij} = Amplitud de la respuesta real medida en el instante de tiempo i , en el sensor j .

n = Tamaño de la muestra (en cada sensor)

Al igual que con el error global, se calcula un F.A. global, de manera que se facilite el ajuste del modelo.

Se considera como modelo mejor ajustado el que presenta un error menor (global, y en cada sensor), y un factor de amplificación promedio cercano a 1.

4.3 Ajuste de las frecuencias modales

En el primer modelo se consideran distintos largos de fundaciones. Las fundaciones correspondientes a columnas estación tienen 8 metros de largo, mientras que las correspondientes a columnas interestación, tienen 7 metros de longitud. El sistema de aislación se modela con K_h y K_v de la tabla 2.2, y para el análisis no lineal se utilizan k_1 , k_2 y F_y . Se utilizan resortes horizontales para considerar la rigidez del suelo, con las propiedades de la tabla 2.4.

Con todos los modelos utilizados en este trabajo se obtienen los primeros 20 modos, sin embargo, los resultados mostrados corresponden a los 10 modos que influyen el movimiento del tramo instrumentado.

Las frecuencias obtenidas con este modelo son las siguientes:

Tabla 4.3 Frecuencias modelo.

| Modo | Periodo | Frecuencia | UX | UY | UZ | SumUX | SumUY | SumUZ |
|------|---------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Sec | 1/sec | | | | | | |
| 1 | 1,178 | 0,849 | 0,0000 | 0,1765 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1765 | 0,0000 |
| 2 | 1,171 | 0,854 | 0,3512 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3512 | 0,1765 | 0,0000 |
| 3 | 1,100 | 0,909 | 0,0000 | 0,1323 | 0,0000 | 0,3512 | 0,3088 | 0,0000 |
| 4 | 1,034 | 0,967 | 0,0898 | 0,0000 | 0,0000 | 0,4410 | 0,3088 | 0,0000 |
| 5 | 0,942 | 1,061 | 0,1642 | 0,0000 | 0,0000 | 0,6052 | 0,3088 | 0,0000 |
| 6 | 0,911 | 1,098 | 0,0000 | 0,0001 | 0,0000 | 0,6052 | 0,3089 | 0,0000 |
| 7 | 0,696 | 1,437 | 0,2738 | 0,0000 | 0,0000 | 0,8790 | 0,3089 | 0,0000 |
| 8 | 0,690 | 1,449 | 0,0000 | 0,0526 | 0,0000 | 0,8790 | 0,3615 | 0,0000 |
| 9 | 0,173 | 5,793 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0347 | 0,8790 | 0,3615 | 0,0347 |
| 10 | 0,129 | 7,742 | 0,0001 | 0,0000 | 0,1254 | 0,8791 | 0,3615 | 0,1601 |

Para el ajuste del modelo se utilizan las primeras 10 frecuencias que tienen masa equivalente en dirección longitudinal, transversal y vertical, y afectan además el comportamiento de tramo instrumentado. Por esta razón no corresponden exactamente a los primeros 10 modos del modelo. En la dirección longitudinal se encuentra el sistema riel - capitel y la estación Mirador, que pueden afectar las propiedades modales de la estructura en tal dirección.

La menor frecuencia transversal encontrada a partir de los registros es de 1,25 Hz, mientras que la menor frecuencia del modelo en esta dirección es de 0,849 Hz. En la dirección longitudinal por otra parte, la primera frecuencia experimental es de 1,36 Hz, mientras que la primera encontrada con el modelo es de 0,854 Hz. En la dirección vertical ocurre lo contrario, pues la primera frecuencia determinada en forma experimental es 2,52 Hz, y en el modelo se obtiene 5,793 Hz.

La diferencia de los valores anteriores indica una subvaloración de la rigidez del modelo, excepto en la dirección vertical.

Las variables que pueden afectar la rigidez del modelo son las propiedades del hormigón, la rigidez del suelo, y la rigidez de los apoyos de neopreno, por lo que se analiza cada variable, con el fin de determinar su influencia en las frecuencias del modelo y calibrarlo de manera correcta.

4.3.1 Ajuste propiedades del suelo

Se desarrollan 4 modelos con diferente rigidez horizontal del suelo. Cada modelo representa el modelo original, con la rigidez del suelo de la tabla 2.4, multiplicada por un factor de amplificación. Los factores de amplificación para cada modelo son 2, 4, 8 y 16.

Además se analizan dos condiciones límite: se estudia un modelo empotrado en la base de las fundaciones de la figura 4.1, y otro empotrado en la base de las columnas, sin los resortes horizontales.

En la tabla 4.4 se encuentran los resultados del modelo con la base de las fundaciones empotradas, y en la tabla 4.5, los resultados del modelo con empotramiento en la base de las columnas.

Tabla 4.4 Frecuencias modelo empotrado en la base de las fundaciones.

| Modo | Periodo | Frecuencia | UX | UY | UZ | SumUX | SumUY | SumUZ |
|------|---------|------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | Sec | 1/sec | | | | | | |
| 1 | 1,028 | 0,973 | 0,1053 | 0,0000 | 0,0000 | 0,105 | 0,000 | 0,000 |
| 2 | 0,996 | 1,004 | 0,0000 | 0,0696 | 0,0000 | 0,105 | 0,070 | 0,000 |
| 3 | 0,956 | 1,046 | 0,0000 | 0,0425 | 0,0000 | 0,105 | 0,112 | 0,000 |
| 4 | 0,949 | 1,054 | 0,0138 | 0,0000 | 0,0000 | 0,119 | 0,112 | 0,000 |
| 5 | 0,908 | 1,101 | 0,0000 | 0,0001 | 0,0000 | 0,119 | 0,112 | 0,000 |
| 6 | 0,833 | 1,200 | 0,0711 | 0,0000 | 0,0000 | 0,190 | 0,112 | 0,000 |
| 7 | 0,556 | 1,800 | 0,3556 | 0,0000 | 0,0000 | 0,546 | 0,112 | 0,000 |
| 8 | 0,546 | 1,833 | 0,0000 | 0,1980 | 0,0000 | 0,546 | 0,310 | 0,000 |
| 9 | 0,173 | 5,793 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0347 | 0,546 | 0,310 | 0,035 |
| 10 | 0,129 | 7,744 | 0,0001 | 0,0000 | 0,1258 | 0,546 | 0,310 | 0,161 |

Tabla 4.5 Frecuencias modelo empotrado en la base de las columnas.

| Modo | Periodo | Frecuencia | UX | UY | UZ | SumUX | SumUY | SumUZ |
|------|---------|------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | Sec | 1/sec | | | | | | |
| 1 | 0,999 | 1,001 | 0,0515 | 0,0000 | 0,0000 | 0,052 | 0,000 | 0,000 |
| 2 | 0,963 | 1,039 | 0,0000 | 0,0357 | 0,0000 | 0,052 | 0,036 | 0,000 |
| 3 | 0,933 | 1,072 | 0,0044 | 0,0000 | 0,0000 | 0,056 | 0,036 | 0,000 |
| 4 | 0,923 | 1,083 | 0,0000 | 0,0099 | 0,0000 | 0,056 | 0,046 | 0,000 |
| 5 | 0,904 | 1,106 | 0,0000 | 0,0003 | 0,0000 | 0,056 | 0,046 | 0,000 |
| 6 | 0,806 | 1,241 | 0,0159 | 0,0000 | 0,0000 | 0,072 | 0,046 | 0,000 |
| 7 | 0,183 | 5,471 | 0,1119 | 0,0000 | 0,0000 | 0,184 | 0,046 | 0,000 |
| 8 | 0,171 | 5,848 | 0,0000 | 0,1291 | 0,0000 | 0,184 | 0,175 | 0,000 |
| 9 | 0,171 | 5,863 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0244 | 0,184 | 0,175 | 0,024 |
| 10 | 0,121 | 8,239 | 0,0012 | 0,0000 | 0,0286 | 0,185 | 0,175 | 0,053 |

Se observa que las primeras frecuencias, en ambos modelos, se encuentran por debajo de las frecuencias obtenidas experimentalmente, lo que indica que es necesario ajustarlas mediante las propiedades de los aisladores.

Por otra parte, las frecuencias correspondientes a movimientos de las cepas, en el modelo con base de fundaciones empotradas (1,800 Hz y 1,833 Hz), se encuentran por debajo de las frecuencias encontradas mediante el análisis experimental (2,53 Hz y 3,03 Hz). Las frecuencias correspondientes a movimientos de las cepas, en el modelo con base de las columnas empotradas aumentan a 5,471 Hz y 5,848 Hz.

Lo anterior indica que es necesario modelar una situación intermedia, ajustando la rigidez del suelo, a través de los factores de amplificación de la rigidez de los resortes mencionados anteriormente.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Frecuencias modelo con amplificación de rigidez horizontal del suelo.

| Modo | Frecuencia [1/sec] | | | | UX | | | | UY | | | | UZ | | | |
|------|--------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 2 | 4 | 8 | 16 | 2 | 4 | 8 | 16 | 2 | 4 | 8 | 16 | 2 | 4 | 8 | 16 |
| 1 | 0,932 | 0,965 | 0,979 | 0,986 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 2 | 0,946 | 0,990 | 1,010 | 1,019 | 0,1010 | 0,0679 | 0,0539 | 0,0474 | 0,0951 | 0,0637 | 0,0520 | 0,0466 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 1,016 | 1,053 | 1,062 | 1,065 | 0,0806 | 0,0362 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0237 | 0,0358 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 4 | 1,037 | 1,055 | 1,066 | 1,071 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0231 | 0,0181 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0228 | 0,0180 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5 | 1,100 | 1,101 | 1,103 | 1,103 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6 | 1,174 | 1,210 | 1,223 | 1,228 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | 1,640 | 2,031 | 2,453 | 2,839 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 8 | 1,684 | 2,066 | 2,494 | 2,895 | 0,1648 | 0,2120 | 0,2215 | 0,2201 | 0,1627 | 0,2103 | 0,2203 | 0,2193 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9 | 5,793 | 5,793 | 5,793 | 5,793 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0347 | 0,0347 | 0,0347 | 0,0347 |
| 10 | 7,745 | 7,746 | 7,748 | 7,750 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1259 | 0,1263 | 0,1267 | 0,1270 |

De la tabla se desprende, que a medida que aumenta la rigidez del suelo en las direcciones horizontales; se rigidiza el sistema y las frecuencias transversales y longitudinales aumentan. Las frecuencias verticales se mantienen prácticamente constantes.

Las frecuencias horizontales de los primeros modos presentan una menor variación que las de los modos superiores, dado que éstas últimas corresponden a movimientos de las cepas, que se ven afectadas por la variación de las propiedades del suelo y se ajustan mejor a las obtenidas experimentalmente.

4.3.2 Ajuste propiedades de los aisladores

Para aumentar las frecuencias horizontales, de manera que se ajusten a las frecuencias experimentales, se aumenta la rigidez horizontal de los apoyos en un porcentaje constante, tomando como base la rigidez horizontal (k_h) de la tabla 2.2.

Además, se eliminan los resortes que modelan el suelo para analizar sólo la variación de las propiedades de los aisladores y se considera el modelo con la base de las fundaciones empotradas.

Se determina el rango de variación de las frecuencias horizontales, a partir de niveles mínimos y máximos de deformación de los apoyos de neopreno. Se considera una deformación mínima de 5%, que corresponde a la mínima deformación alcanzada en los ensayos de las probetas realizados en 1996, y una deformación máxima de 100%.

En la tabla 4.7 se muestran los valores de la rigidez horizontal de los apoyos de neopreno para deformaciones de 5% y 100%. La rigidez vertical mantiene el valor inicial de la tabla 2.2.

Tabla 4.7 Rangos de deformación de los apoyos de neopreno..

| Deformación | G [kgf/cm ²] | K _h [tonf/cm] |
|-------------|--------------------------|--------------------------|
| 0,05 | 22,386 | 10,074 |
| 1,00 | 8,951 | 4,028 |

Se realizan 4 modelos para calibrar este parámetro, y se determina por simplicidad, que el porcentaje de aumento de la rigidez horizontal de los aisladores para cada modelo es 25%,

respecto al valor inicial (tabla 2.2), así la rigidez de cada modelo se mantiene en el rango de la tabla 4.7.

La rigidez de los aisladores de cada modelo se muestra en la tabla 4.8.

En la tabla 4.9 se muestran los resultados de los modelos con variación de rigidez horizontal en los apoyos de neopreno.

Tabla 4.8 Rigidez horizontal ajuste de los aisladores.

| % Aumento rigidez | Inicial | 25% | 50% | 75% | 100% |
|------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
| Rigidez horizontal [tonf/cm] | 4,552 | 5,689 | 6,827 | 7,965 | 9,103 |

Tabla 4.9 Frecuencias modelo con variación propiedades del aislador.

| Modo | Frecuencia (1/s) | | | | UX | | | | UY | | | | UZ | | | |
|------|------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 25% | 50% | 75% | 100% | 25% | 50% | 75% | 100% | 25% | 50% | 75% | 100% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 1 | 1,059 | 1,130 | 1,189 | 1,238 | 0,1327 | 0,1634 | 0,1971 | 0,2334 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 2 | 1,099 | 1,177 | 1,243 | 1,298 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0844 | 0,1052 | 0,1380 | 0,1930 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | 1,139 | 1,215 | 1,275 | 1,323 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0339 | 0,0560 | 0,0605 | 0,0394 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 4 | 1,165 | 1,258 | 1,337 | 1,402 | 0,0210 | 0,0329 | 0,0509 | 0,0745 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5 | 1,230 | 1,347 | 1,453 | 1,549 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1547 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0227 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6 | 1,316 | 1,410 | 1,486 | 1,554 | 0,0999 | 0,1293 | 0,1502 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | 1,842 | 1,892 | 1,951 | 2,017 | 0,3369 | 0,3009 | 0,2555 | 0,2104 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 8 | 1,883 | 1,941 | 2,005 | 2,074 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1721 | 0,1409 | 0,1082 | 0,0773 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9 | 5,793 | 5,794 | 5,794 | 5,795 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0347 | 0,0347 | 0,0347 | 0,0348 |
| 10 | 7,745 | 7,746 | 7,747 | 7,748 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1260 | 0,1262 | 0,1263 | 0,1265 |

Las primeras frecuencias horizontales aumentan en un porcentaje mayor que con las variables estudiadas anteriormente. En el modelo con 25% de aumento, la primera frecuencia transversal, al igual que la primera longitudinal, aumentan un 8% aproximadamente, respecto al modelo sin variación. Lo anterior señala que este parámetro influye más que los anteriores para ajustar las frecuencias horizontales correspondientes a movimientos del viaducto y del capitel.

Por otro lado, las frecuencias verticales no sufren gran variación al aumentar la rigidez horizontal de los apoyos.

Las frecuencias horizontales correspondientes a movimientos de las cepas aumentan, pero no alcanzan los valores determinados en la tabla 4.6, debido a la eliminación de los resortes que representan el suelo. Esto indica que la calibración del modelo debe considerar el ajuste de las propiedades del suelo y las propiedades de los aisladores, ya que en el análisis experimental, se determinaron frecuencias que no se logran ajustando un sólo factor.

Las primeras frecuencias horizontales determinadas experimentalmente se encuentran entre 1,25 Hz y 1,43 Hz, y sólo se logran ajustando las propiedades de los aisladores, que corresponden en el modelo, a movimientos del viaducto. Por otro lado, se determinaron experimentalmente, frecuencias horizontales cercanas a 2,5 Hz y 3 Hz, que sólo se logran con el ajuste de las propiedades de los resortes que modelan el suelo, y corresponden en el modelo, a movimientos de las cepas.

Finalmente, se analiza un último modelo, considerando los parámetros determinados anteriormente; aumento de las propiedades de los aisladores en 100% ($k_h = 9,103 \text{ tonf/cm}$) y factor de amplificación 8 para la rigidez horizontal de los resortes que modelan el suelo.

