

Tesis defendida por

María José Calvillo Castorena

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Carlos Isidro Huerta López

Codirector del Comité

Dr. Fortunato Espinoza Barreras

Codirector del Comité

Dr. Raúl Ramón Castro Escamilla

Miembro del Comité

Dr. Pedro Gilberto López Mariscal

Miembro del Comité

Dr. Antonio González Fernández

Coordinador
Programa de Posgrado en Ciencias
de la Tierra

Dr. Jesús Favela Vara

Encargado del despacho de la
Dirección de Estudios de Posgrado

Septiembre de 2013.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



Programa de Posgrado en Ciencias
en Ciencias de la Tierra

Caracterización de propiedades dinámicas del puente Manantiales y del terreno en su
vecindad usando registros de vibración ambiental, y modelado numérico

Tesis

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

María José Calvillo Castorena

Ensenada, Baja California, México

2013

Resumen de la tesis de María José Calvillo Castorena, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Sismología.

Caracterización de propiedades dinámicas del puente Manantiales y del terreno en su vecindad usando registros de vibración ambiental, y modelado numérico

Resumen aprobado por:

Dr. Carlos Isidro Huerta López

Codirector de tesis

Dr. Fortunato Espinoza Barreras

Codirector de tesis

Las frecuencias fundamentales obtenidas de manera experimental al centro de los claros C1, C2, y C3 fueron 2.92Hz, 2.84Hz y 2.99Hz respectivamente. El claro C2 mostró un valor ligeramente menor de su frecuencia fundamental con respecto a los claros C1 y C3, pudiendo ser indicador de condiciones estructurales de menor rigidez. La frecuencia fundamental obtenida en la intersección de los claros C1 y C2 fue de 3.03Hz, mientras que en la intersección de los claros C2 y C3 fue de 3.05Hz. El promedio general de la frecuencia fundamental del puente estimada experimentalmente fue de 2.94Hz mientras que la frecuencia del primer modo de vibración obtenida teóricamente fue de 3.34Hz. El amortiguamiento estimado al centro del claro C2 fue de 5.1% y de 2.7% al centro del claro C3, por lo que se infiere que el claro C2 disipa mayor cantidad de energía que el claro C3. El patrón del comportamiento de las deflexiones teóricas y experimentales mostró un comportamiento semejante.

Con respecto al terreno en la vecindad de la estructura, el punto P3 (ubicado a 17.0m aguas arriba del cuerpo B) presentó la mayor frecuencia fundamental (8.63 Hz), obtenida experimentalmente, mientras que en el punto P2 (localizado bajo el centro del cuerpo B) se estimó una frecuencia preferencial de vibración de 6.83Hz. En el punto P4 (localizado a 15.0m aguas abajo del cuerpo A) se estimó una frecuencia de 7.13 Hz y en el punto P1 (ubicado entre el cuerpo A y B) una frecuencia de 8.39 Hz.

Se identificó que la frecuencia preferencial de vibración del puente y del terreno que lo rodea difieren por al menos un factor de dos, por lo que no se espera que se presente el fenómeno de resonancia.

Palabras clave: **Vibración ambiental, deflexiones, cocientes espectrales.**

Abstract of the thesis presented by María José Calvillo Castorena as a partial requirement to obtain the Master or Doctor in Science degree in Earth Science with orientation in Seismology.

Characterization of the dynamic properties of the Manantiales bridge and the site that surrounds it using ambient vibration measurements, and numerical modeling

Abstract approved by:

Dr. Carlos Isidro Huerta López

Codirector de tesis

Dr. Fortunato Espinoza Barreras

Codirector de tesis

The fundamental frequencies obtained experimentally at center of the spams C1, C2, and C3 were 2.92Hz, 2.84Hz, 2.99Hz, respectively. The spam C2 showed a slightly lower value of its fundamental frequency with respect to the spams C1 and C3, which may be indicative of structural conditions of lower rigidity than spams C1 and C3. The fundamental frequency obtained in the intersection of spams C1 and C2 was 3.03Hz, while at the intersection of the spams C2 and C3 was 3.05Hz. The general average of the fundamental frequency of the bridge estimated experimentally was 2.94Hz, while the frequency of the first mode of vibration obtained theoretically was 3.34Hz. The damping estimated at center of spam C2 was 5.1% and 2.7% at center of spam C3, by which it can be inferred that spam C2 dissipates more energy than spam C3. The pattern of the behavior of the theoretical and experimental deflections showed a similar behavior.

With respect to the site conditions in the vicinity of the structure, point P3 (located 17.0m upstream of body B) had the highest fundamental frequency obtained experimentally (8.63Hz), while at point P2 (located under the center of body B) the fundamental frequency of vibration estimated was 6.83Hz. At point P4 (situated 15.0m downstream of body A) a fundamental frequency of 7.13 Hz was estimated and 8.39Hz at point P1 (located between part A and B).

It was identified that the preferential frequency of vibration of the bridge and the site that surrounds it differ at least by a factor of two, resonance phenomenon is not expected to happen.

Keywords: ambient vibration measurement, deflections, H/V spectral ratio.

Dedicatoria

A mis amores y a Dios.

Agradecimientos

A mi madre Esperanza por su inigualable ayuda, a mi padre “Loreto” Calvillo por su incondicional apoyo, a mis hermanos Baudel, Wilfredo, Minerva, Consuelo, Vinicio y Patricia quienes de una manera muy particular me brindaron su confianza, inspiración y motivación. De manera muy especial, agradezco a mis sobrinos por compartir conmigo su reconfortante alegría y sus locuras.

A mis directores Carlos I. Huerta López por guiar este trabajo y a Fortunato Espinoza Barreras por su ayuda y por sus invaluable enseñanzas.

Al Ing. Manuel Esparza Fuentes por brindar su apoyo incondicional en la realización de esta tesis, al Ing. Ramón Salazar por compartir sus conocimientos, al Ing. Isaul Garrido Cueto de CAPUFE, a la Dra. Idalmis Fernández Heredia y a la UABC por su ayuda en la toma de mediciones de vibración ambiental.

También quiero agradecer a mis maestros Luis Munguía Orozco, Antonio Vidal Villegas, Raúl Castro Escamilla, Alfonso Reyes Zamora, Pratap Sahay Sahay, Alejandro Nava Pichardo, Jonas De Basabe Delgado, Victor Wong Ortega, Carlos Flores Luna y Margarita López Martínez por sus valiosas enseñanzas. A CONACyT por la beca y a CICESE por su amable apoyo.

Gracias a mis grandes amigos por regalarme sus maullidos cada día y por su grata compañía.