Los resultados obtenidos del nuevo modelo, se muestran a continuación.

Tabla 4.10 Frecuencias modelo con variación de propiedades de aisladores y suelo.

| Modo | Periodo | Frecuencia | UX | UY | UZ | SumUX | SumUY | SumUZ |
|------|---------|------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | Sec | 1/sec | | | | | | |
| 1 | 0,792 | 1,262 | 0,1421 | 0,0000 | 0,0000 | 0,142 | 0,000 | 0,000 |
| 2 | 0,757 | 1,321 | 0,0000 | 0,0771 | 0,0000 | 0,142 | 0,077 | 0,000 |
| 3 | 0,701 | 1,427 | 0,0000 | 0,0625 | 0,0000 | 0,142 | 0,140 | 0,000 |
| 4 | 0,688 | 1,455 | 0,0166 | 0,0000 | 0,0000 | 0,159 | 0,140 | 0,000 |
| 5 | 0,643 | 1,555 | 0,0000 | 0,0001 | 0,0000 | 0,159 | 0,140 | 0,000 |
| 6 | 0,602 | 1,662 | 0,0705 | 0,0000 | 0,0000 | 0,229 | 0,140 | 0,000 |
| 7 | 0,389 | 2,568 | 0,2007 | 0,0000 | 0,0000 | 0,430 | 0,140 | 0,000 |
| 8 | 0,380 | 2,632 | 0,0000 | 0,1960 | 0,0000 | 0,430 | 0,336 | 0,000 |
| 9 | 0,173 | 5,795 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0348 | 0,430 | 0,336 | 0,035 |
| 10 | 0,129 | 7,751 | 0,0001 | 0,0000 | 0,1271 | 0,430 | 0,336 | 0,162 |

Las primeras frecuencias, transversal (1,321Hz) y longitudinal (1,262 Hz), difieren un 7% aproximadamente, respecto a las primeras encontradas de manera experimental (1,25 Hz y 1,36 Hz), respectivamente. La siguiente frecuencia transversal de 2,63 Hz varía un 15% aproximadamente, respecto a la determinada experimentalmente (3,03 Hz), en la dirección longitudinal la frecuencia de 2,57 Hz difiere un 3% respecto a la experimental (2,52 Hz).

Las frecuencias verticales prácticamente no varían. Sin embargo al comparar la frecuencia de 5,795 Hz, con la encontrada experimentalmente de 5,04 Hz, se observa una diferencia de 15% aproximadamente, mientras que la frecuencia de 7,751 Hz difiere un 8% aproximadamente, con la determinada experimentalmente de 7,21 Hz.

Debido a la diferencia entre las frecuencias obtenidas del modelo anterior y las obtenidas experimentalmente, se realiza un análisis de sensibilidad variando las propiedades del hormigón. Las propiedades que se varían son: el módulo de elasticidad del hormigón del viaducto, el módulo de elasticidad del hormigón de las columnas y el módulo de elasticidad del hormigón de las fundaciones. Además se analiza la influencia del largo de las fundaciones de las columnas estación.

Se realiza un análisis no lineal en el tiempo para cada caso analizado, aplicando al modelo el sismo del 27/02/10, registrado en el campo libre de la estructura (sensores 1,2 y 3), con un amortiguamiento de 4%, que fue el valor determinado por Quintana (ref. 2).

4.3.3 Ajuste de la longitud de las fundaciones estación

Para analizar este parámetro, se generan 4 modelos con longitudes de fundación 8, 9, 10 y 12 metros, para las fundaciones de las columnas estación. Las columnas interestación mantienen los 7 metros del modelo original. Las propiedades del sistema de aislación y suelo, corresponden a las determinadas en el punto 4.3.2.

Se calcula el error de cada modelo, comparando aceleraciones absolutas y FFT al cuadrado.

Además, cada modelo se analiza con empotramiento perfecto en la base de las fundaciones y con resortes horizontales (caso con factor de amplificación 8), generando de esta manera 8 modelos en total.

El error de cada modelo se muestra a continuación:

Tabla 4.11 Error de aceleraciones caso con resortes horizontales.

| Error de aceleraciones absolutas para caso con resortes horizontales | | | | | | | | | |
|--|--------|--------------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|
| | | Amortiguamiento 4% | | | | | | | |
| Dirección | Sensor | Error sensor | | | | FA | | | |
| | | 8 metros | 9 metros | 10 metros | 12 metros | 8 metros | 9 metros | 10 metros | 12 metros |
| longitudinal | 11 | 1,224 | 1,201 | 1,196 | 1,195 | 1,301 | 1,301 | 1,313 | 1,325 |
| | 8 | 3,104 | 3,112 | 3,154 | 3,194 | 2,922 | 3,015 | 3,093 | 3,143 |
| | 4 | 1,770 | 1,748 | 1,734 | 1,719 | 1,612 | 1,612 | 1,602 | 1,589 |
| transversal | 10 | 1,208 | 1,149 | 1,124 | 1,113 | 1,248 | 1,228 | 1,217 | 1,212 |
| | 9 | 3,024 | 2,944 | 2,929 | 2,949 | 2,694 | 2,682 | 2,677 | 2,691 |
| | 6 | 1,649 | 1,589 | 1,556 | 1,540 | 1,844 | 1,778 | 1,737 | 1,711 |
| | 12 | 1,335 | 1,334 | 1,334 | 1,333 | 1,359 | 1,359 | 1,359 | 1,359 |
| vertical | 7 | 1,312 | 1,595 | 1,921 | 2,696 | 1,566 | 1,800 | 2,080 | 2,660 |
| | 5 | 3,771 | 4,007 | 4,218 | 4,605 | 4,181 | 4,423 | 4,616 | 4,809 |

| Longitud fundación | 8 metros | 9 metros | 10 metros | 12 metros |
|--------------------|--------------|----------|-----------|-----------|
| Error global | 2,449 | 2,477 | 2,528 | 2,640 |
| FA | 2,166 | 2,211 | 2,256 | 2,322 |

Tabla 4.12 Error de aceleraciones caso con fundaciones empotradas.

| Error de aceleraciones absolutas para caso empotrado en fundaciones | | | | | | | | | |
|---|--------|--------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Amortiguamiento 4% | | | | | | | | | |
| Dirección | Sensor | Error sensor | | | | FA | | | |
| | | 8 metros | 9 metros | 10 metros | 12 metros | 8 metros | 9 metros | 10 metros | 12 metros |
| longitudinal | 11 | 1,352 | 1,168 | 1,166 | 1,025 | 1,189 | 1,024 | 1,020 | 0,860 |
| | 8 | 2,273 | 1,870 | 1,759 | 1,551 | 1,938 | 1,559 | 1,485 | 1,246 |
| | 4 | 1,937 | 2,041 | 2,261 | 2,428 | 1,721 | 1,820 | 1,946 | 1,894 |
| transversal | 10 | 1,343 | 1,216 | 1,081 | 1,109 | 1,201 | 1,038 | 0,924 | 0,944 |
| | 9 | 2,215 | 1,859 | 1,606 | 1,628 | 1,825 | 1,481 | 1,270 | 1,286 |
| | 6 | 2,131 | 2,366 | 2,790 | 4,086 | 2,385 | 2,531 | 2,804 | 3,608 |
| | 12 | 1,386 | 1,390 | 1,388 | 1,336 | 1,501 | 1,486 | 1,474 | 1,414 |
| Vertical | 7 | 1,311 | 1,594 | 1,919 | 2,692 | 1,563 | 1,798 | 2,076 | 2,656 |
| | 5 | 3,774 | 4,012 | 4,224 | 4,618 | 4,190 | 4,442 | 4,635 | 4,839 |

| | | | | |
|--------------------|----------|--------------|-----------|-----------|
| Longitud fundación | 8 metros | 9 metros | 10 metros | 12 metros |
| Error global | 2,221 | 2,191 | 2,278 | 2,610 |
| FA | 1,998 | 1,942 | 1,978 | 2,081 |

Tabla 4.13 Error de FFT al cuadrado caso con resortes horizontales.

| Error FFT al cuadrado para caso con resortes horizontales | | | | | | | | | |
|---|--------|--------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Amortiguamiento 4% | | | | | | | | | |
| Dirección | Sensor | Error sensor | | | | FA | | | |
| | | 8 metros | 9 metros | 10 metros | 12 metros | 8 metros | 9 metros | 10 metros | 12 metros |
| longitudinal | 11 | 4,333 | 4,208 | 4,206 | 4,386 | 1,902 | 1,897 | 1,901 | 1,918 |
| | 8 | 25,738 | 26,468 | 28,136 | 30,725 | 9,157 | 9,331 | 9,585 | 9,900 |
| | 4 | 3,118 | 3,154 | 3,103 | 3,030 | 2,533 | 2,518 | 2,480 | 2,434 |
| transversal | 10 | 4,928 | 4,116 | 3,563 | 3,357 | 1,633 | 1,559 | 1,514 | 1,498 |
| | 9 | 24,140 | 19,381 | 17,718 | 17,934 | 7,807 | 7,508 | 7,470 | 7,620 |
| | 6 | 2,491 | 2,135 | 1,998 | 1,953 | 2,396 | 2,191 | 2,086 | 2,035 |
| | 12 | 1,527 | 1,519 | 1,515 | 1,513 | 1,458 | 1,458 | 1,458 | 1,458 |
| vertical | 7 | 3,736 | 5,640 | 9,130 | 20,416 | 2,427 | 3,253 | 4,444 | 7,808 |
| | 5 | 10,335 | 11,333 | 13,424 | 19,349 | 13,106 | 14,770 | 16,437 | 19,514 |

| | | | | |
|--------------------|----------|---------------|-----------|-----------|
| Longitud fundación | 8 metros | 9 metros | 10 metros | 12 metros |
| Error global | 11,947 | 11,371 | 11,981 | 14,446 |

Tabla 4.14 Error de FFT al cuadrado caso con fundaciones empotradas.

| Error FFT al cuadrado para caso empotrado en fundaciones | | | | | | | | | |
|--|--------|--------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Amortiguamiento 4% | | | | | | | | | |
| Dirección | Sensor | Error sensor | | | | FA | | | |
| | | 8 metros | 9 metros | 10 metros | 12 metros | 8 metros | 9 metros | 10 metros | 12 metros |
| longitudinal | 11 | 7,142 | 3,810 | 4,091 | 1,339 | 1,677 | 1,101 | 1,901 | 0,597 |
| | 8 | 17,126 | 6,987 | 5,794 | 2,188 | 3,985 | 1,907 | 9,585 | 1,112 |
| | 4 | 4,275 | 5,177 | 7,056 | 10,797 | 2,825 | 3,793 | 2,480 | 4,353 |
| transversal | 10 | 5,452 | 3,500 | 1,920 | 2,340 | 1,623 | 0,811 | 1,514 | 0,795 |
| | 9 | 10,839 | 5,757 | 3,069 | 3,725 | 3,686 | 1,442 | 7,470 | 1,397 |
| | 6 | 5,163 | 6,344 | 9,427 | 29,001 | 4,300 | 6,332 | 2,086 | 14,123 |
| | 12 | 1,952 | 1,983 | 1,959 | 1,731 | 1,738 | 1,719 | 1,458 | 1,555 |
| vertical | 7 | 3,733 | 5,643 | 9,106 | 20,305 | 2,421 | 4,434 | 4,444 | 7,784 |
| | 5 | 10,516 | 11,559 | 13,673 | 19,693 | 13,132 | 16,564 | 16,437 | 19,691 |

| | | | | |
|--------------------|----------|--------------|-----------|-----------|
| Longitud fundación | 8 metros | 9 metros | 10 metros | 12 metros |
| Error global | 8,482 | 7,284 | 8,578 | 16,359 |

4.3.3.1 Comentarios

Al comparar las tablas de error de aceleraciones absolutas, se tiene que el caso con fundaciones empotradas, entrega menores factores de amplificación en general, salvo en los sensores correspondientes a la viga del viaducto (sensores 4, 5, y 6). Se observa lo mismo con el error de cada sensor, error global y el FA global.

En la dirección vertical, tanto el error por sensor, como el FA, indican que el modelo con longitud de fundación de 8 metros, se correlaciona mejor con lo obtenido experimentalmente, en ambos casos con variación de la rigidez del suelo.

Por otra parte, el error global y el FA global de aceleraciones, indican que el modelo con 9 metros de longitud se correlaciona mejor, para el caso con fundaciones empotradas, mientras que se observa una mejor correlación para el modelo con 8 metros de longitud de las fundaciones, en el caso con resortes horizontales.

El error de las FFT al cuadrado indican lo mismo que las aceleraciones, donde se observan menores errores en general, para el caso con fundaciones empotradas, salvo en los sensores correspondientes a la viga. El modelo con longitud de 9 metros de fundaciones entrega menor error global y FA global para el caso con base empotrada, mientras que en el caso con resortes horizontales, se obtienen menores errores globales para el modelo con longitudes de fundaciones estación de 8 m.

Debido a que las frecuencias del modelo se ajustaron considerando la rigidez del suelo de fundación a través de resortes horizontales de rigidez variable, y que los modelos con fundaciones empotradas presentan menores errores en aceleraciones y FFT al cuadrado, es necesario ajustarlas nuevamente si se considera eliminar los resortes. Para esto, se estudia la influencia de las propiedades del hormigón de la estructura, variando la rigidez de tres secciones del modelo de manera separada: fundaciones (f), columnas (c) y sistema viga-losa (v). Se generan dos modelos para cada una de las secciones recién mencionadas, un modelo con aumento de 20% del módulo de elasticidad del hormigón de la sección y otro disminuyendo un 20% la rigidez.

Al igual que antes, se estudia el caso con resortes horizontales en las fundaciones y el caso con empotramiento perfecto. De esta manera se generan 6 modelos para cada caso y se compara el error y el F.A. para determinar la influencia de cada parámetro en las aceleraciones absolutas y espectros de Fourier. Se ajusta considerando 9 metros de largo en la fundación de las columnas estación para el caso con fundaciones empotradas, y 8 metros para el caso con resortes horizontales. Para el análisis en el tiempo, se considera un amortiguamiento modal constante de 4%.

4.3.4 Ajuste de las propiedades del hormigón de la estructura

El error de los modelos con variación de las propiedades del hormigón se muestra a continuación. El error de los desplazamientos no se incluye, ya que no hay gran variación en los resultados de los modelos realizados.

Tabla 4.15 Error de aceleraciones caso con resortes horizontales.

| Error de aceleraciones absolutas para caso con resortes horizontales | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Fundaciones 8 m. y amortiguamiento 4% | | | | | | | | | | | | | |
| Dirección | Sensor | Error sensor | | | | | | FA | | | | | |
| | | 0,8 f | 0,8 p | 0,8 v | 1,2 f | 1,2 p | 1,2 v | 0,8 f | 0,8 p | 0,8 v | 1,2 f | 1,2 p | 1,2 v |
| longitudinal | 11 | 1,197 | 1,173 | 1,225 | 1,227 | 1,258 | 1,224 | 1,267 | 1,266 | 1,301 | 1,312 | 1,325 | 1,303 |
| | 8 | 3,071 | 3,132 | 3,092 | 3,088 | 3,080 | 3,124 | 2,878 | 2,946 | 2,911 | 2,959 | 2,919 | 2,960 |
| | 4 | 1,815 | 1,874 | 1,771 | 1,736 | 1,701 | 1,770 | 1,633 | 1,678 | 1,613 | 1,597 | 1,567 | 1,612 |
| transversal | 10 | 1,186 | 1,168 | 1,208 | 1,186 | 1,227 | 1,208 | 1,208 | 1,213 | 1,248 | 1,249 | 1,266 | 1,248 |
| | 9 | 2,996 | 3,023 | 3,025 | 2,951 | 2,998 | 3,024 | 2,617 | 2,663 | 2,695 | 2,677 | 2,697 | 2,693 |
| | 6 | 1,686 | 1,691 | 1,649 | 1,599 | 1,614 | 1,649 | 1,904 | 1,887 | 1,844 | 1,792 | 1,812 | 1,844 |
| | 12 | 1,339 | 1,356 | 1,335 | 1,336 | 1,324 | 1,334 | 1,399 | 1,409 | 1,358 | 1,333 | 1,326 | 1,359 |
| Vertical | 7 | 1,787 | 1,536 | 1,071 | 1,055 | 1,168 | 1,666 | 1,965 | 1,752 | 1,321 | 1,362 | 1,452 | 1,892 |
| | 5 | 4,123 | 3,960 | 3,900 | 3,463 | 3,648 | 3,832 | 4,544 | 4,383 | 4,118 | 3,832 | 4,043 | 4,271 |

| Variación | 0,8 f | 0,8 p | 0,8 v | 1,2 f | 1,2 p | 1,2 v |
|--------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| Error global | 2,520 | 2,505 | 2,468 | 2,364 | 2,407 | 2,472 |
| FA | 2,227 | 2,214 | 2,141 | 2,104 | 2,133 | 2,204 |

Tabla 4.16 Error de aceleraciones caso con fundaciones empotradas.

| Error de aceleraciones absolutas para caso empotrado en fundaciones | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Fundaciones 9 m. y amortiguamiento 4% | | | | | | | | | | | | | |
| Dirección | Sensor | Error sensor | | | | | | FA | | | | | |
| | | 0,8 f | 0,8 c | 0,8 v | 1,2 f | 1,2 c | 1,2 v | 0,8 f | 0,8 c | 0,8 v | 1,2 f | 1,2 c | 1,2 v |
| longitudinal | 11 | 1,123 | 1,146 | 1,169 | 1,273 | 1,184 | 1,169 | 0,991 | 1,016 | 1,022 | 1,091 | 1,032 | 1,027 |
| | 8 | 1,767 | 1,921 | 1,842 | 2,053 | 1,857 | 1,897 | 1,483 | 1,659 | 1,509 | 1,712 | 1,522 | 1,604 |
| | 4 | 2,281 | 2,102 | 2,041 | 1,899 | 1,994 | 2,040 | 1,994 | 1,857 | 1,821 | 1,699 | 1,791 | 1,819 |
| transversal | 10 | 1,073 | 1,192 | 1,216 | 1,359 | 1,232 | 1,216 | 0,920 | 1,023 | 1,038 | 1,173 | 1,049 | 1,039 |
| | 9 | 1,653 | 1,834 | 1,859 | 2,107 | 1,877 | 1,859 | 1,310 | 1,455 | 1,481 | 1,719 | 1,500 | 1,482 |
| | 6 | 2,778 | 2,427 | 2,365 | 2,206 | 2,325 | 2,366 | 2,800 | 2,574 | 2,529 | 2,440 | 2,501 | 2,532 |
| | 12 | 1,448 | 1,433 | 1,390 | 1,305 | 1,362 | 1,390 | 1,554 | 1,530 | 1,486 | 1,386 | 1,457 | 1,485 |
| Vertical | 7 | 2,261 | 1,847 | 1,298 | 1,248 | 1,437 | 1,967 | 2,346 | 2,014 | 1,472 | 1,512 | 1,666 | 2,158 |
| | 5 | 4,449 | 4,238 | 4,290 | 3,707 | 3,896 | 3,925 | 4,790 | 4,653 | 4,498 | 4,117 | 4,323 | 4,368 |

| Variación | 0,8 f | 0,8 c | 0,8 v | 1,2 f | 1,2 c | 1,2 v |
|--------------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|
| Error global | 2,351 | 2,269 | 2,245 | 2,149 | 2,151 | 2,185 |
| FA | 2,033 | 2,004 | 1,920 | 1,919 | 1,908 | 1,964 |

Tabla 4.17 Error de FFT al cuadrado caso con resortes horizontales.

| Error FFT al cuadrado para caso con resortes horizontales | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Fundaciones 8 m. y amortiguamiento 4% | | | | | | | | | | | | | |
| Dirección | Sensor | Error sensor | | | | | | FA | | | | | |
| | | 0,8 f | 0,8 p | 0,8 v | 1,2 f | 1,2 p | 1,2 v | 0,8 f | 0,8 p | 0,8 v | 1,2 f | 1,2 p | 1,2 v |
| longitudinal | 11 | 4,153 | 3,978 | 4,336 | 4,389 | 4,596 | 4,334 | 1,773 | 1,767 | 1,902 | 1,941 | 1,990 | 1,904 |
| | 8 | 25,263 | 25,523 | 25,736 | 25,891 | 25,876 | 25,750 | 8,774 | 9,176 | 9,111 | 9,154 | 9,101 | 9,234 |
| | 4 | 3,248 | 3,613 | 3,122 | 3,080 | 2,845 | 3,117 | 2,595 | 2,781 | 2,535 | 2,484 | 2,367 | 2,533 |
| transversal | 10 | 4,070 | 4,287 | 4,929 | 4,603 | 5,134 | 4,927 | 1,515 | 1,526 | 1,633 | 1,625 | 1,688 | 1,633 |
| | 9 | 21,950 | 23,596 | 24,164 | 20,669 | 23,117 | 24,119 | 7,477 | 7,699 | 7,810 | 7,518 | 7,733 | 7,805 |
| | 6 | 2,680 | 2,691 | 2,494 | 2,203 | 2,321 | 2,491 | 2,575 | 2,560 | 2,396 | 2,228 | 2,279 | 2,396 |
| | 12 | 1,641 | 1,695 | 1,530 | 1,439 | 1,406 | 1,525 | 1,521 | 1,555 | 1,458 | 1,413 | 1,387 | 1,457 |
| Vertical | 7 | 7,459 | 5,246 | 2,954 | 2,409 | 3,000 | 6,468 | 3,927 | 3,076 | 1,807 | 1,819 | 2,071 | 3,511 |
| | 5 | 12,314 | 11,081 | 13,804 | 9,010 | 10,023 | 11,017 | 15,770 | 14,495 | 13,985 | 10,982 | 12,242 | 13,742 |

| Variación | 0,8 f | 0,8 p | 0,8 v | 1,2 f | 1,2 p | 1,2 v |
|--------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|
| Error global | 11,943 | 11,994 | 12,858 | 10,942 | 11,671 | 12,109 |

Tabla 4.18 Error de FFT al cuadrado caso con fundaciones empotradas.

| Error FFT al cuadrado para caso empotrado en fundaciones | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Fundaciones 9 m. y amortiguamiento 4% | | | | | | | | | | | | | |
| Dirección | Sensor | Error sensor | | | | | | FA | | | | | |
| | | 0,8 f | 0,8 p | 0,8 v | 1,2 f | 1,2 p | 1,2 v | 0,8 f | 0,8 p | 0,8 v | 1,2 f | 1,2 p | 1,2 v |
| longitudinal | 11 | 3,633 | 3,647 | 3,815 | 4,464 | 3,896 | 3,809 | 1,048 | 1,132 | 1,161 | 1,362 | 1,186 | 1,165 |
| | 8 | 5,510 | 6,673 | 6,991 | 10,598 | 7,177 | 6,996 | 1,938 | 2,457 | 2,242 | 2,966 | 2,274 | 2,369 |
| | 4 | 7,166 | 5,599 | 5,179 | 3,927 | 4,871 | 5,173 | 3,912 | 3,365 | 3,158 | 2,674 | 3,002 | 3,153 |
| transversal | 10 | 2,039 | 3,376 | 3,501 | 5,037 | 3,591 | 3,500 | 0,819 | 1,118 | 1,154 | 1,542 | 1,182 | 1,155 |
| | 9 | 3,546 | 5,419 | 5,757 | 9,025 | 5,997 | 5,757 | 1,576 | 2,172 | 2,265 | 3,172 | 2,333 | 2,266 |
| | 6 | 9,351 | 6,757 | 6,344 | 5,490 | 6,081 | 6,340 | 6,338 | 5,187 | 4,942 | 4,499 | 4,781 | 4,941 |
| | 12 | 2,185 | 2,163 | 1,984 | 1,603 | 1,874 | 1,982 | 1,936 | 1,872 | 1,747 | 1,476 | 1,665 | 1,746 |
| Vertical | 7 | 14,370 | 8,435 | 4,379 | 3,368 | 4,510 | 9,274 | 5,880 | 4,164 | 2,287 | 2,258 | 2,766 | 4,602 |
| | 5 | 17,550 | 13,721 | 17,007 | 10,213 | 11,112 | 12,045 | 18,442 | 16,663 | 16,939 | 12,660 | 14,027 | 14,273 |

| Variación | 0,8 f | 0,8 p | 0,8 v | 1,2 f | 1,2 p | 1,2 v |
|--------------|--------|-------|-------|-------|--------------|-------|
| Error global | 10,319 | 8,275 | 9,739 | 7,249 | 7,070 | 7,500 |

Se obtiene tanto para el caso con fundaciones empotradas como para el caso con resortes horizontales, un menor error y FA global, en los modelos con aumento de las propiedades del hormigón en las fundaciones y/o las columnas. De igual manera, los errores globales obtenidos al analizar la variación de las propiedades del hormigón son menores que los obtenidos sin analizar dicho parámetro, lo que indica que es necesario realizar tal ajuste.

Por otra parte, se mantiene lo visto anteriormente, donde los modelos con fundaciones empotradas presentan menores errores que los modelos con resortes horizontales, en todos los sensores, excepto en los correspondientes a la viga. Sin embargo al observar los espectros de Fourier de los modelos de ambos casos, se nota gran diferencia en el contenido de frecuencias de algunos sensores; y los correspondientes a los modelos con resortes horizontales, se correlacionan mejor con los obtenidos experimentalmente. Lo anterior se debe a la modelación del suelo, donde los resortes con empotramiento en la base de la fundación presentan menores frecuencias en los modos correspondientes a las fundaciones y/o cepas.

Además, el ajuste logrado en la dirección vertical es mucho mejor en el modelo con aumento de la rigidez del hormigón en las fundaciones, por lo que se utiliza finalmente el

modelo con resortes horizontales (factor de amplificación 8), fundaciones de longitud de 8 m., y aumento de la rigidez del hormigón de las fundaciones un 20%, para determinar la razón de amortiguamiento modal del modelo final.

4.3.5 Ajuste amortiguamiento modal de la estructura

Para determinar la razón de amortiguamiento modal de la estructura más apropiada, se generan 6 nuevos modelos con diferentes amortiguamientos: 5%, 6%, 8%, 10%, 15% y 20%. Estos amortiguamientos se determinaron a partir de los resultados obtenidos por Quintana (ref. 2), que obtuvo un amortiguamiento de 4 %, y por Moroni et al. (ref. 4), donde obtuvo una razón de amortiguamiento modal de 32,5% en la dirección longitudinal y 14% en la dirección transversal.

Se utiliza un amortiguamiento constante en todos los modos, y posteriormente, se ajusta el amortiguamiento de cada modo a partir de los resultados obtenidos.

Se comparan aceleraciones absolutas. Se calcula FFT al cuadrado a partir de los registros de aceleraciones obtenidos.

En la tabla 4.19 se muestra el error de las aceleraciones obtenidas de los modelos realizados con los amortiguamientos descritos anteriormente, y en la tabla 4.20 se muestra el error de los FFT al cuadrado, correspondientes a tales aceleraciones.

Tabla 4.19 Error de aceleraciones para diferentes amortiguamientos.

| Error de aceleraciones absolutas con variación de amortiguamiento | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dirección | Sensor | Error sensor | | | | | | | FA | | | | | | |
| | | 4% | 5% | 6% | 8% | 10% | 15% | 20% | 4% | 5% | 6% | 8% | 10% | 15% | 20% |
| longitudinal | 11 | 1,227 | 1,114 | 1,027 | 0,902 | 0,816 | 0,682 | 0,603 | 1,312 | 1,226 | 1,162 | 1,074 | 1,018 | 0,944 | 0,912 |
| | 8 | 3,088 | 2,817 | 2,611 | 2,313 | 2,109 | 1,795 | 1,613 | 2,959 | 2,689 | 2,482 | 2,179 | 1,969 | 1,645 | 1,460 |
| | 4 | 1,736 | 1,634 | 1,548 | 1,411 | 1,304 | 1,116 | 0,991 | 1,597 | 1,506 | 1,433 | 1,318 | 1,227 | 1,063 | 0,956 |
| transversal | 10 | 1,186 | 1,092 | 1,021 | 0,919 | 0,849 | 0,739 | 0,672 | 1,249 | 1,169 | 1,110 | 1,030 | 0,978 | 0,905 | 0,873 |
| | 9 | 2,951 | 2,721 | 2,548 | 2,301 | 2,131 | 1,865 | 1,703 | 2,677 | 2,443 | 2,262 | 1,999 | 1,815 | 1,528 | 1,363 |
| | 6 | 1,599 | 1,488 | 1,400 | 1,272 | 1,180 | 1,033 | 0,951 | 1,792 | 1,671 | 1,577 | 1,437 | 1,332 | 1,150 | 1,028 |
| | 12 | 1,336 | 1,267 | 1,214 | 1,134 | 1,077 | 0,992 | 0,949 | 1,333 | 1,249 | 1,184 | 1,088 | 1,016 | 0,893 | 0,809 |
| vertical | 7 | 1,055 | 0,968 | 0,906 | 0,822 | 0,767 | 0,687 | 0,643 | 1,362 | 1,290 | 1,239 | 1,172 | 1,130 | 1,071 | 1,040 |
| | 5 | 3,463 | 3,121 | 2,869 | 2,514 | 2,268 | 1,878 | 1,647 | 3,832 | 3,453 | 3,173 | 2,775 | 2,493 | 2,043 | 1,768 |

| Amortiguamiento | 4% | 5% | 6% | 8% | 10% | 15% | 20% |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Error global | 2,364 | 2,166 | 2,017 | 1,804 | 1,655 | 1,424 | 1,287 |
| FA | 2,104 | 1,935 | 1,808 | 1,623 | 1,491 | 1,282 | 1,157 |

Tabla 4.20 Error de FFT al cuadrado para diferentes amortiguamientos.

| Error FFT al cuadrado modelos con variación de amortiguamiento | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dirección | Sensor | Error sensor | | | | | | | FA | | | | | | |
| | | 4% | 5% | 6% | 8% | 10% | 15% | 20% | 4% | 5% | 6% | 8% | 10% | 15% | 20% |
| longitudinal | 11 | 4,389 | 3,351 | 2,694 | 1,912 | 1,475 | 0,960 | 0,743 | 1,941 | 1,672 | 1,486 | 1,248 | 1,105 | 0,925 | 0,849 |
| | 8 | 25,891 | 19,496 | 15,413 | 10,475 | 7,652 | 4,238 | 2,803 | 9,154 | 7,496 | 6,345 | 4,850 | 3,933 | 2,710 | 2,109 |
| | 4 | 3,080 | 2,482 | 2,053 | 1,488 | 1,153 | 0,763 | 0,631 | 2,484 | 2,191 | 1,970 | 1,651 | 1,435 | 1,110 | 0,923 |
| transversal | 10 | 4,603 | 3,460 | 2,732 | 1,897 | 1,453 | 0,962 | 0,773 | 1,625 | 1,407 | 1,258 | 1,069 | 0,957 | 0,816 | 0,758 |
| | 9 | 20,669 | 15,425 | 12,058 | 8,108 | 5,936 | 3,383 | 2,325 | 7,518 | 6,219 | 5,313 | 4,132 | 3,398 | 2,395 | 1,886 |
| | 6 | 2,203 | 1,758 | 1,462 | 1,120 | 0,950 | 0,803 | 0,779 | 2,228 | 1,922 | 1,704 | 1,414 | 1,222 | 0,930 | 0,762 |
| | 12 | 1,439 | 1,171 | 1,014 | 0,859 | 0,799 | 0,784 | 0,804 | 1,413 | 1,221 | 1,086 | 0,907 | 0,789 | 0,613 | 0,511 |
| Vertical | 7 | 2,409 | 1,821 | 1,484 | 1,116 | 0,916 | 0,674 | 0,575 | 1,819 | 1,634 | 1,509 | 1,349 | 1,250 | 1,114 | 1,048 |
| | 5 | 9,010 | 6,450 | 4,966 | 3,364 | 2,540 | 1,618 | 1,271 | 10,982 | 8,913 | 7,522 | 5,752 | 4,656 | 3,133 | 2,342 |

| Variación | 4% | 5% | 6% | 8% | 10% | 15% | 20% |
|--------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Error global | 10,942 | 8,148 | 6,395 | 4,344 | 3,213 | 1,901 | 1,390 |

Claramente, a medida que se aumenta el amortiguamiento modal de la estructura, el error de aceleraciones absolutas y espectros al cuadrado disminuyen, lográndose un mejor ajuste de la respuesta del modelo. Sin embargo, un amortiguamiento constante tan alto en todos los modos de la estructura es poco probable, además que el error es significativo en los sensores 5, 8 y 9.