Contenido	Página
Resumen español	i
Resumen inglés	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Descripción general.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Organización de la tesis.....	5
Capítulo 2. Región donde se localiza la estructura de estudio.....	6
2.1 Descripción de la región.....	6
2.2 Descripción de la geología regional.....	10
2.3 Descripción de la estructura.....	12
2.3.1 Datos geométricos y estructurales.....	12
2.3.2 Condición general del puente.....	14
2.4 Descripción del suelo donde se ubica el puente.....	15
Capítulo 3. Datos, métodos a utilizar y antecedentes.....	18
3.1. Datos.....	20
3.1.1 Equipo de medición.....	20
3.1.1.1 Diagramas de conexión del equipo.....	21
3.1.1.2 Grabadora de registro.....	22
3.1.1.3 Sensores.....	23
3.1.1.4 Computadora, baterías y cables.....	24
3.1.2 Mediciones de vibración ambiental.....	24
3.1.3 Ubicación de los sensores y registro del paso de vehículos.....	26
3.1.3.1 Registro del tipo de vehículos.....	27
3.1.3.2 Primer arreglo.....	28
3.1.3.3 Segundo arreglo.....	29
3.1.3.4 Tercer arreglo.....	30
3.1.3.5 Cuarto arreglo.....	31
3.1.3.6 Quinto arreglo.....	32
3.2 Métodos de procesado y análisis de datos.....	34
3.2.1 Espectros de Fourier.....	34
3.2.2 Espectros de densidad de potencia (PSD).....	35
3.2.3 Cocientes espectrales (HVSR).....	35
3.2.4 Técnica del Decremento Aleatorio (TDA).....	36
3.2.5 Deflexiones teóricas y experimentales.....	39
3.2.5.1 SMA.....	40
3.3 Modelado Numérico.....	40
3.3.1 SAP2000.....	41
3.3.2 Propagación de ondas con el método de matrices de rigidez.....	42
Capítulo 4. Procesado de datos.....	43
4.1 Secuencia del procesado de datos.....	43
4.1.1 Preparación para procesamiento de datos.....	44

4.1.2 Corrección de línea base.....	44
4.1.3 Espectros de Fourier.....	45
4.1.4 Espectros de densidad de potencia (PSD).....	45
4.1.5 Cocientes espectrales (HVSR).....	46
4.1.6 Técnica del Decremento Aleatorio (TDA).....	47
4.1.6.1 Estimación del amortiguamiento.....	48
4.1.6.2 Procedimiento para obtención de las firmas del decremento Aleatorio.....	50
4.1.7 Deflexiones.....	51
4.1.7.1 Deflexiones experimentales.....	52
4.1.7.2 Deflexiones teóricas.....	53
4.2 Modelado numérico.....	54
4.2.1 SAP2000.....	54
4.2.2 Matrices de rigidez.....	56
Capítulo 5. Resultados.....	58
5.1 Espectros de Fourier y espectros de densidad de potencia.....	58
5.1.1 Centro de claro 1.....	58
5.1.2 Centro de claro 2.....	62
5.1.3 Centro de claro 3.....	66
5.1.4 Intersección de claro 1 y claro 2.....	70
5.1.5 Intersección de claro 2 y claro 3.....	72
5.1.6 Resumen de frecuencias naturales de la estructura.....	74
5.2 Cocientes espectrales.....	75
5.2.1 Punto 1.....	76
5.2.2 Punto 2.....	79
5.2.3 Punto 3.....	82
5.2.4 Punto 4.....	85
5.2.5 Resumen de frecuencias fundamentales del suelo.....	88
5.3 Técnica del decremento aleatorio.....	89
5.3.1 Claro 2.....	89
5.3.2 Claro 3.....	96
5.3.3 Resumen de resultados obtenidos en la técnica del decremento aleatorio.....	100
5.4 Deflexiones.....	101
5.4.1 Deflexiones experimentales.....	102
5.4.2 Patrón de comportamiento de deflexiones.....	107
5.5 Modelado numérico del puente Manantiales.....	109
5.6 Modelado numérico del suelo.....	112
5.6.1 Punto 1.....	113
5.6.2 Punto 2.....	114
5.6.3 Punto 3.....	116
5.6.4 Punto 4.....	118
5.6.5 Resumen del modelado numérico del suelo.....	119
Capítulo 6. Análisis e interpretación de resultados.....	121
6.1 Comparación de resultados teóricos y experimentales del puente.....	121
6.1.1 Frecuencia fundamental y amortiguamiento.....	122
6.1.2 Deflexiones.....	126

6.2 Modelado numérico del suelo.....	128
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones	131
7.1 Conclusiones.....	131
7.1.1 Estructura.....	131
7.1.1.1 Frecuencia fundamental.....	131
7.1.1.2 Amortiguamiento.....	132
7.1.1.3 Patrón de comportamiento de las deflexiones.....	132
7.1.2 Suelo.....	133
7.1.3 Métodos utilizados.....	134
7.2 Recomendaciones.....	134
Referencias bibliográficas.....	136
Apéndice A. Clasificación de suelos SUCS.....	140
Apéndice B. Recomendaciones de SESAME para la duración de registros.....	141
Apéndice C. Figuras de la interfaz del programa TDA.....	141
Apéndice D. NOM-012-SCT-2-2008.....	144
Apéndice E. Análisis de eigenvectores en SAP2000.....	147
Apéndice F. Transformación de unidades de salida de la grabadora a unidades físicas.....	150
Apéndice G. Figuras del procedimiento realizado en el programa SMA.....	152
Apéndice H. Prueba de calibración del programa SMA.....	154
Apéndice I. Cálculos teóricos de las deflexiones máximas esperadas.....	159
Apéndice J. Figuras del procedimiento usado en SAP2000.....	162
Apéndice K. Método de rigideces.....	166
Glosario.....	170

Lista de figuras

Figura		Página
1	Fallas geológicas del norte de Baja California.	7
2	Cantidad de sismos de magnitud mayor de 5 registrados de 1987 al 2013 (RESNOM, datos actualizados al 31 de julio de 2013).	7
3	Ubicación del puente Manantiales.	9
4	Mapa geológico de la zona cercana donde se ubica el puente Manantiales.	11
5	Puente Manantiales (cuerpo A y cuerpo B).	12
6	Elevación de Puente Manantiales.	13
7	Sección transversal de puente Manantiales.	13
8	Agrietamiento en estribo.	15
9	Ubicación de sondeos SE-1, SE-2, SE-3 y SE-4.	16
10	Equipo de medición: (1) sensor (2) interfase de conexión, (3) cables (4) batería y cargador y (6) laptop.	20
11	Diagrama 1: tres sensores conectados por medio de una interfase de conexión para registrar dos componentes de cada sensor.	21
12	Diagrama 2: dos sensores conectados directamente a la grabadora para registrar las tres componentes de cada sensor.	21
13	Grabadora Kinometrics SSR-1 de 6 canales.	22
14	Acelerómetro triaxial EpiSensor FBA ES-T.	23
15	Respuesta en amplitud y fase de sensor EpiSensor.	24
16	Sensor ubicado en campo libre.	25
17	Sensor ubicado sobre la superficie de rodamiento mientras el tráfico fluía por el carril contiguo.	26
18	Primer arreglo de sensores, en el cual se realizaron tres mediciones: (1) componente longitudinal y vertical, (2) componente transversal y vertical y (3) componente transversal y longitudinal.	29
19	Segundo arreglo: registro de las componentes transversal, longitudinal y vertical de dos sensores ubicados en las intersecciones de los claros C1-C2 y C2-C3.	30
20	Tercer arreglo: medición de componente transversal, longitudinal y vertical de dos sensores ubicados al centro del claro C2 y a 38.36m alejado de estribo 1.	31
21	Cuarto arreglo: registro de la componente transversal, longitudinal y vertical de dos sensores ubicados en campo libre.	32
22	Quinto arreglo: medición de la componente transversal, longitudinal y vertical de dos sensores ubicados sobre el nivel del terreno natural.	33
23	Representación gráfica de la hipótesis de la TDA.	38

24	Firmas del decremento aleatorio donde se muestran las cuatro formas alternas utilizadas para estimar el amortiguamiento.	50
25	Ubicación de los puntos de registro sobre el puente.	58
26	Mediciones realizadas al centro del claro 1.	59
27	Componentes transversales obtenidas al centro del claro 1.	60
28	Componentes longitudinales obtenidas al centro del claro 1.	61
29	Mediciones registradas al centro del claro 2.	62
30	Componentes transversales obtenidas al centro del claro 2.	63
31	Componentes longitudinales obtenidas al centro del claro 2.	64
32	Componentes verticales obtenidas al centro del claro 2.	65
33	Mediciones registradas al centro del claro 3.	66
34	Componentes transversales obtenidas al centro del claro 3.	67
35	Componentes longitudinales obtenidas al centro del claro 3.	68
36	Componentes verticales obtenidas al centro del claro 3.	69
37	Mediciones generadas en la intersección de los claros C1 y C2.	70
38	Componentes longitudinal y vertical obtenidas en la intersección del claro 1 y claro 2.	71
39	Intersección de los claros C2 y C3.	72
40	Componentes transversal, longitudinal y vertical obtenidas en la intersección del claro 2 y claro 3, por el sensor 17 en el arreglo 2.	73
41	Ubicación de los puntos de registro en campo libre.	76
42	Punto 1 de mediciones en campo libre.	76
43	Componentes longitudinal y vertical obtenidas en el punto 1 de mediciones en campo libre.	77
44	Cocientes espectrales estimados en el punto 1 de mediciones en campo libre.	78
45	Punto 2 de mediciones en campo libre.	79
46	Componente transversal, longitudinal y vertical obtenidas en el punto 2 de mediciones en campo libre.	80
47	Cocientes espectrales estimados en el punto 2 de mediciones en campo libre.	81
48	Punto 3 de mediciones en campo libre.	82
49	Componentes longitudinal y vertical obtenidas en el punto 3 de mediciones en campo libre.	83
50	Cocientes espectrales estimados en el punto 3 de mediciones en campo libre.	84
51	Punto 4 de mediciones en campo libre.	85
52	Componente transversal, longitudinal y vertical obtenidas en el punto 4 de mediciones en campo libre.	86
53	Cocientes espectrales estimados en el punto 4 de mediciones en campo libre.	87
54	Segmento 4 de aceleración (componente vertical).	90
55	Matriz de gráficas de firmas del segmento 4 de aceleración (componente vertical).	90

56	Matriz de gráficas de amortiguamientos del segmento 4 de aceleración (componente vertical).	91
57	Porción de segmento 4 de velocidad (componente vertical).	91
58	Matriz de gráficas de firmas de la porción del segmento 4 de velocidad (componente vertical).	92
59	Matriz de gráficas de amortiguamientos de la porción del segmento 4 de velocidad (componente vertical).	93
60	Segmento 1 de aceleración (componente longitudinal).	95
61	Matriz de gráficas de firmas del segmento 4 de aceleración (componente longitudinal).	95
62	Matriz de gráficas de amortiguamientos del segmento 1 de aceleración (componente longitudinal).	96
63	Segmento 1 de aceleración (componente vertical).	97
64	Matriz de gráficas de firmas del segmento 1 de aceleración (componente vertical).	97
65	Matriz de gráficas de amortiguamientos del segmento 1 de aceleración (componente vertical).	98
66	Segmento 1 de aceleración (componente longitudinal).	99
67	Matriz de gráficas de firmas del segmento 1 de aceleración (componente longitudinal).	99
68	Matriz de gráficas de amortiguamientos del segmento 1 de aceleración (componente longitudinal).	100
69	Serie de tiempo de aceleración, desplazamiento y espectro de desplazamiento de segmento 3 de arreglo 1, medición 1, claro 2.	102
70	Serie de tiempo de aceleración, desplazamiento y espectro de desplazamiento de segmento 6 de arreglo 1, medición 1, claro 2.	103
71	Serie de tiempo de aceleración, desplazamiento y espectro de desplazamiento de segmento 3 de arreglo 1, medición 1, claro 3.	103
72	Serie de tiempo de aceleración, desplazamiento y espectro de desplazamiento de segmento 9 de arreglo 1, medición 1, claro 3.	104
73	Deflexiones de claro 2 y claro 3.	105
74	Promedio de deflexiones experimentales normalizadas y deflexiones teóricas normalizadas de claro 2 y claro 3.	108
75	Promedio de deflexiones experimentales normalizadas y deflexiones teóricas normalizadas de claro 2 y claro 3.	109
76	Modelo del puente Manantiales.	110
77	Primer modo de vibración.	110
78	Segundo modo de vibración.	111
79	Tercer modo de vibración.	111
80	Deformación por carga móvil.	112
81	Capas del suelo propuestas para el punto 1.	113
82	Funciones de transferencia teóricas del punto 1.	114
83	Capas del suelo propuestas para el punto 2.	115
84	Funciones de transferencia teóricas del punto 2.	116

85	Capas del suelo propuestas para el punto 3.	117
86	Funciones de transferencia teóricas del punto 3.	117
87	Capas del suelo propuestas para el punto 4.	118
88	Funciones de transferencia teóricas del punto 4.	119
89	Comparación de frecuencias fundamentales estimadas en los diferentes métodos.	125
90	Promedio de deflexiones experimentales normalizadas y deflexiones teóricas normalizadas de claro 2 y claro 3.	127
C1	Ejemplo de interfaz del programa TDA.	141
C3	Ejemplo de matriz de gráficas de firmas del decremento aleatorio.	142
C3	Ejemplo de matriz de gráficas de amortiguamientos obtenidos del decremento aleatorio.	143
F1	Representación esquemática del sistema de captura de datos, sensor, grabadora y el proceso de conversión de unidades.	150
G1	Paso (ii) del procedimiento realizado en el programa SMA.	152
G2	Paso (iii) del procedimiento realizado en el programa SMA.	152
G3	Paso (iv) del procedimiento realizado en el programa SMA.	153
G4	Paso (v) del procedimiento realizado en el programa SMA.	153
H1	Esquema de la configuración genérica mesa vibradora-sistema de adquisición de datos.	155
H2	Vista superior de la mesa vibratoria.	155
H3	Vista frontal de mesa vibratoria.	156
H4	Figura H4. Señal de entrada y de salida en la mesa vibradora	157
I1	Condición más desfavorable en un claro de 36.00m de longitud.	159
I2	Condición más desfavorable en un claro de 34.00m de longitud.	160
I3	Gráficas del momento flexionante producido por camiones tipo T3S2R4, T3S3 y HS20 en claros de 36.00m (primer renglón) y 34.00m (segundo renglón) de longitud.	160
I4	Deformaciones estimadas en la superestructura del puente Manantiales.	161
J1	Definición de la línea de diseño usando módulo de puentes de SAP2000.	162
J2	Definir el tipo de sección con la que se soporta la superficie de rodamiento.	163
J3	a) Definir diafragmas, b) Especificar grados de libertad en superestructura y c) Especificar grados de libertad en superestructura.	163
J4	Definir apoyos.	164
J5	Definir columnas.	164
J6	a) Definir objetos del puente y b) especificar vehículos.	167
K1	Un sistema de capa de suelos.	