Por lo tanto se realiza un nuevo análisis, usando para cada modelo, un amortiguamiento constante de 4% en todos los modos, excepto uno, al cual se le asigna un 20%, que es el mayor valor utilizado en los análisis anteriores, y es con el cual se obtuvo el mejor ajuste.

La variación del amortiguamiento modal, no tiene influencia en las frecuencias modales de la estructura, por lo que no varían respecto a las encontradas en la tabla 4.10. Sin embargo, la respuesta del modelo (desplazamiento, aceleración y deformación de los apoyos) si depende del amortiguamiento modal.

Las tablas 4.21 y 4.22, muestran el error de aceleración y FFT al cuadrado respectivamente, al variar el amortiguamiento de un solo modo. Las columnas indican el modo al cual se le asigna un amortiguamiento de 20%.

La tabla 4.23 muestra los amortiguamientos obtenidos, así como las frecuencias de los 10 modos que corresponden al tramo instrumentado.

Las series de tiempo de las aceleraciones, desplazamientos y Espectros al cuadrado del modelo final ajustado, se encuentran en la sección de anexos del informe.

Tabla 4.21 Error de aceleración con variación de amortiguamiento.

| Error de aceleraciones absolutas | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Dirección | Sensor | Error sensor | | | | | | | | | | |
| | | damping 4% cte | modo 1 | modo 2 | modo 3 | modo 4 | modo 5 | modo 6 | modo 7 | modo 8 | modo 9 | modo 10 |
| longitudinal | 11 | 1,227 | 1,217 | 1,226 | 1,227 | 1,226 | 1,218 | 1,227 | 1,226 | 1,199 | 1,227 | 1,400 |
| | 8 | 3,088 | 3,065 | 3,088 | 3,089 | 3,086 | 3,066 | 3,088 | 3,087 | 3,022 | 3,089 | 3,521 |
| | 4 | 1,736 | 1,415 | 1,737 | 1,736 | 1,740 | 1,595 | 1,737 | 1,736 | 1,805 | 1,736 | 1,768 |
| transversal | 10 | 1,186 | 1,184 | 1,183 | 1,187 | 1,160 | 1,185 | 1,186 | 1,177 | 1,185 | 1,185 | 1,188 |
| | 9 | 2,951 | 2,946 | 2,944 | 2,955 | 2,890 | 2,949 | 2,950 | 2,930 | 2,948 | 2,949 | 2,957 |
| | 6 | 1,599 | 1,594 | 1,513 | 1,637 | 1,208 | 1,596 | 1,598 | 1,687 | 1,601 | 1,595 | 1,601 |
| | 12 | 1,336 | 1,332 | 1,067 | 1,372 | 1,337 | 1,334 | 1,344 | 1,330 | 1,338 | 1,338 | 1,336 |
| vertical | 7 | 1,055 | 1,056 | 1,055 | 1,055 | 1,055 | 1,055 | 1,055 | 1,055 | 1,056 | 1,055 | 1,055 |
| | 5 | 3,463 | 3,464 | 3,463 | 3,463 | 3,462 | 3,463 | 3,463 | 3,463 | 3,463 | 3,463 | 3,470 |
| Error global | | 2,364 | 2,336 | 2,331 | 2,371 | 2,320 | 2,348 | 2,364 | 2,366 | 2,353 | 2,363 | 2,471 |

| Error de aceleraciones absolutas | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------|-------------------|------------|------------|--------------|--------------|------------|------------|--------------|------------|------------|--------------|
| Dirección | Sensor | Error sensor | | | | | | | | | | |
| | | damping 4% cte | modo 11 | modo 12 | modo 13 | modo 14 | modo 15 | modo 16 | modo 17 | modo 18 | modo 19 | modo 20 |
| longitudinal | 11 | 1,227 | 1,173 | 1,225 | 0,626 | 1,220 | 1,101 | 1,227 | 1,226 | 1,227 | 1,227 | 1,226 |
| | 8 | 3,088 | 2,956 | 3,084 | 1,686 | 3,071 | 2,799 | 3,088 | 3,087 | 3,088 | 3,088 | 3,068 |
| | 4 | 1,736 | 1,777 | 1,737 | 1,596 | 1,738 | 1,445 | 1,736 | 1,737 | 1,736 | 1,736 | 1,736 |
| transversal | 10 | 1,186 | 1,185 | 1,160 | 1,177 | 0,688 | 1,183 | 1,186 | 1,186 | 1,186 | 1,186 | 1,186 |
| | 9 | 2,951 | 2,949 | 2,882 | 2,926 | 1,741 | 2,943 | 2,951 | 2,951 | 2,951 | 2,951 | 2,951 |
| | 6 | 1,599 | 1,599 | 1,583 | 1,592 | 1,300 | 1,597 | 1,600 | 1,602 | 1,599 | 1,599 | 1,600 |
| | 12 | 1,336 | 1,339 | 1,337 | 1,338 | 1,336 | 1,325 | 1,333 | 1,148 | 1,336 | 1,336 | 1,336 |
| vertical | 7 | 1,055 | 1,055 | 1,055 | 1,057 | 1,056 | 1,055 | 1,055 | 1,055 | 1,055 | 1,055 | 0,643 |
| | 5 | 3,463 | 3,461 | 3,463 | 3,448 | 3,465 | 3,459 | 3,463 | 3,463 | 3,463 | 3,463 | 1,690 |
| Error global | | 2,364 | 2,336 | 2,346 | 2,081 | 2,114 | 2,277 | 2,363 | 2,347 | 2,364 | 2,364 | 2,104 |

| Error de aceleraciones absolutas | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Dirección | Sensor | Factor de amplificación | | | | | | | | | | |
| | | damping 4% cte | modo 1 | modo 2 | modo 3 | modo 4 | modo 5 | modo 6 | modo 7 | modo 8 | modo 9 | modo 10 |
| longitudinal | 11 | 1,312 | 1,307 | 1,312 | 1,312 | 1,313 | 1,307 | 1,312 | 1,312 | 1,297 | 1,312 | 1,440 |
| | 8 | 2,959 | 2,945 | 2,959 | 2,959 | 2,960 | 2,944 | 2,959 | 2,959 | 2,914 | 2,960 | 3,361 |
| | 4 | 1,597 | 1,284 | 1,605 | 1,596 | 1,609 | 1,441 | 1,597 | 1,597 | 1,671 | 1,597 | 1,617 |
| transversal | 10 | 1,249 | 1,248 | 1,247 | 1,250 | 1,234 | 1,248 | 1,248 | 1,243 | 1,248 | 1,248 | 1,250 |
| | 9 | 2,677 | 2,674 | 2,671 | 2,680 | 2,633 | 2,676 | 2,676 | 2,661 | 2,676 | 2,675 | 2,682 |
| | 6 | 1,792 | 1,800 | 1,705 | 1,834 | 1,239 | 1,793 | 1,789 | 1,898 | 1,794 | 1,795 | 1,788 |
| | 12 | 1,333 | 1,334 | 0,942 | 1,372 | 1,342 | 1,334 | 1,345 | 1,322 | 1,334 | 1,334 | 1,333 |
| vertical | 7 | 1,362 | 1,363 | 1,362 | 1,363 | 1,362 | 1,363 | 1,362 | 1,363 | 1,363 | 1,363 | 1,362 |
| | 5 | 3,832 | 3,833 | 3,832 | 3,832 | 3,831 | 3,832 | 3,832 | 3,832 | 3,832 | 3,832 | 3,838 |
| FA | | 2,104 | 2,067 | 2,040 | 2,114 | 2,034 | 2,084 | 2,105 | 2,112 | 2,105 | 2,104 | 2,170 |

| Error de aceleraciones absolutas | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--------|-------------------------|------------|------------|--------------|--------------|------------|------------|--------------|------------|------------|--------------|
| Dirección | Sensor | Factor de amplificación | | | | | | | | | | |
| | | damping 4% cte | modo 11 | modo 12 | modo 13 | modo 14 | modo 15 | modo 16 | modo 17 | modo 18 | modo 19 | modo 20 |
| longitudinal | 11 | 1,312 | 1,272 | 1,311 | 0,922 | 1,308 | 1,221 | 1,312 | 1,312 | 1,312 | 1,312 | 1,311 |
| | 8 | 2,959 | 2,833 | 2,955 | 1,556 | 2,950 | 2,683 | 2,959 | 2,958 | 2,959 | 2,959 | 2,933 |
| | 4 | 1,597 | 1,629 | 1,599 | 1,489 | 1,614 | 1,362 | 1,598 | 1,607 | 1,597 | 1,597 | 1,597 |
| transversal | 10 | 1,249 | 1,248 | 1,228 | 1,244 | 0,876 | 1,247 | 1,249 | 1,249 | 1,249 | 1,249 | 1,249 |
| | 9 | 2,677 | 2,675 | 2,610 | 2,661 | 1,393 | 2,671 | 2,677 | 2,677 | 2,677 | 2,677 | 2,677 |
| | 6 | 1,792 | 1,792 | 1,773 | 1,806 | 1,507 | 1,796 | 1,792 | 1,793 | 1,792 | 1,792 | 1,792 |
| | 12 | 1,333 | 1,333 | 1,333 | 1,334 | 1,332 | 1,342 | 1,329 | 1,162 | 1,333 | 1,333 | 1,333 |
| vertical | 7 | 1,362 | 1,363 | 1,363 | 1,364 | 1,363 | 1,363 | 1,362 | 1,363 | 1,362 | 1,363 | 1,040 |
| | 5 | 3,832 | 3,830 | 3,832 | 3,825 | 3,834 | 3,830 | 3,832 | 3,832 | 3,832 | 3,832 | 1,795 |
| FA | | 2,104 | 2,087 | 2,090 | 1,873 | 1,856 | 2,034 | 2,103 | 2,081 | 2,104 | 2,104 | 1,840 |

Tabla 4.22 Error de FFT al cuadrado con variación de amortiguamiento.

| Error de FFT al cuadrado | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|-------------------|--------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Dirección | Sensor | Error sensor | | | | | | | | | | |
| | | damping 4% cte | modo 1 | modo 2 | modo 3 | modo 4 | modo 5 | modo 6 | modo 7 | modo 8 | modo 9 | modo 10 |
| longitudinal | 11 | 4,389 | 4,296 | 4,386 | 4,390 | 4,382 | 4,306 | 4,389 | 4,382 | 4,123 | 4,390 | 5,948 |
| | 8 | 25,891 | 25,330 | 25,872 | 25,896 | 25,852 | 25,354 | 25,890 | 25,865 | 24,277 | 25,899 | 35,933 |
| | 4 | 3,080 | 1,740 | 3,082 | 3,079 | 3,097 | 2,343 | 3,082 | 3,080 | 3,589 | 3,081 | 3,228 |
| Transversal | 10 | 4,603 | 4,572 | 4,569 | 4,617 | 4,255 | 4,587 | 4,598 | 4,485 | 4,578 | 4,606 | 4,651 |
| | 9 | 20,669 | 20,519 | 20,505 | 20,744 | 19,042 | 20,591 | 20,647 | 20,110 | 20,543 | 20,664 | 20,902 |
| | 6 | 2,203 | 2,178 | 1,891 | 2,353 | 1,221 | 2,187 | 2,198 | 2,552 | 2,209 | 2,164 | 2,218 |
| | 12 | 1,439 | 1,422 | 0,868 | 1,577 | 1,417 | 1,428 | 1,447 | 1,428 | 1,447 | 1,448 | 1,436 |
| Vertical | 7 | 2,409 | 2,413 | 2,409 | 2,410 | 2,408 | 2,410 | 2,409 | 2,408 | 2,410 | 2,409 | 2,409 |
| | 5 | 9,010 | 9,026 | 9,008 | 9,011 | 9,001 | 9,016 | 9,010 | 9,005 | 9,017 | 9,009 | 9,003 |
| Error global | | 10,942 | 10,439 | 10,640 | 8,133 | 8,566 | 9,896 | 10,941 | 10,916 | 10,942 | 10,942 | 9,912 |

| Error de FFT al cuadrado | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|-------------------|------------|------------|--------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| Dirección | Sensor | Error sensor | | | | | | | | | | |
| | | damping 4% cte | modo 11 | modo 12 | modo 13 | modo 14 | modo 15 | modo 16 | modo 17 | modo 18 | modo 19 | modo 20 |
| Longitudinal | 11 | 4,389 | 3,945 | 4,371 | 0,796 | 4,326 | 3,422 | 4,389 | 4,383 | 4,389 | 4,389 | 4,388 |
| | 8 | 25,891 | 23,060 | 25,772 | 3,203 | 25,518 | 20,028 | 25,893 | 25,855 | 25,891 | 25,891 | 25,880 |
| | 4 | 3,080 | 3,286 | 3,077 | 2,422 | 3,094 | 2,047 | 3,079 | 3,077 | 3,081 | 3,080 | 3,079 |
| Transversal | 10 | 4,603 | 4,588 | 4,336 | 4,431 | 0,830 | 4,550 | 4,603 | 4,598 | 4,603 | 4,603 | 4,604 |
| | 9 | 20,669 | 20,596 | 19,251 | 19,788 | 2,667 | 20,409 | 20,668 | 20,630 | 20,669 | 20,669 | 20,672 |
| | 6 | 2,203 | 2,199 | 2,140 | 2,145 | 1,391 | 2,176 | 2,204 | 2,208 | 2,203 | 2,203 | 2,205 |
| | 12 | 1,439 | 1,465 | 1,439 | 1,456 | 1,428 | 1,342 | 1,430 | 1,117 | 1,439 | 1,439 | 1,439 |
| Vertical | 7 | 2,409 | 2,410 | 2,409 | 2,430 | 2,412 | 2,413 | 2,409 | 2,410 | 2,409 | 2,409 | 0,574 |
| | 5 | 9,010 | 9,015 | 9,007 | 9,109 | 9,016 | 9,027 | 9,010 | 9,011 | 9,010 | 9,010 | 1,186 |
| Error global | | 10,942 | 10,802 | 10,876 | 10,969 | 10,586 | 10,823 | 10,937 | 10,839 | 10,639 | 10,941 | 12,957 |