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Sismicidad regional del año 1987 al 2013 (RESNOM datos actualizados al 31 de julio de 2013).	8
2	Estratigrafía y tipos de suelos (QUID, 2008).	17
3	Características y especificaciones de la grabadora.	22
4	Características y especificaciones del sensor.	23
5	Resumen de arreglos y mediciones de vibración ambiental.	27
6	Deformaciones teóricas estimadas en la superestructura, Δ =deflexión, CP=carga muerta, CM=carga móvil.	54
7	Frecuencias naturales de PSD y espectros de Fourier (Claro 1).	61
8	Frecuencias naturales de PSD y espectros de Fourier (Claro 2).	66
9	Frecuencias naturales de PSD y espectros de Fourier (Claro 3).	70
10	Frecuencias naturales obtenidas por PSD y espectros de Fourier (C1-C2).	72
11	Frecuencias naturales obtenidas por PSD y espectros de Fourier (C2-C3).	74
12	Frecuencias naturales de PSD y espectros de Fourier.	75
13	Frecuencias naturales en PSD, espectros de Fourier y cocientes espectrales de punto P1.	78
14	Frecuencias naturales en PSD, espectros de Fourier y cocientes espectrales de punto P2.	81
15	Frecuencias naturales en PSD, espectros de Fourier y cocientes espectrales de punto P3.	84
16	Frecuencias naturales en PSD, espectros de Fourier y cocientes espectrales de punto P4.	87
17	Frecuencias en PSD, espectros de Fourier y cocientes espectrales de mediciones en campo libre.	88
18	Resultados de la técnica del decremento aleatorio para claro 2 (componentes verticales).	94
19	Resultados de la técnica del decremento aleatorio para claro 2 (componentes longitudinales).	94
20	Resultados de la técnica del decremento aleatorio para claro 3 (componentes verticales).	98
21	Resultados de la técnica del decremento aleatorio para claro 3 (componentes longitudinales).	100
22	Resultados de la técnica del decremento aleatorio del claro 2 y claro 3.	101
23	Deflexiones generadas por vehículos que transitaron sobre claro 2.	106

24	Deflexiones generadas por vehículos que transitaron sobre claro 3.	107
25	Periodos y frecuencias modales.	112
26	Modelo numérico del punto 1.	114
27	Modelo numérico del punto 2.	116
28	Modelo numérico del punto 3.	118
29	Modelo numérico del punto 4.	119
30	Modelo numérico del suelo.	120
31	Frecuencias naturales obtenidas por PSD, espectros de Fourier y TDA, y amortiguamiento.	124
32	Comparación frecuencia fundamental teórica y experimental.	125
33	Modelo numérico del suelo y comparación de frecuencias fundamentales teóricas y experimentales.	130
A1	Símbolos de grupo (SUCS).	140
A2	Tipología de suelos (SUCS).	140
B1	Duración recomendada de registros (SESAME, 2004).	141
D1	Clasificación de autobuses.	144
D2	Clasificación de tractocamiones articulados.	144
D3	Clasificación de tractocamiones semirremolque-remolque (T-S-R).	145
D4	Peso bruto vehicular máximo autorizado por clase de vehículo y camino.	146
H1	Tabla. Descripción de las componentes de la mesa vibratoria.	156

Capítulo 1

Introducción

1.1 Descripción general

La caracterización de las estructuras civiles en términos de sus propiedades y de su respuesta ante cargas dinámicas es de gran importancia para determinar su seguridad, su confiabilidad y en determinado momento, decidir si es adecuado realizar algún tipo de reparación en ella.

Los modos de vibración y los coeficientes de amortiguamiento son propiedades dinámicas de especial importancia en las estructuras civiles.

Se han desarrollado diferentes métodos para estimar, ya sea teórica o experimentalmente las propiedades dinámicas de las estructuras civiles. Cada uno de ellos presentan ventajas y desventajas que deben evaluarse para seleccionar los métodos que generen resultados confiables, según el caso particular de estudio.

En el presente trabajo, se estima teórica y experimentalmente la frecuencia fundamental de vibración, el amortiguamiento y el patrón de deflexiones típicas ante cargas vivas del puente Manantiales, así como la frecuencia predominante de vibración del terreno en su entorno.

El método de vibración ambiental, se utiliza en este trabajo y consiste en medir y analizar la vibración de baja amplitud. Estas vibraciones son generalmente producidas por el funcionamiento industrial, tráfico de vehículos, vibraciones producidas por el viento que son introducidas en el subsuelo por árboles y edificaciones (Espinoza, 2002). De esta forma se estiman las frecuencias de vibración de la estructura, con lo cual se describe su comportamiento dentro del rango elástico (Torres, 2009). Una de las principales ventajas del método, es que se realizan mediciones de vibración ambiental sin interrumpir el funcionamiento de la estructura, y se aprovechan las vibraciones generadas por las cargas presentes. Así también, es un método atractivo, ya que el

equipo utilizado es muy ligero, portátil y se obtiene una estimación rápida y confiable del comportamiento de la estructura en estudio.

Para determinar las frecuencias fundamentales de vibración y coeficientes de amortiguamiento, se utiliza una aproximación basada en el análisis espectral de señales en el dominio de la frecuencia (espectros de Fourier, cocientes espectrales y espectros de potencia), así como la técnica del decremento aleatorio (TDA) para el análisis en el dominio del tiempo. Las mediciones de la aceleración son primero procesadas con el método basado en análisis espectral. Después, se usa la técnica de decremento aleatorio para obtener la respuesta de vibración e identificar las frecuencias naturales y valores de amortiguamiento simultáneamente. Las diferentes formas de los registros se examinan para estudiar el comportamiento de los métodos usados en el análisis (ver capítulo 3) y la caracterización de la estructura. Los resultados obtenidos en los diferentes métodos propuestos se comparan entre sí.

Se han realizado diversos estudios en los que se determinan las propiedades dinámicas de diferentes estructuras utilizando registros de vibración ambiental, en los cuales se presenta la confiabilidad del método usado en esta tesis. Algunos ejemplos de estos trabajos se pueden encontrar en un estudio realizado en el distribuidor vial de San Antonio de la ciudad de México (Sánchez et al., 2005), en un edificio de nueve niveles en la ciudad de Tijuana (Huerta et al., 2007), en el monitoreo de un edificios de acero utilizando vibración ambiental y movimientos sísmicos en la ciudad de Los Ángeles (Kohler et al., 2005) y una tesis sobre el Puente ubicado en La Misión (Song, 2010).