| Error de FFT al cuadrado | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|-------------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Dirección | Sensor | FA | | | | | | | | | | |
| | | damping 4% cte | modo 1 | modo 2 | modo 3 | modo 4 | modo 5 | modo 6 | modo 7 | modo 8 | modo 9 | modo 10 |
| longitudinal | 11 | 1,941 | 1,920 | 1,940 | 1,941 | 1,940 | 1,921 | 1,941 | 1,939 | 1,877 | 1,941 | 2,392 |
| | 8 | 9,154 | 9,026 | 9,149 | 9,155 | 9,144 | 9,023 | 9,154 | 9,147 | 8,751 | 9,157 | 12,086 |
| | 4 | 2,484 | 1,552 | 2,490 | 2,483 | 2,494 | 1,962 | 2,485 | 2,484 | 2,812 | 2,484 | 2,557 |
| transversal | 10 | 1,625 | 1,621 | 1,619 | 1,628 | 1,569 | 1,623 | 1,624 | 1,606 | 1,622 | 1,624 | 1,630 |
| | 9 | 7,518 | 7,491 | 7,480 | 7,541 | 7,178 | 7,506 | 7,515 | 7,398 | 7,499 | 7,505 | 7,554 |
| | 6 | 2,228 | 2,227 | 1,973 | 2,342 | 1,026 | 2,224 | 2,222 | 2,575 | 2,234 | 2,240 | 2,225 |
| | 12 | 1,413 | 1,408 | 0,646 | 1,512 | 1,431 | 1,409 | 1,443 | 1,385 | 1,416 | 1,415 | 1,411 |
| vertical | 7 | 1,819 | 1,820 | 1,819 | 1,819 | 1,819 | 1,819 | 1,819 | 1,819 | 1,819 | 1,819 | 1,819 |
| | 5 | 10,982 | 10,989 | 10,981 | 10,983 | 10,974 | 10,982 | 10,982 | 10,982 | 10,979 | 10,983 | 11,032 |

| Error de FFT al cuadrado | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|-------------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|------------|------------|--------------|
| Dirección | Sensor | FA | | | | | | | | | | |
| | | damping 4% cte | modo 11 | modo 12 | modo 13 | modo 14 | modo 15 | modo 16 | modo 17 | modo 18 | modo 19 | modo 20 |
| longitudinal | 11 | 1,941 | 1,813 | 1,936 | 0,864 | 1,922 | 1,650 | 1,941 | 1,939 | 1,941 | 1,941 | 1,939 |
| | 8 | 9,154 | 8,331 | 9,125 | 2,268 | 9,042 | 7,396 | 9,154 | 9,144 | 9,154 | 9,154 | 9,071 |
| | 4 | 2,484 | 2,588 | 2,484 | 2,145 | 2,508 | 1,814 | 2,484 | 2,496 | 2,483 | 2,484 | 2,482 |
| transversal | 10 | 1,625 | 1,623 | 1,568 | 1,604 | 0,763 | 1,618 | 1,625 | 1,625 | 1,625 | 1,625 | 1,625 |
| | 9 | 7,518 | 7,506 | 7,127 | 7,364 | 1,986 | 7,469 | 7,518 | 7,516 | 7,518 | 7,518 | 7,519 |
| | 6 | 2,228 | 2,227 | 2,183 | 2,233 | 1,595 | 2,229 | 2,229 | 2,235 | 2,228 | 2,228 | 2,229 |
| | 12 | 1,413 | 1,416 | 1,413 | 1,419 | 1,411 | 1,413 | 1,402 | 1,053 | 1,413 | 1,413 | 1,413 |
| vertical | 7 | 1,819 | 1,819 | 1,819 | 1,824 | 1,821 | 1,820 | 1,819 | 1,819 | 1,819 | 1,819 | 1,047 |
| | 5 | 10,982 | 10,970 | 10,983 | 10,919 | 10,995 | 10,964 | 10,982 | 10,982 | 10,982 | 10,982 | 2,453 |

Tabla 4.23 Frecuencias modelo final.

| Modo | Periodo | Frecuencia | Damping | UX | UY | UZ | SumUX | SumUY | SumUZ |
|------|---------|------------|---------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | Sec | 1/sec | % | | | | | | |
| 1 | 0,790 | 1,266 | 20 | 0,1367 | 0,0000 | 0,0000 | 0,137 | 0,000 | 0,000 |
| 2 | 0,754 | 1,327 | 6 | 0,0000 | 0,0743 | 0,0000 | 0,137 | 0,074 | 0,000 |
| 3 | 0,697 | 1,434 | 4 | 0,0000 | 0,0569 | 0,0000 | 0,137 | 0,141 | 0,000 |
| 4 | 0,686 | 1,458 | 4 | 0,0152 | 0,0000 | 0,0000 | 0,152 | 0,141 | 0,000 |
| 5 | 0,643 | 1,555 | 4 | 0,0000 | 0,0001 | 0,0000 | 0,152 | 0,141 | 0,000 |
| 6 | 0,600 | 1,668 | 10 | 0,0656 | 0,0000 | 0,0000 | 0,218 | 0,200 | 0,000 |
| 7 | 0,382 | 2,619 | 20 | 0,2291 | 0,0000 | 0,0000 | 0,678 | 0,443 | 0,000 |
| 8 | 0,373 | 2,683 | 20 | 0,0000 | 0,2012 | 0,0000 | 0,678 | 0,644 | 0,000 |
| 9 | 0,172 | 5,800 | 4 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0326 | 0,942 | 0,950 | 0,033 |
| 10 | 0,127 | 7,864 | 20 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0984 | 0,943 | 0,950 | 0,162 |

4.3.6 Comentarios

El alto valor de la razón de amortiguamiento, determinado para los modos 7, 8 y 10, se debe a la falta de rigidez de los capiteles del modelo que se observa al correr el análisis en el tiempo con el sismo del 27/02/10. Estos modos corresponden al capitel de la columna estación del tramo instrumentado, en la dirección longitudinal, transversal y vertical respectivamente. Además, estos modos influyen en la deformación de los apoyos de neopreno de dicho capitel, por lo que sin un alto amortiguamiento en estos modos, los aisladores se deforman incluso más de un 100%, lo que no es factible.

De igual manera se obtiene un alto amortiguamiento para el modo 1 del modelo, el cual corresponde a un modo que afecta prácticamente a toda la estructura, especialmente la sección viga losa de la estructura en la dirección longitudinal. En esta dirección se encuentra el sistema viga - riel y riel - capitel de la estructura, lo que puede ser la causa del alto amortiguamiento en dicha dirección. Por otro lado esto es consecuente con lo analizado por Moroni et al (ref. 4), donde en la dirección longitudinal obtuvo un alto amortiguamiento.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Desde su construcción, el viaducto del metro no ha estado sometido a solicitaciones sísmicas mayores a las ocurridas durante el sismo del 27/02/2010, y gracias a la instrumentación existente se ha obtenido información valiosa para estudiar su comportamiento ante dichas acciones, lo que se ha realizado en este trabajo de título.

Análisis de aceleraciones máximas

Al comparan las aceleraciones máximas obtenidas durante todo el período, se observa que existe (en general) amplificación de las aceleraciones desde la cepa a la viga en la dirección longitudinal. Para el sismo del 27/02/10 el factor de amplificación es prácticamente igual a uno.

En la dirección transversal, se observa una disminución de las aceleraciones entre la viga y el tope de la columna para todo nivel de excitación, excepto para el sismo de mayor amplitud y sismos pequeños menores a 0,007g. Esto es consecuente con lo encontrado por Quintana, donde obtuvo factores de amplificación menores a uno en general, excepto en sismos menores a 0,006g.

En la dirección vertical se observan factores de amplificación mayores a uno para todo nivel de excitación, entre la viga y el tope de la columna, y se obtienen mayores valores para los sismos de menor intensidad ($< 0,004g$).

Los factores de amplificación entre la base de la fundación y el campo libre (en general), son iguales o menores a uno, en ambas direcciones horizontales. De todas formas, la variación del factor de amplificación es cercana a uno para todo nivel de excitación, lo que indica un bajo nivel de interacción suelo estructura.

En las tres direcciones del análisis, se observa una amplificación de las aceleraciones desde la base hasta el tope de la columna, para todo nivel de excitación.

Para el sismo del 27/02/10, los registros fueron tomados sin el paso del tren, por la hora del evento sísmico; sin embargo, resulta conveniente saber si alguno de los registros posteriores al sismo principal fue tomado con el paso del tren, para determinar su influencia en las aceleraciones máximas obtenidas en los distintos puntos de la estructura.

Determinación de las propiedades dinámicas de la estructura

En los espectros de densidad de potencia se observa mayor energía en los sensores correspondientes al tope de la columna y la viga, en todas las direcciones del análisis. El contenido de frecuencias es variable. En la parte superior de la columna, se observa una acumulación de energía entre 6,5 y 8 Hz., mientras que en la viga, la acumulación de energía es entre 0 y 3 Hz, en la dirección longitudinal. Transversalmente, ocurre algo similar al caso longitudinal, aunque en la viga la acumulación de energía es entre 0,5 y 1,5 Hz. En la dirección vertical, se obtiene una clara acumulación de energía cercana a los 2,5 Hz. en la viga, y es mucho mayor que la obtenida en el resto de la estructura.

Por otra parte, del análisis de los espectros al cuadrado, se identifican claramente tres modos en la dirección longitudinal; uno cercano a 1,43 Hz, observable en el canal de la viga; otro en 2,5 Hz, presente en el sensor de la viga y el tope de la columna; y el último en 6,9 Hz, en el sensor 8.

En la dirección transversal se observan dos modos claramente; uno en 1,25 Hz en la viga; y otro en 6,76 Hz, en la columna.

En la dirección vertical, al igual que en la dirección longitudinal, se identifica un modo cercano a 2,5 Hz, lo que indica un grado de acoplamiento para este modo en la estructura. Se encuentra otro modo en 5,1 Hz, presente en la columna y la viga.

Las funciones de transferencia corroboran la información de los espectros de densidad de potencia, respecto a las frecuencias modales encontradas en las tres direcciones del análisis, y se observa además la variación de las frecuencias modales de la estructura debido a la no linealidad de ésta.

Las funciones de fase en la dirección longitudinal, indican que la frecuencia cercana a 1,43 Hz está en fase entre algunos sensores de la columna y la señal excitante, por lo que corresponde a un modo fundamental de la estructura. Lo mismo ocurre con la frecuencia de 2,5 Hz, donde la fase entre algunos sensores longitudinales es cercana a cero y/o 180°. Se encuentra también un peak cercano a 7,45 con desfase de 180° entre algunos sensores.

En la dirección transversal, las funciones de fase indican en general fase entre los sensores correspondientes a la columna y la señal excitante, y mayor desfase entre los sensores de la viga y la columna.

Ajuste y calibración del modelo matemático

El ajuste del modelo indica gran influencia de la rigidez de los apoyos de neopreno y la rigidez del suelo de fundación, en los valores de las frecuencias que representan movimientos de la viga y columnas respectivamente. Además las propiedades del hormigón de las fundaciones de la estructura, influyen en las frecuencias verticales.

Se ha conseguido un modelo matemático cuyos modos coinciden con los encontrados experimentalmente, sobre todo los dos primeros modos en la dirección longitudinal y transversal, respectivamente.

Al realizar análisis no lineal de la estructura y variar la razón de amortiguamiento de ésta, se logró ajustar la respuesta del modelo a la respuesta real de la estructura. El mejor ajuste se obtuvo usando un 20% de amortiguamiento, sin embargo, haciendo un análisis más fino, se observó que la modelación del capitel juega un rol importante en la respuesta del modelo. De no utilizar amortiguamientos del orden de 20% en los modos correspondientes al capitel, la deformación de los apoyos supera el 100%, lo que no es factible.

Finalmente se realizó un análisis con amortiguamientos modales variables entre 4% y 20%, de donde se concluyó que el modo 1 requiere 20% de amortiguamiento, probablemente debido a la influencia de los rieles a lo largo del viaducto, y la presencia de la estación Mirador, cercana al tramo instrumentado.

Al comparar las aceleraciones y desplazamientos del modelo realizado con lo obtenido experimentalmente, se ratifica la efectividad del modelo realizado, sin embargo, existen diferencias en el contenido de frecuencias de los registros de los sensores que corresponden a la parte superior de la columna estación. En tales puntos el modelo indica una acumulación de energía cercana a los 2,5 Hz, y casi nulo contenido de energía en frecuencias superiores, en ambas direcciones horizontales, mientras que experimentalmente se tiene una acumulación de energía aún mayor en frecuencias superiores a 2,5 Hz. Lo contrario ocurre en la dirección vertical para el sensor de la viga, donde se obtuvo mediante el análisis modal una acumulación de energía cercana a los 2,5 Hz, y en el modelo, acumulación de energía para frecuencias superiores a 6 Hz.

La diferencia en los espectros de Fourier al cuadrado en cierto puntos de la estructura se puede deber a la influencia dinámica de la estación mirador y/o los rieles del viaducto.

En términos generales el modelo logra reproducir lo obtenido experimentalmente, para el sismo del 27/02/10.

Recomendaciones

Estudiar un sismo de menor intensidad para verificar que los amortiguamientos altos obtenidos al analizar el sismo del 27/02/10, son debido a la magnitud del sismo analizado, y que para sismos de menor intensidad estos amortiguamientos son menores, como los encontrados en trabajos anteriores (ref. 1 y ref. 2).

Dependiendo del punto anterior, modificar la modelación del capitel del modelo, ya que esto tiene gran influencia en los amortiguamientos del modelo, y por ende en la respuesta de éste para un sismo de la magnitud del analizado en este trabajo.

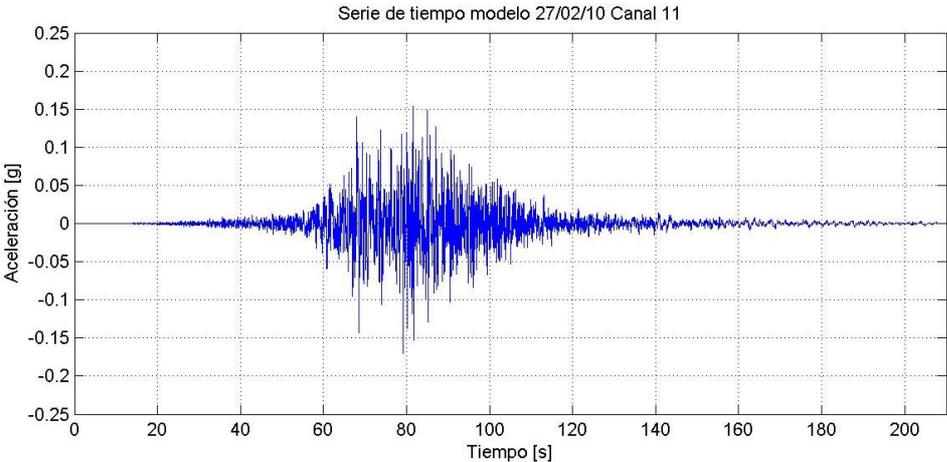
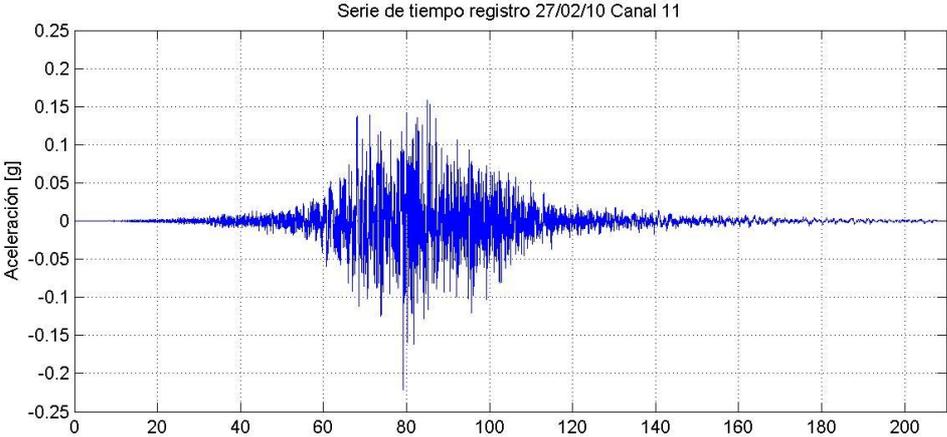
Es importante conocer la influencia dinámica de la estación Mirador, rieles del viaducto y/o mecanismos de restricción del movimiento que posea el viaducto, en la respuesta dinámica de la estructura, ya que estos factores podrían ser la causa de la gran diferencia en el contenido de frecuencias de algunos espectros de densidad de potencia, en algunos puntos de la estructura.

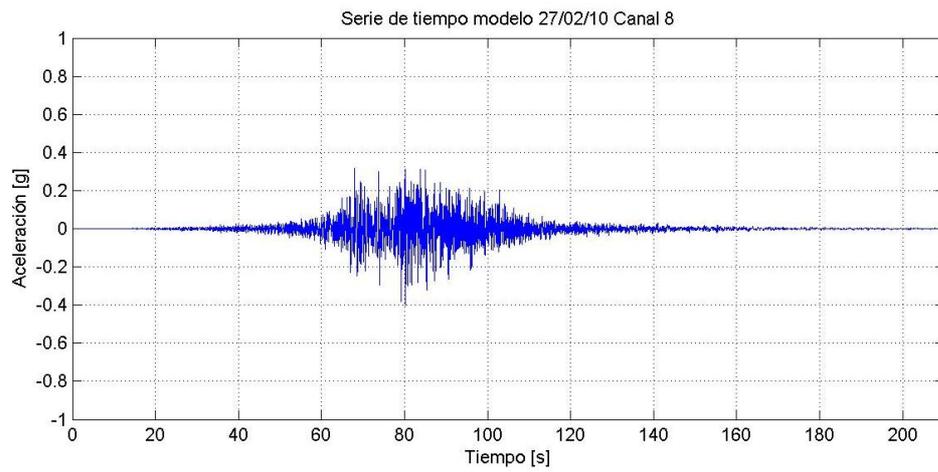
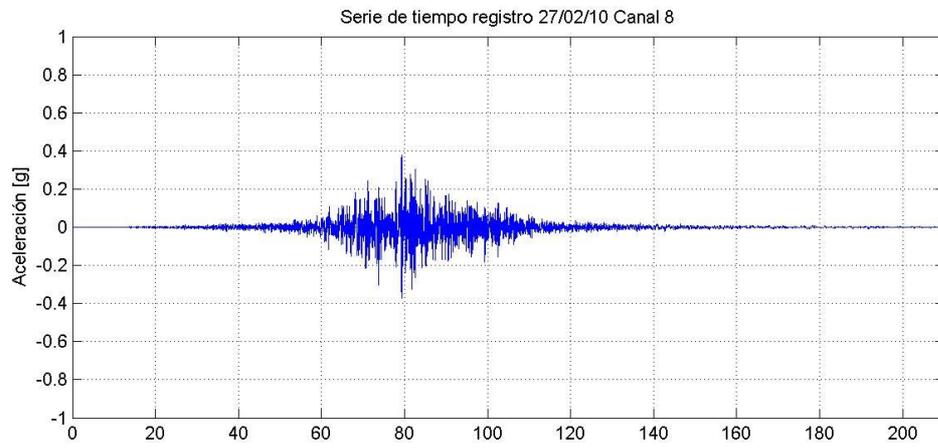
REFERENCIAS

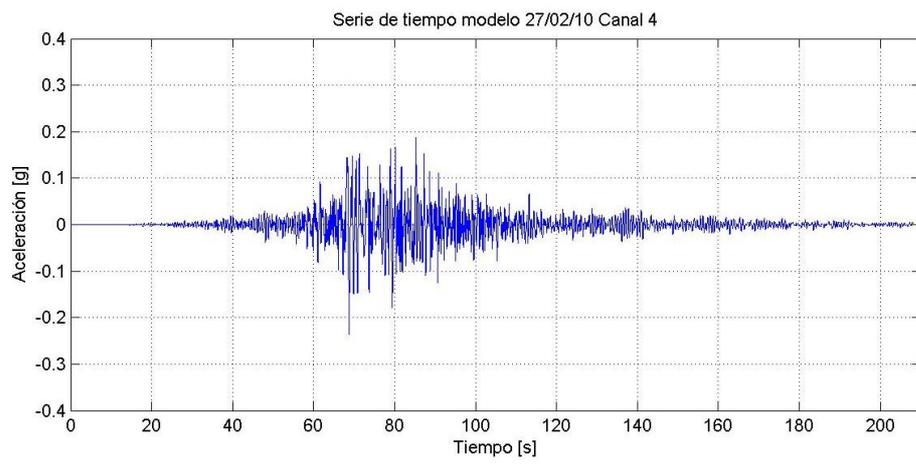
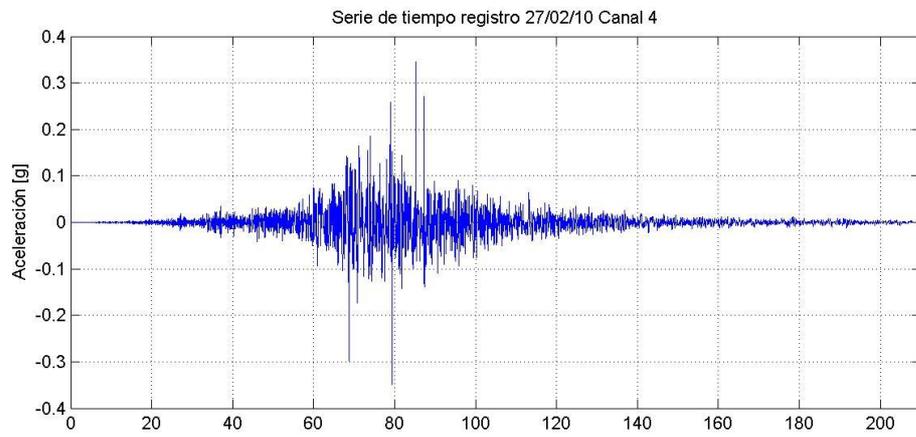
1. Valdebenito R. A., 1999, “Análisis de registros de vibraciones sísmica y ambiental en la línea elevada cinco del metro”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil - Universidad de Chile.
2. Quintana J. T., 2001, “Análisis de la línea elevada cinco del metro a partir de registros sísmicos”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil - Universidad de Chile.
3. Tanaka, T., Yoshizawa, S., Osawa, Y., and Morishita, T., 1969. “Period and damping of vibration in actual building modes”. Bull Earthquake Research Institute.v 47, p 1073-1092.
4. Moroni, M., Sarrazin, M., Soto, P. “Behavior of Instrumented Base-Isolated Structures during the 2010-02-27 Chile Earthquake”. Earthquake Spectra (en revisión) 2012.
5. Chopra, A. K., 2001, “Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering”, 2nd Ed.
6. Naeim F., Kelly J. M., 1999, “Design of Seismic Isolated Structures”. John Wiley, New York, U. S. A.
7. Legrand, D., 2005, “Series de tiempo y Tratamiento de Señales”, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

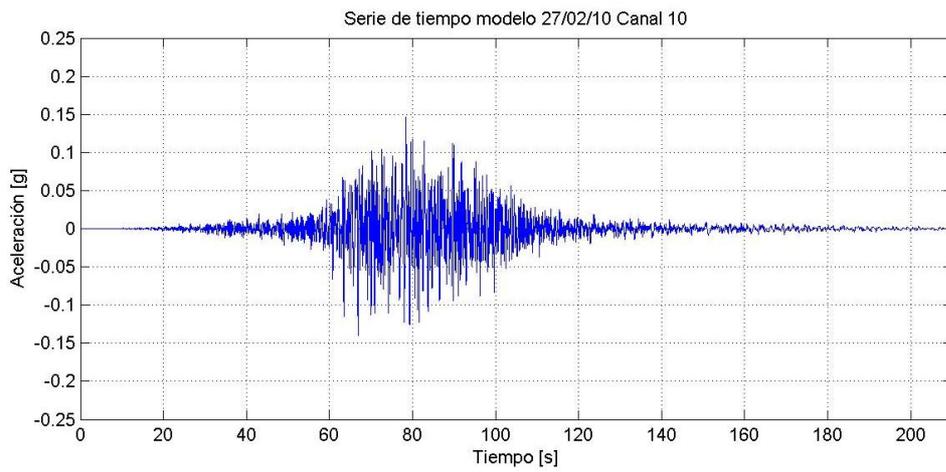
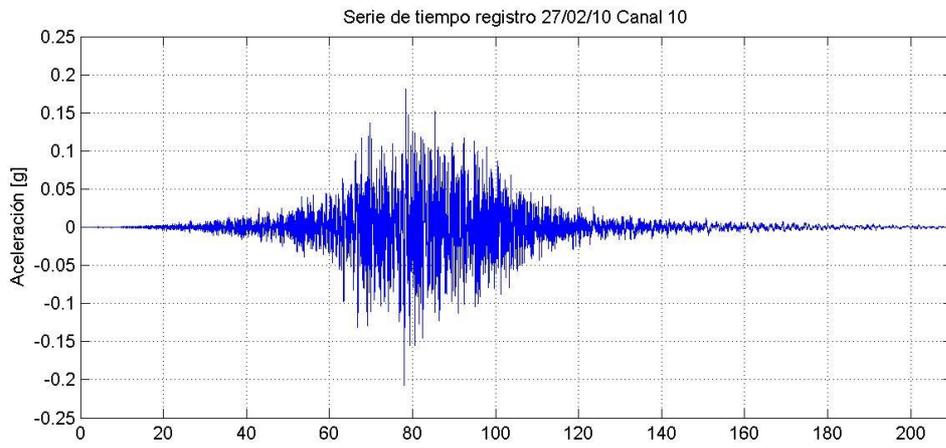
ANEXOS

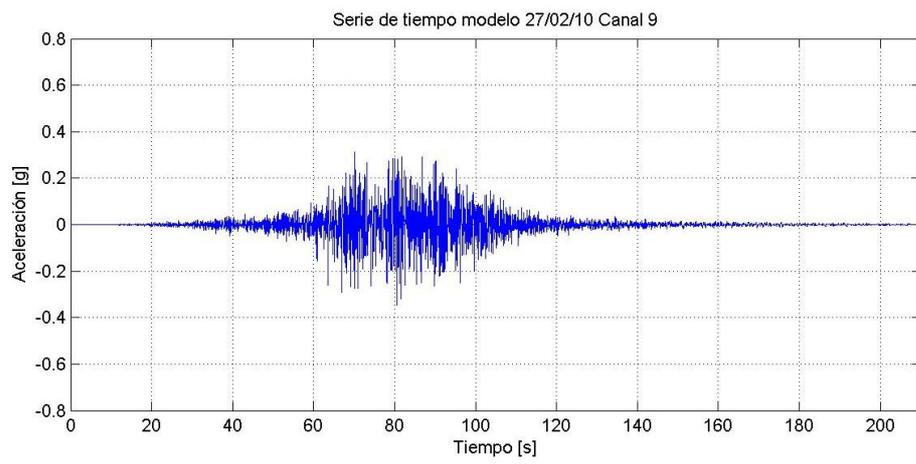
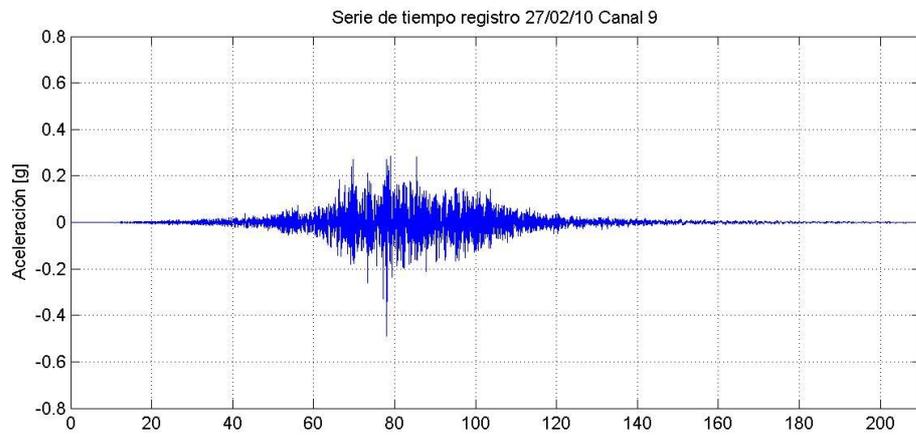
Series de tiempo de aceleración del modelo

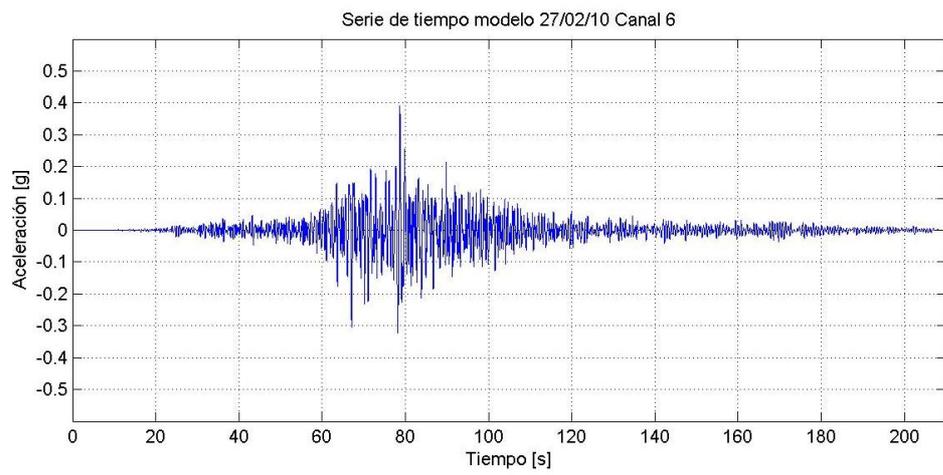
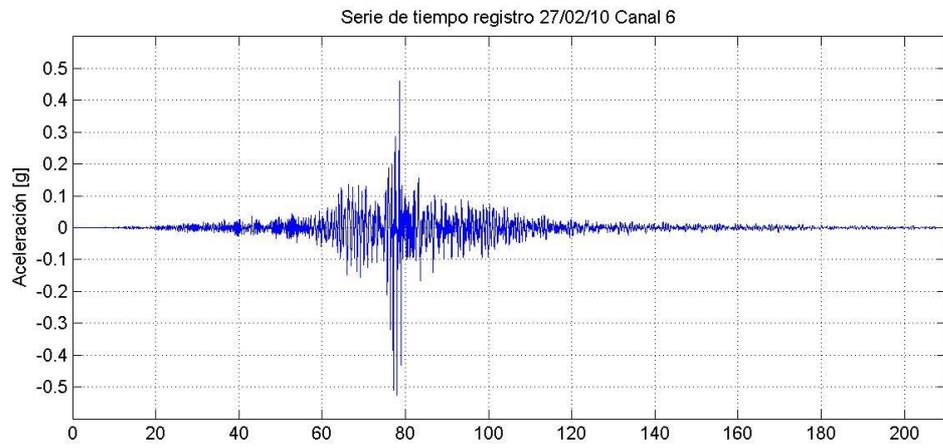