Otro punto de interés en obras civiles, es la estimación de las deflexiones, ya que son un parámetro importante dentro del análisis y diseño estructural que puede ayudar para saber si la estructura está cumpliendo el objetivo para el cual fue diseñada. En este caso particular, se determina de una forma experimental, el patrón de las deflexiones que se presentan con el paso de los vehículos que transitan sobre el puente, para hacer una comparación con el patrón de deflexiones máximas esperadas obtenidas

teóricamente. De esta manera se puede visualizar si las deformaciones que presenta el puente se encuentran dentro de los límites de servicio.

Partiendo de los registros de aceleración generados por las cargas vivas y realizando un tratamiento adecuado de integración con respecto al tiempo, es posible estimar el desplazamiento generado por el paso de diferentes tipos de vehículos previamente definidos.

En la parte teórica de este estudio, se utiliza el programa de cálculo estructural SAP2000 para estimar numéricamente las frecuencias de vibración del puente. Con este software se crean modelos de diferentes tipos de estructuras de una manera sencilla.

Debido a que es de gran importancia conocer las propiedades dinámicas del suelo sobre el cual se desplanta una estructura, se obtuvieron registros de aceleración mediante mediciones de vibración ambiental en diferentes puntos del terreno. Esto con la finalidad de obtener la función de transferencia del suelo mediante la estimación de cocientes espectrales. El modelado teórico del suelo se realiza con el método de propagación de ondas en una dimensión, el cual se basa en matrices de rigidez (Kausel y Roësset, 1981).

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo consiste en determinar las propiedades dinámicas del puente Manantiales y del terreno en su entorno, mediante el análisis de registros de aceleración generados por vibración ambiental y mediante modelado numérico.

Objetivos particulares incluyen:

- En el dominio de la frecuencia, determinar espectros de densidad de potencia (PSD) y espectros de amplitud de Fourier, para extraer la frecuencia fundamental de vibración.
- En el dominio del tiempo, aplicar la técnica del decremento aleatorio (TDA) para determinar la frecuencia natural y el amortiguamiento de la estructura.
- El modelado numérico del puente utilizando el programa SAP2000 y el modelado numérico del suelo aplicando la teoría de propagación de ondas basado en el método de matrices de rigidez.

Para lograr el objetivo general, se definieron los siguientes objetivos específicos:

- a. Utilizar registros de vibración ambiental para determinar de manera experimental la frecuencia natural y amortiguamiento de la estructura.
- b. Caracterizar las propiedades dinámicas de la estructura y del terreno en su vecindad.
- c. Determinar experimentalmente el patrón de las deflexiones generadas al centro de cada claro del puente y compararlas con el cálculo del patrón de deflexiones teóricas.
- d. Obtener el modelado numérico de la estructura y del terreno.
- e. Analizar la respuesta sísmica de la estructura en el rango lineal.

1.3 Organización de la tesis

El presente trabajo está dividido en seis capítulos. En el primero, se presenta una descripción general del tema desarrollado, indicando de una manera general y específica los objetivos que guiaron esta tesis. El capítulo segundo, exhibe información sobre la ubicación geográfica del puente, sismicidad regional, geología del suelo que lo rodea y descripción de la estructura. En el tercer capítulo se explica de manera detallada, el trabajo de campo realizado, es decir, de las mediciones de vibración ambiental obtenidas sobre el puente Manantiales y el suelo en su entorno; también se exponen los métodos empleados para la obtención de frecuencias fundamentales, valores de amortiguamiento, funciones de transferencia, deflexiones, modelado numérico de la estructura y del suelo. El cuarto capítulo contiene el procesamiento aplicado a los datos generados sobre el puente y el suelo, y una descripción de los resultados obtenidos. En el capítulo quinto, se presenta un análisis de los resultados expuestos en el capítulo cuarto, así como una interpretación de los mismos. En el capítulo sexto se describen las conclusiones obtenidas tomando como base el análisis realizado en el capítulo cinco, así como una serie de recomendaciones importantes.

También se incluyen los apéndices de la A a la K en los cuales se describe información sobre la clasificación de suelos según SUCS, sugerencias de SESAME para determinar la duración de registros de vibración ambiental, imágenes del programa de la técnica del decremento aleatorio, información relevante sobre la NOM-012-SCT-2-2008, explicación del análisis de eigenvectores en SAP2000, procedimiento y constantes específicas del equipo utilizado para la conversión de cuentas a unidades físicas de aceleración, imágenes procedimiento realizado en el programa SMA, prueba de calibración del programa SMA, cálculos de las deflexiones teóricas máximas esperadas, imágenes del procedimiento realizado en el programa SAP2000 y una explicación del método de rigideces.

Capítulo 2

Región donde se localiza la estructura de estudio

2.1 Descripción de la región

La región donde se ubica el puente Manantiales, se localiza geográficamente al noroeste de México, en la península de Baja California, la cual forma parte de la placa del Pacífico y se desplaza hacia el NW con respecto a la placa Norteamericana (Cruz y Delgado, 2000).

En esta región, se han identificado fallas geológicas (figura 1) correspondientes a la zona de influencia del sistema de fallas San Andrés – Golfo de California, las cuales tienen una importancia especial, debido a que son responsables de la sismicidad que afecta el área donde se ubica la estructura que se estudia en esta tesis (Cruz y Delgado, 2000). Así mismo hay información que muestra el alto potencial de ocurrencia de sismos de magnitud igual o mayor a 6.0 en esta región (Song, 2010).

En la tabla 1 se enlista la sismicidad regional de magnitud mayor de 5 que ha sido registrada por RESNOM, entre latitudes de 30 00.00N a 33 00.00N y longitudes de -114 00.00W a -117 20.00W y en la figura 2 se presenta la cantidad de sismos de magnitud mayor o igual a 5 registrada del año 1987 al 2013. Esta información tomada del catálogo de RESNOM (para el periodo de 1987 a 2013), muestra el potencial de ocurrencia de sismos mayores de magnitud 6, dejando en claro que esta región es sísmicamente activa.

Tabla 1. Sismicidad regional del año 1987 al 2013 (RESNOM, datos actualizados al 31 de julio de 2013).