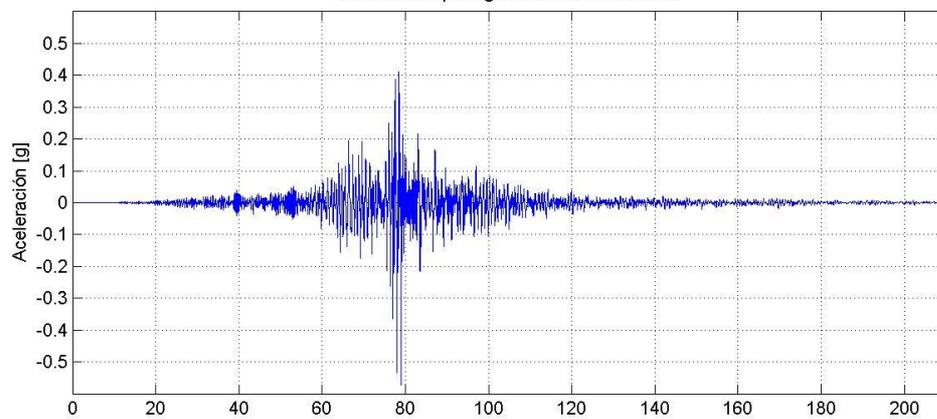




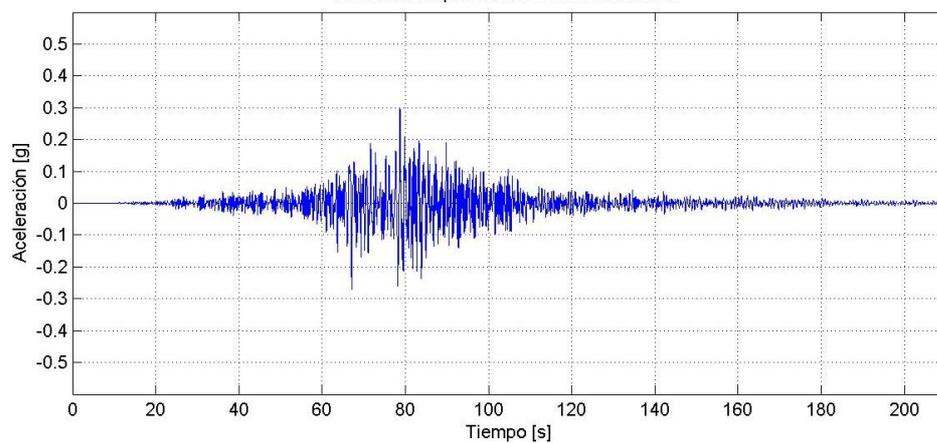


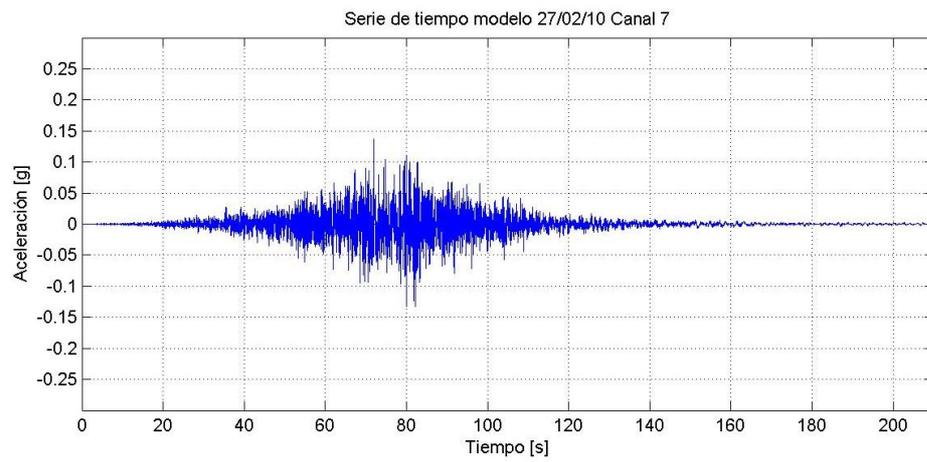
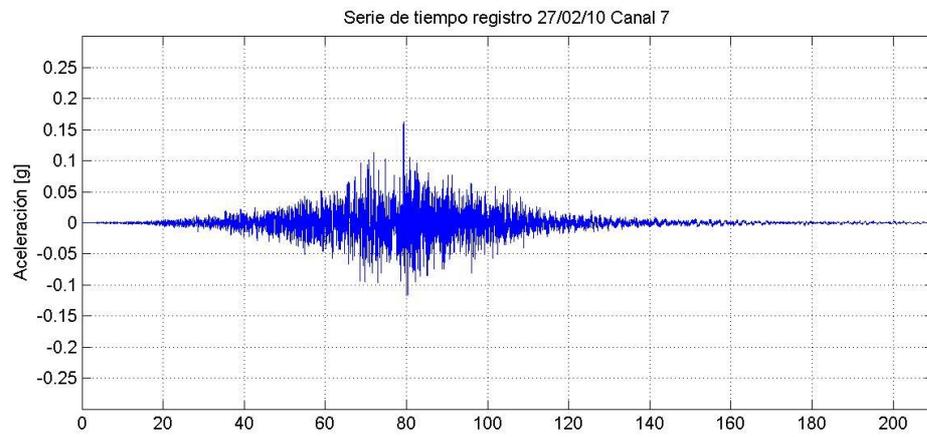


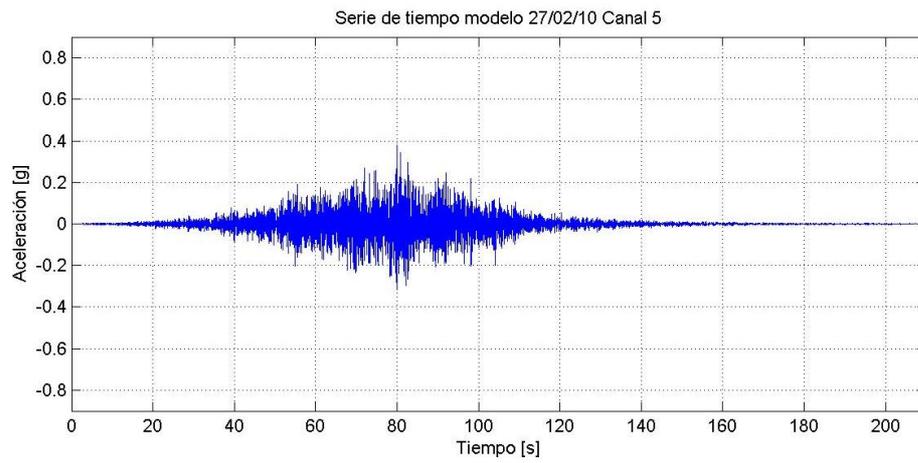
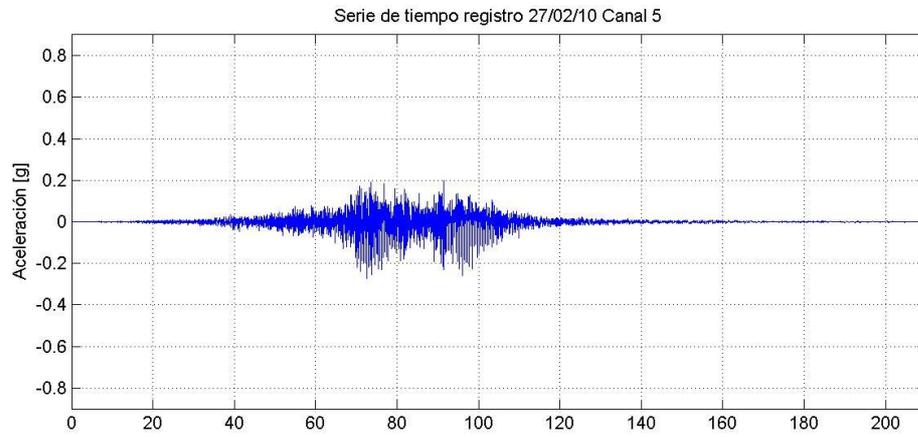
Serie de tiempo registro 27/02/10 Canal 12



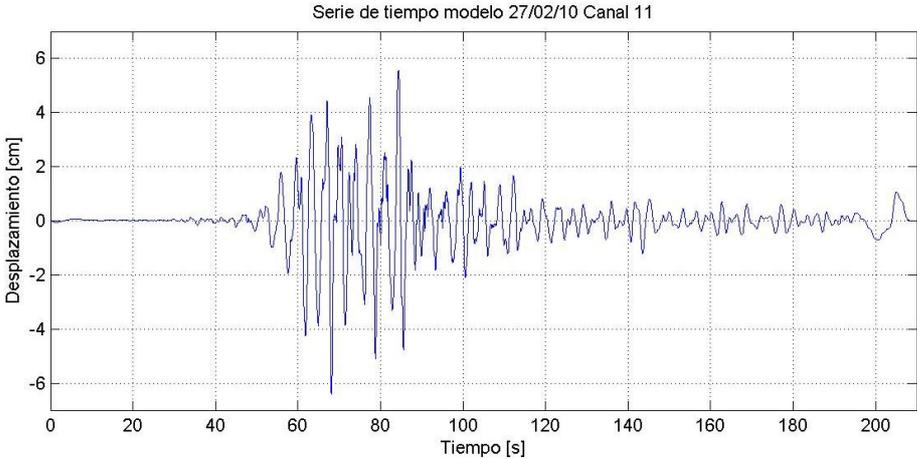
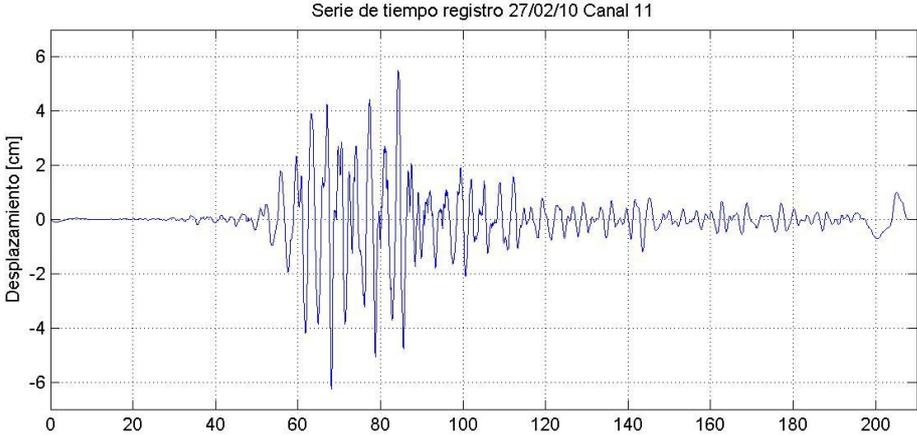
Serie de tiempo modelo 27/02/10 Canal 12



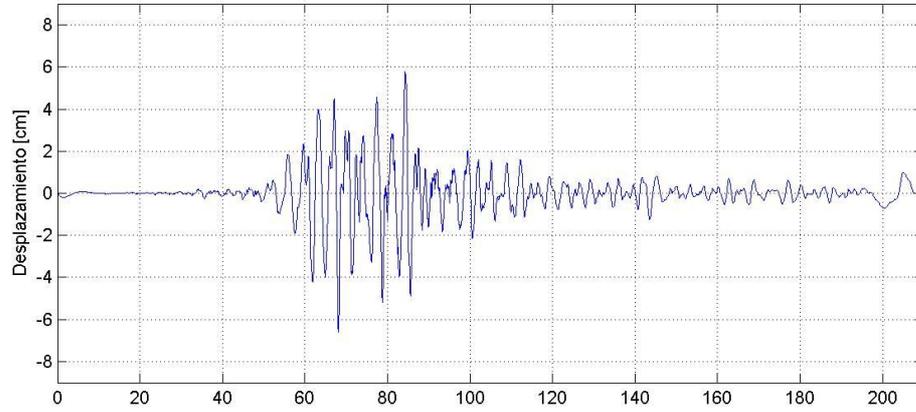




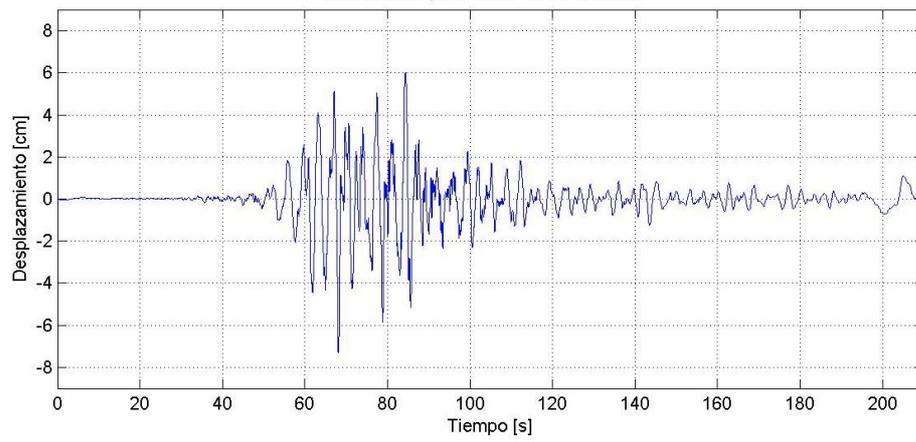
Series de tiempo de desplazamiento del modelo

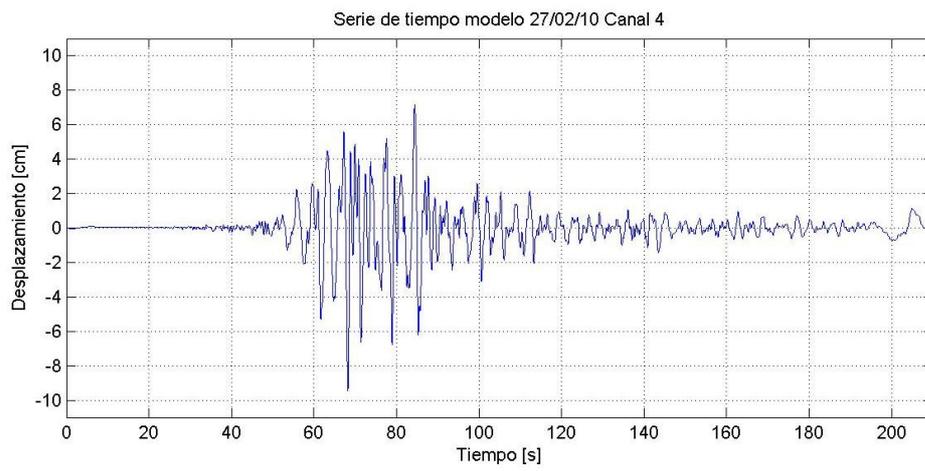
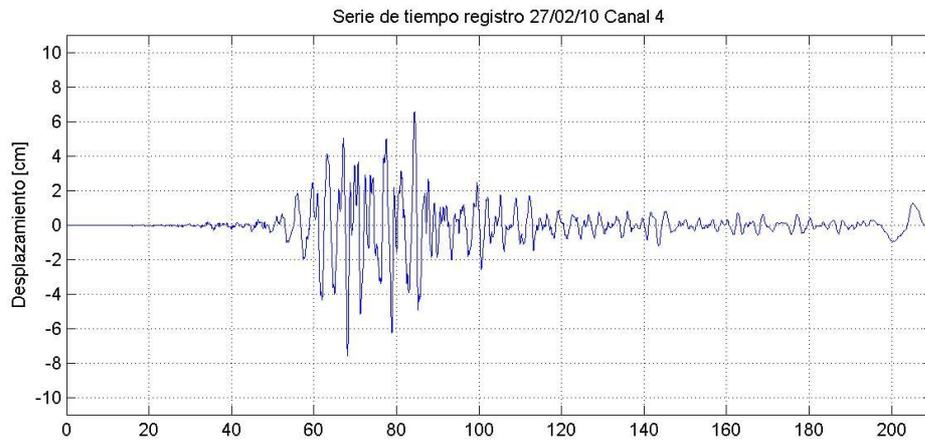


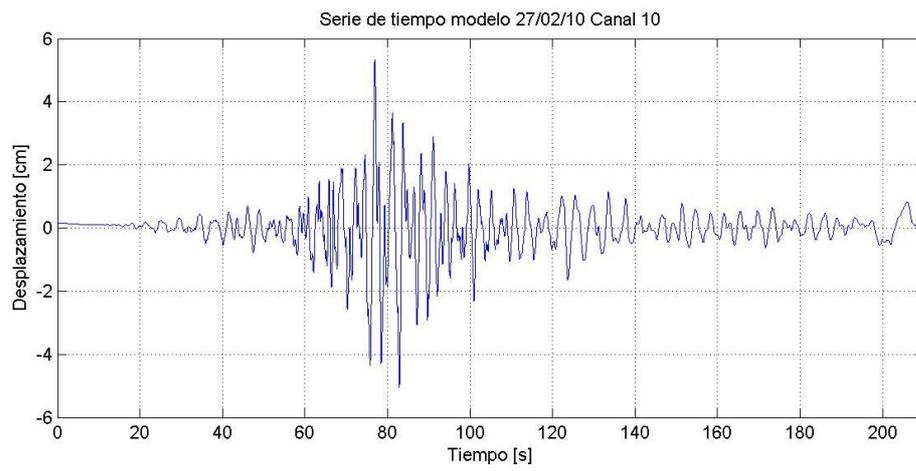
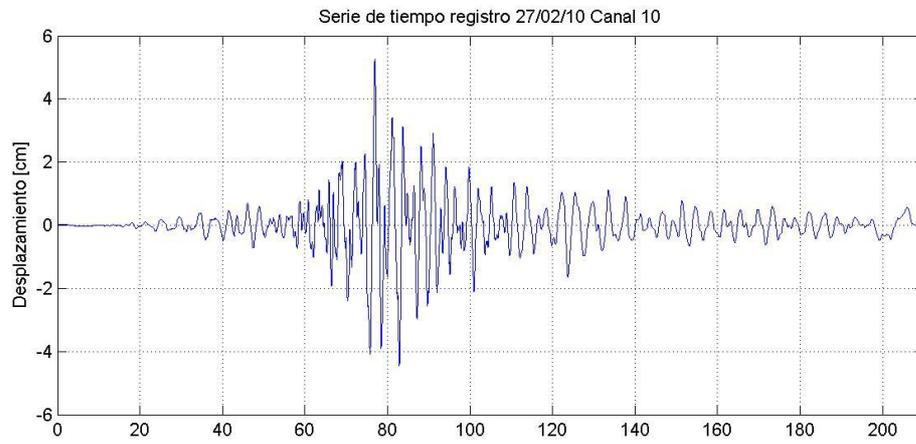
Serie de tiempo registro 27/02/10 Canal 8



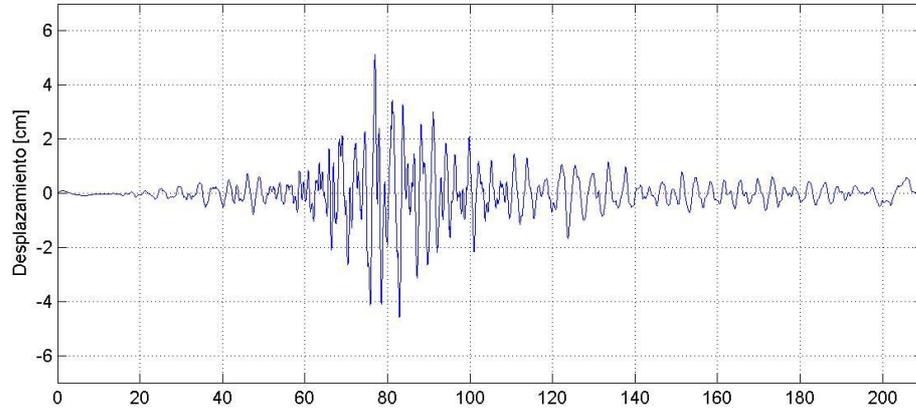
Serie de tiempo modelo 27/02/10 Canal 8



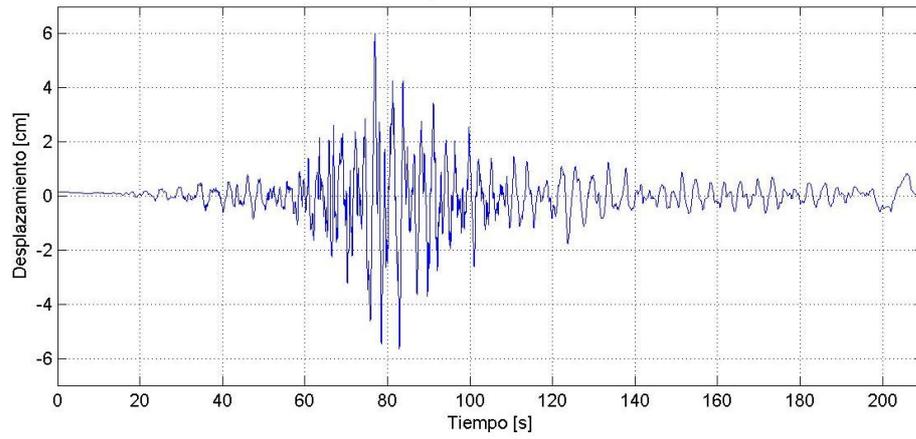


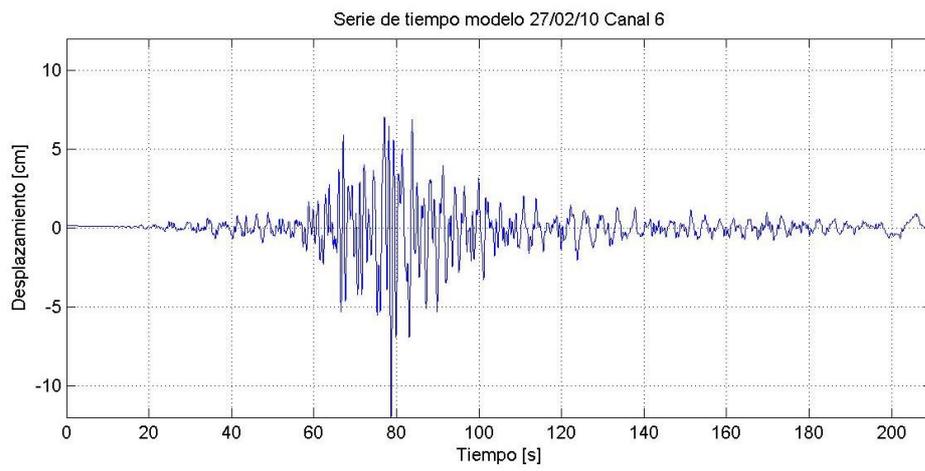
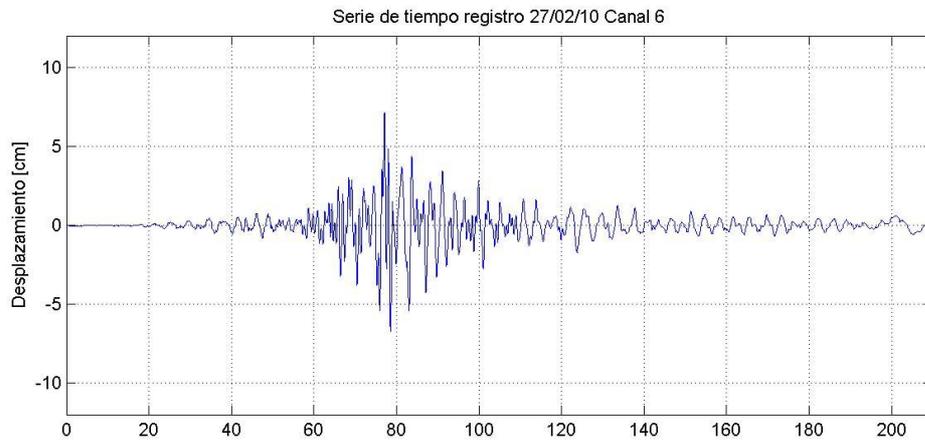


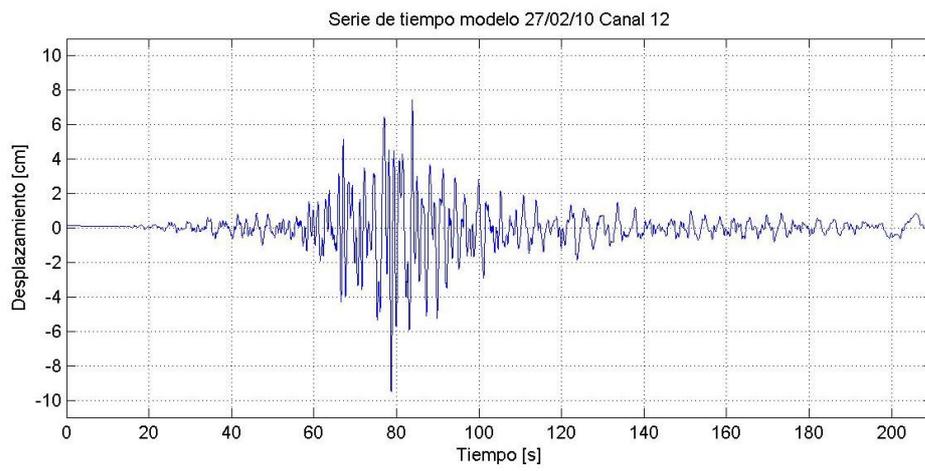
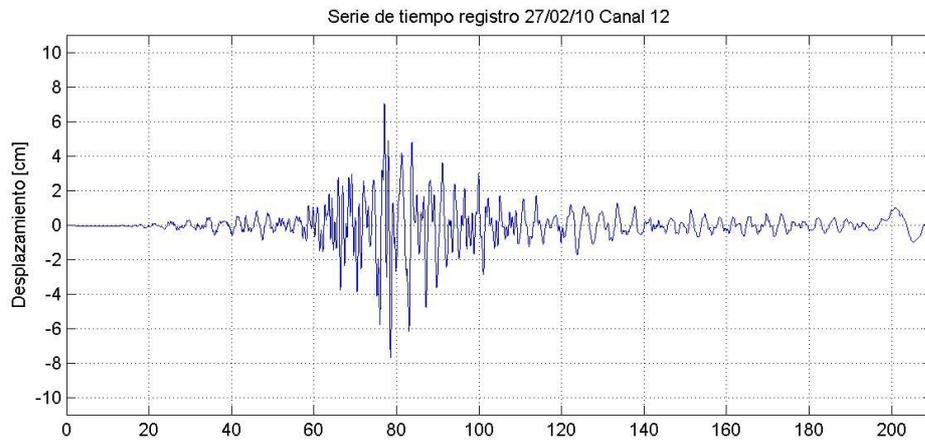
Serie de tiempo registro 27/02/10 Canal 9

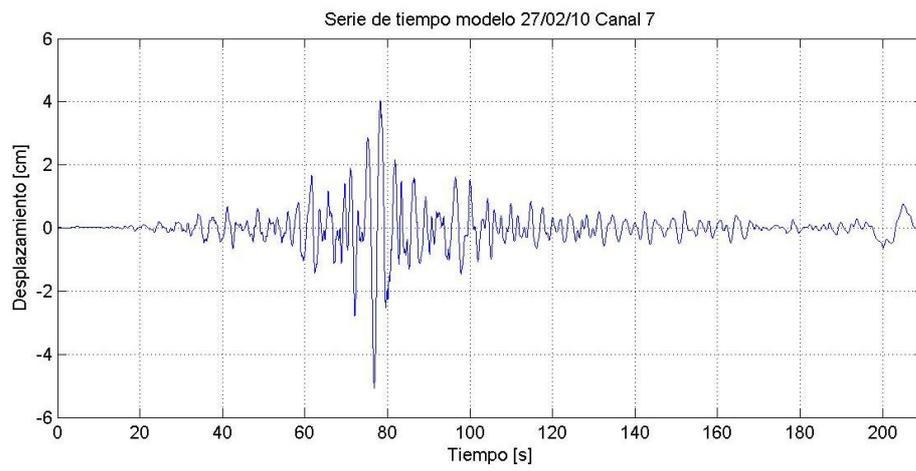
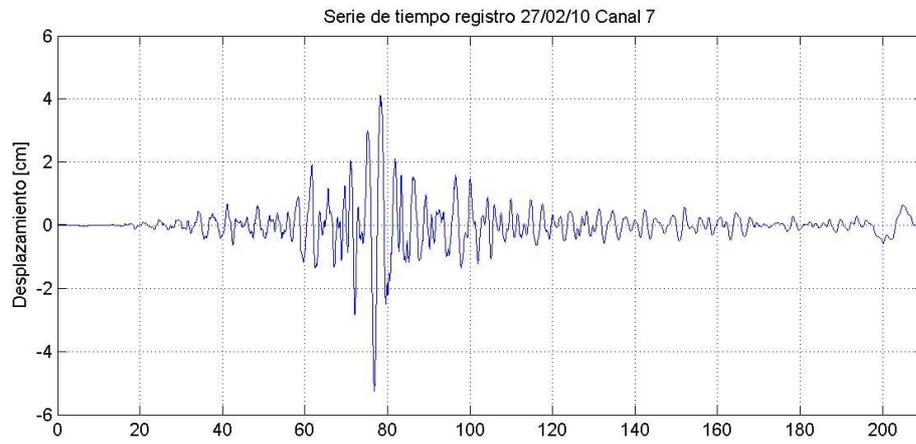


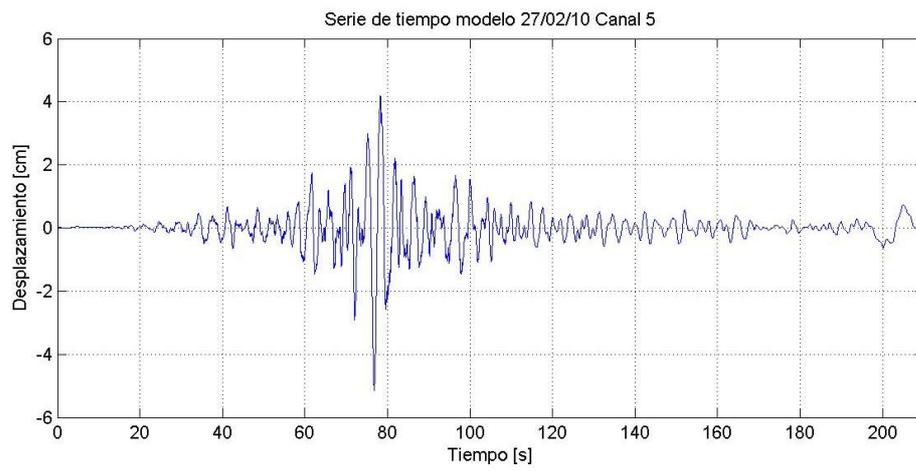
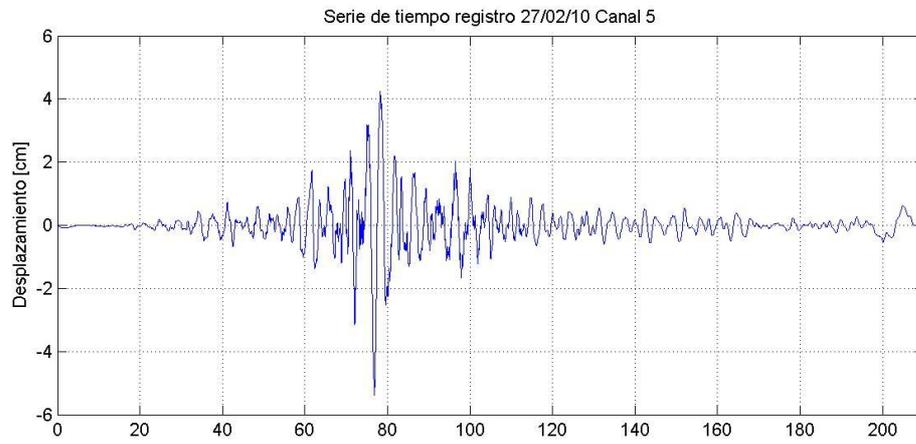
Serie de tiempo modelo 27/02/10 Canal 9











Series de tiempo de espectros de densidad de potencia