Fecha (año/mes/día)	Origen (hr/min/s)	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Profundidad (km)	Magnitud
1987 02 07	03 45 15.72	32 23.54	-115 16.11	13.0	5.3
1991 12 03	17 54 37.10	31 45.53	-115 49.33	15.0	5.0
1993 07 08	02 05 20.94	30 15.00	-114 10.47	8.0	5.0
1995 08 02	18 32 11.70	30 19.06	-114 12.82	12.0	5.1
1999 06 01	15 18 02.28	32 22.78	-115 15.18	33.0	5.1
1999 09 10	13 40 02.92	32 22.78	-115 14.91	11.0	5.2
2001 12 08	23 36 12.02	32 06.10	-115 00.15	17.0	5.4
2002 02 22	19 32 42.79	32 20.99	-115 17.57	12.0	5.3
2003 02 07	10 34 05.7	31 35.04	-115 36.54	5.3	5.0
2005 04 27	00 32 59.8	30 26.76	-114 18.12	10.0	5.3
2006 05 24	04 20 26.0	32 24.60	-115 15.84	11.9	5.2
2008 02 09	07 12 06.1	32 28.38	-115 21.06	9.0	5.2
2008 02 11	18 29 31.9	32 28.26	-115 21.42	7.0	5.0
2008 02 12	04 32 38.1	32 28.38	-115 22.02	8.9	5.0
2008 02 19	22 41 28.7	32 27.48	-115 22.02	8.0	5.0
2008 02 20	01 28 52.3	32 19.44	-115 20.04	7.0	5.0
2008 02 22	19 31 17.2	32 25.92	-115 19.38	9.0	5.0
2009 09 19	22 55 18.6	32 23.22	-115 16.26	2.1	5.3
2009 12 30	18 48 57.7	32 25.92	-115 10.38	9.0	6.0
2010 04 04	22 40 40.1	32 16.68	-115 20.34	4.0	7.1
2010 04 04	22 50 20.0	32 09.30	-115 15.36	10.0	5.5
2010 04 04	23 15 14.0	32 14.82	-115 17.76	8.0	5.5
2010 04 04	23 25 07.1	32 14.40	-115 18.00	6.0	5.7
2010 04 04	00 07 09.1	31 59.76	-115 02.64	8.0	5.1
2010 04 04	11 14 15.5	32 40.32	-115 48.42	4.0	5.2
2010 04 05	13 33 06.4	32 40.44	-115 47.46	6.0	5.1
2010 04 08	16 44 26.6	32 13.68	-115 16.50	6.0	5.4
2010 04 15	10 20 47.7	32 04.74	-115 03.18	8.0	5.0
2010 05 22	17 30 58.7	32 36.72	-115 46.44	3.0	5.1
2010 05 22	17 33 18.3	32 36.84	-115 46.80	4.0	5.1
2010 06 15	04 26 58.7	32 42.66	-115 56.28	2.0	5.7
2010 09 14	10 52 20.0	32 08.46	-115 12.54	11.0	5.3
2010 09 15	06 09 54.1	32 11.10	-115 14.22	3.0	5.0
2011 02 18	17 47 36.6	32 03.60	-115 05.46	8.0	5.2
2011 04 07	13 40 57.9	31 13.98	-115 37.20	5.0	5.0
2012 02 14	10 09 28.6	32 06.24	-115 12.00	6.0	5.1
2012 08 27	05 23 19.1	30 39.48	-114 03.78	10.0	5.4

Específicamente, el puente Manantiales se ubica dentro del poblado Salsipuedes, en el kilómetro 88+975 de la carretera de cuota Tijuana-Ensenada, latitud $31^{\circ}58'29.78''\text{N}$, longitud $116^{\circ}46'14.24''\text{W}$ (figura 3). De acuerdo con la regionalización sísmica de la República Mexicana del INEGI, el puente Manantiales se localiza en la zona sísmica B, mientras la Ley de Edificaciones del estado de Baja California de 1992, se encuentra en la zona sísmica C. La zona sísmica C es una zona intermedia, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.

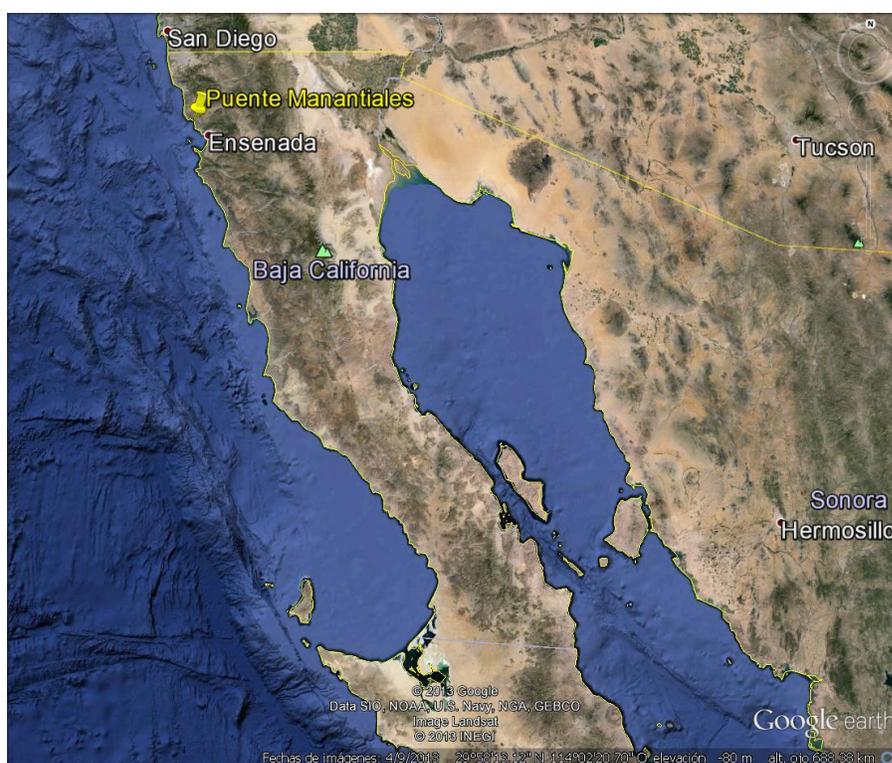


Figura 3. Ubicación del puente Manantiales.

En esta región es importante la sismicidad asociada con la Falla San Miguel, localizada hacia el oriente del poblado Salsipuedes (Cruz y Delgado, 2000), la cual se considera como una de las más activas en esta zona (Cruz, 2002). Cerca de la región donde se ubica el puente en estudio, se encuentra la falla El descanso-Estero (figura 1), localizada en ambiente submarino entre Punta Salsipuedes y la ciudad de Ensenada, a

la cual se le ha asociado un enjambre sísmico de 50 eventos que ocurrió en 1981 (Cruz, 2002).

Otra característica importante de esta zona, es la presencia de deslizamientos de tierra y los más importantes en el NW de Baja California ocurren desde el km 61 hasta el km 99 de la carretera de cuota Tijuana-Ensenada (Cruz y Delgado, 2000), los cuales serán descritos en la siguiente sección.

2.2 Descripción de la geología regional

La litología de la región está representada por rocas sedimentarias de la Formación Rosario del Cretácico Tardío que descansa sobre rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Alisitos del Cretácico Temprano (figura 4). Sobre la Formación Rosario se depositó la Formación Rosarito Beach del Mioceno, caracterizada por derrames de lava y sedimentos de ambiente costero (Cruz y Delgado, 2000).

La Formación Rosario descansa discordantemente sobre la Formación Alisitos (figura 4), contiene fósiles marinos, está pobremente consolidada y poco deformada por los esfuerzos tectónicos, y se divide en tres miembros: inferior, medio y superior (Cruz y Delgado, 2000).

Según la información de la carta geológica-minera de Ensenada proporcionada por el INEGI, el suelo de la región donde se ubica el puente se caracteriza por limolita-arenisca, correspondientes al cretácico superior.

Un punto importante de la zona sobre la que se desarrolla este trabajo, es la presencia de deslizamientos de tierra. Estudios desarrollados por Castillo y Delgado (2000), describen que el deslizamiento localizado al oriente del kilómetro 90 de la carretera de cuota Tijuana-Ensenada, presenta grietas y fracturas cercanas y paralelas a la cabecera, en la corona del deslizamiento, lo que lo hace potencialmente activo. Este

desplazamiento se desarrolla en conglomerados y se encuentra en la cima de uno de los lomeríos de los Acantilados Salsipuedes.

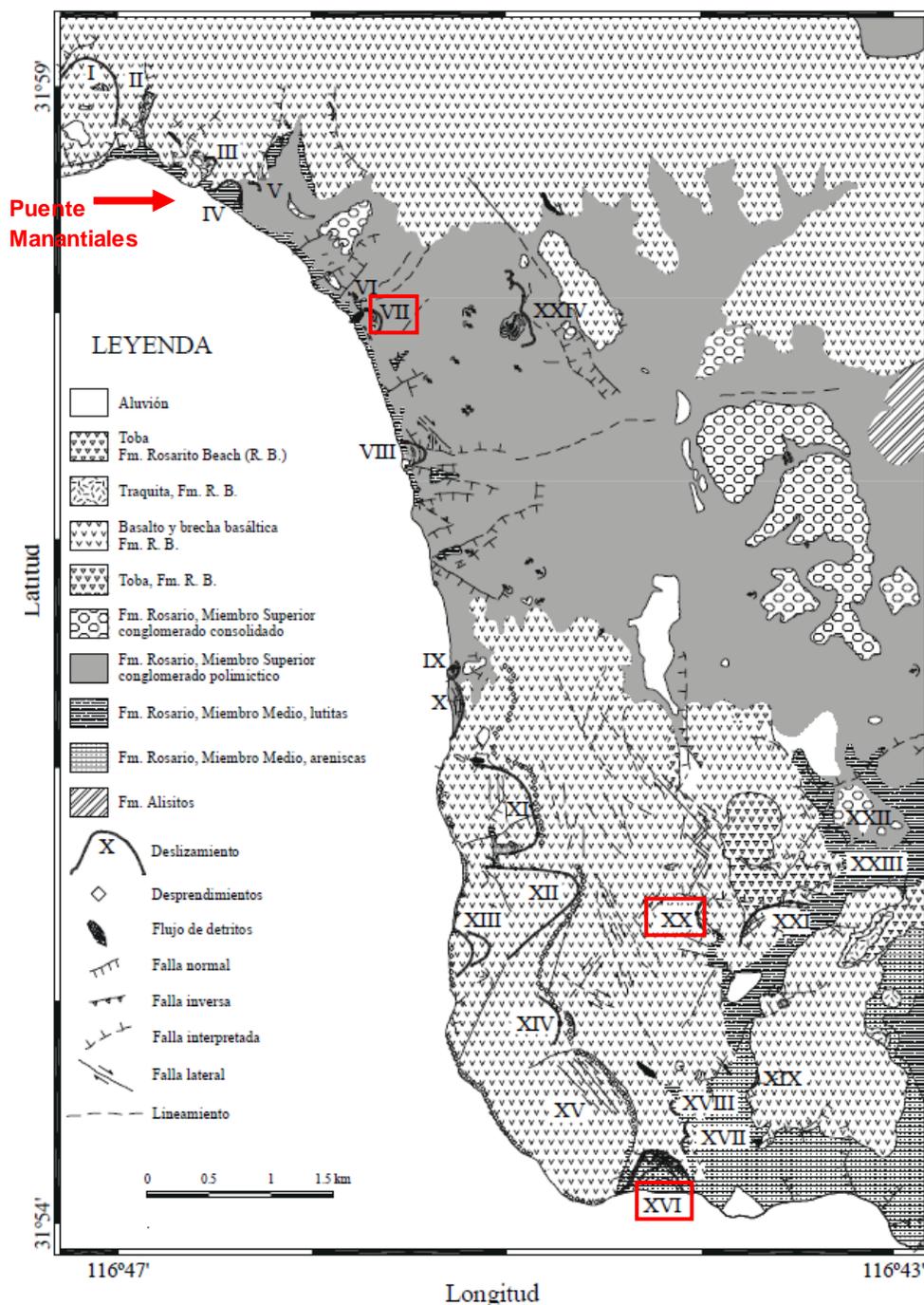


Figura 4. Mapa geol3gico de la zona cercana donde se ubica el puente Manantiales. Los deslizamientos est3n numerados del I al XXIV, los m3s activos son el VII, XVI y XX se~alados en color rojo. Adaptado de “Los deslizamientos de la carretera de cuota Tijuana-Ensenada, Baja California”, de Cruz y Delgado, 2000. GEOS, 20(4), p. 419.

2.3 Descripción de la estructura

El puente Manantiales está compuesto por dos cuerpos, los cuales fueron construidos para salvar una vía pluvial. El cuerpo A, corresponde al sentido del tránsito vehicular de Tijuana hacia Ensenada, y el cuerpo B, de Ensenada a Tijuana (figuras 5, 6 y 7). Ambos cuerpos están constituidos por tres claros, apoyados en sus extremos por dos estribos y en la parte intermedia por dos pilas. El estudio del presente trabajo se concentra en el cuerpo B. Debido a la similitud en la geometría y materiales de construcción de ambos cuerpos del puente, se espera que el comportamiento del cuerpo A sea similar al del cuerpo B.

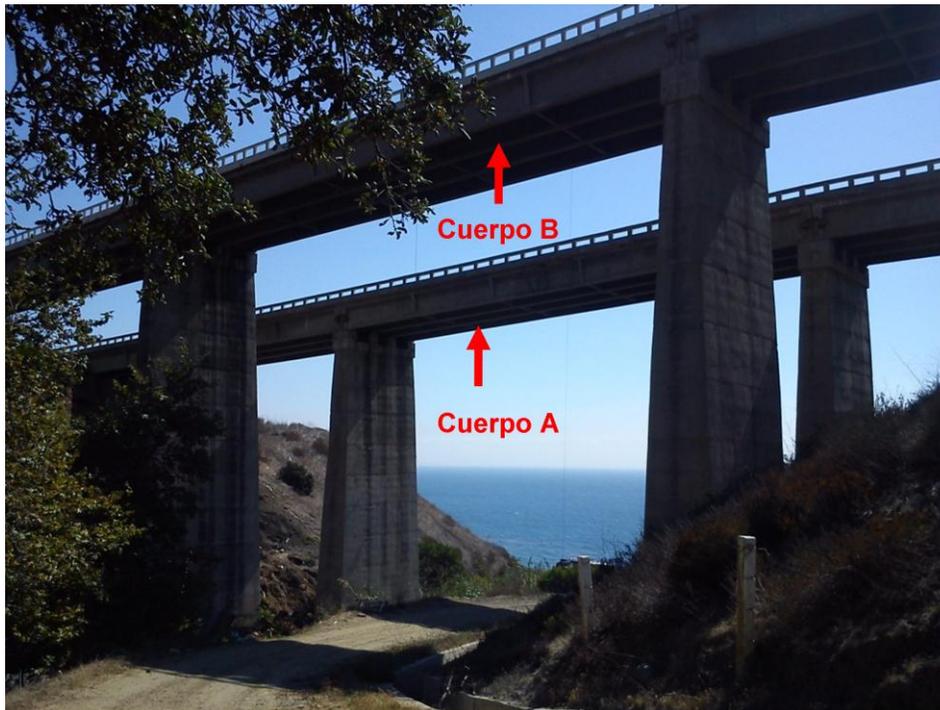


Figura 5. Puente Manantiales (cuerpo A y cuerpo B).

2.3.1 Datos geométricos y estructurales

La superestructura está compuesta por una losa con nervaduras, apoyos extremos a base de estribos con aleros integrados, pilas de sección variable como apoyos intermedios y parapeto de concreto. La superficie de rodamiento tiene una ligera

pendiente, de la cual no se tiene el dato, y la estructura vista en planta presenta una suave curvatura. El puente tiene una longitud total de 106.80m, constituida por tres claros: claro 1, claro 2 y claro 3 de 36.00m, 34.60m y 36.20m de longitud respectivamente. El ancho total de la superestructura es de 8.85m.

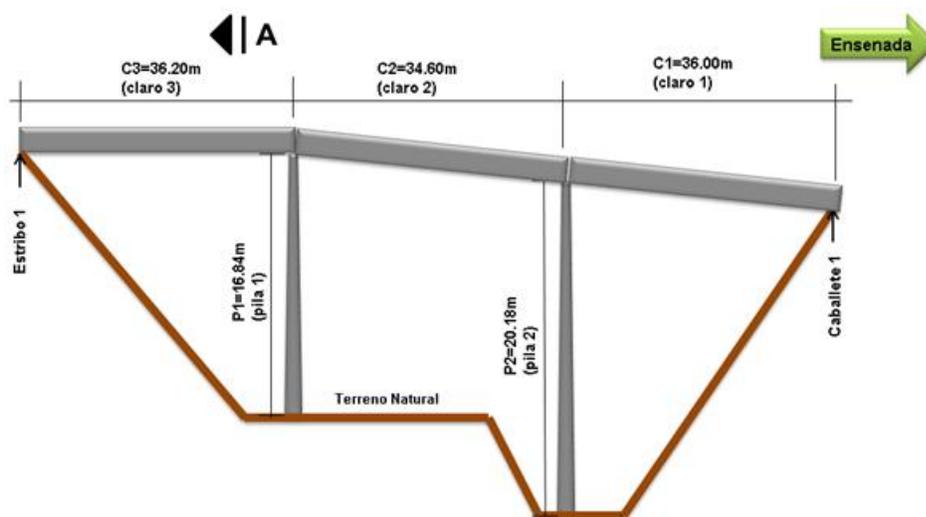


Figura 6. Elevación de Puente Manantiales.

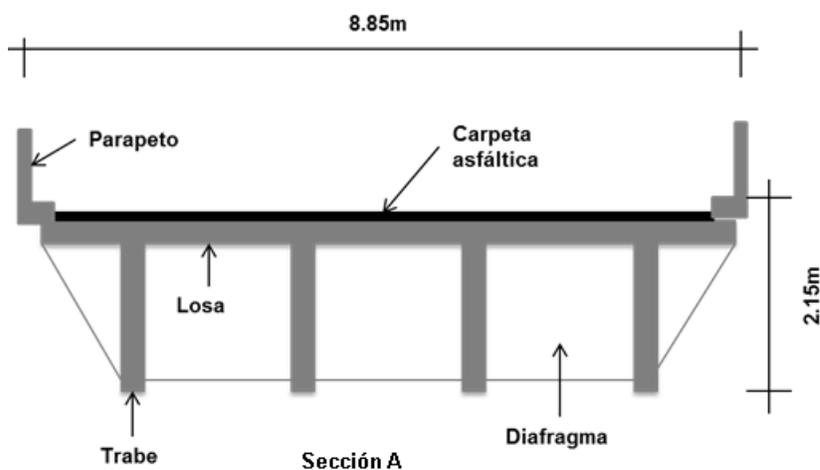


Figura 7. Sección transversal de puente Manantiales.

Los dos apoyos extremos son de tipo estribo y caballete (figura 6) con aleros integrados, el primero fue construido de concreto reforzado y el segundo de mampostería, ambos tienen zapatas como cimientos. En la parte intermedia, está soportado por dos pilas de concreto reforzado de sección transversal rectangular variable

con la altura. La pila 1 tiene una altura de 16.84m, la pila 2 de 20.18m y la cimentación de ambas es a base de zapatas aisladas de concreto reforzado.

Sobre los apoyos intermedios y extremos, descansa una losa de concreto armado de 0.30m de espesor y cuatro trabes de concreto presforzado con peralte de 1.70m. Se observan seis diafragmas de concreto reforzado por cada claro y dispositivos de apoyo de neopreno integral.

Es importante mencionar que no se cuenta con planos arquitectónicos ni planos estructurales, por lo que se desconocen las características específicas de los materiales utilizados en su construcción (concreto, acero y neopreno).

2.3.2 Condición general del puente

En el mes de julio de 2009, Caminos y Puentes Federales (CAPUFE) realizó una inspección visual del puente Manantiales. Además, con el propósito de obtener una descripción general y actualizada de las condiciones de la estructura, se efectuaron tres visitas adicionales, de las cuales se obtuvo la información descrita a continuación.

En la base de las columnas, se observa socavación en grado ligero debido al cauce del río. En la losa y diafragmas se observan algunos agrietamientos que no son de consideración. Los estribos exhiben agrietamientos laterales que no son considerables (*figura 8*), las juntas de expansión se encuentran obstruidas con asfalto y la superficie de rodamiento es buena (CAPUFE, 2009).



Figura 8. Agrietamiento en estribo.

2.4 Descripción del suelo donde se ubica el puente

El puente Manantiales ha sido previamente objeto de estudio, para determinar alternativas de solución para un adecuado reforzamiento. En septiembre de 2008, la empresa QUID S.A. de C. V. (QUID, 2008) realizó un estudio de mecánica de suelos en la zona de estudio, generando información importante para el proyecto de reparación de la superestructura.

Se hicieron cuatro sondeos (figura 9), el sondeo 1 (SE-1) estuvo ubicado a un costado del estribo del cuerpo A, lado aguas abajo. El sondeo 2 (SE-2), se localizó a un costado de la pila No. 1 del cuerpo B, lado aguas arriba. El sondeo 3 (SE-3), se ubicó a un costado de la pila No. 2 del cuerpo A, lado aguas abajo. El sondeo 4 (SE-4) se localizó a un costado del caballete del cuerpo B, lado aguas abajo.

La tabla 2 muestra la estratigrafía identificada en cada uno de los sondeos a diferentes profundidades y su clasificación, según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS, ver apéndice A). La información contenida en la tabla 2 es de gran importancia para el modelado numérico del suelo (ver sección 3.3.2).

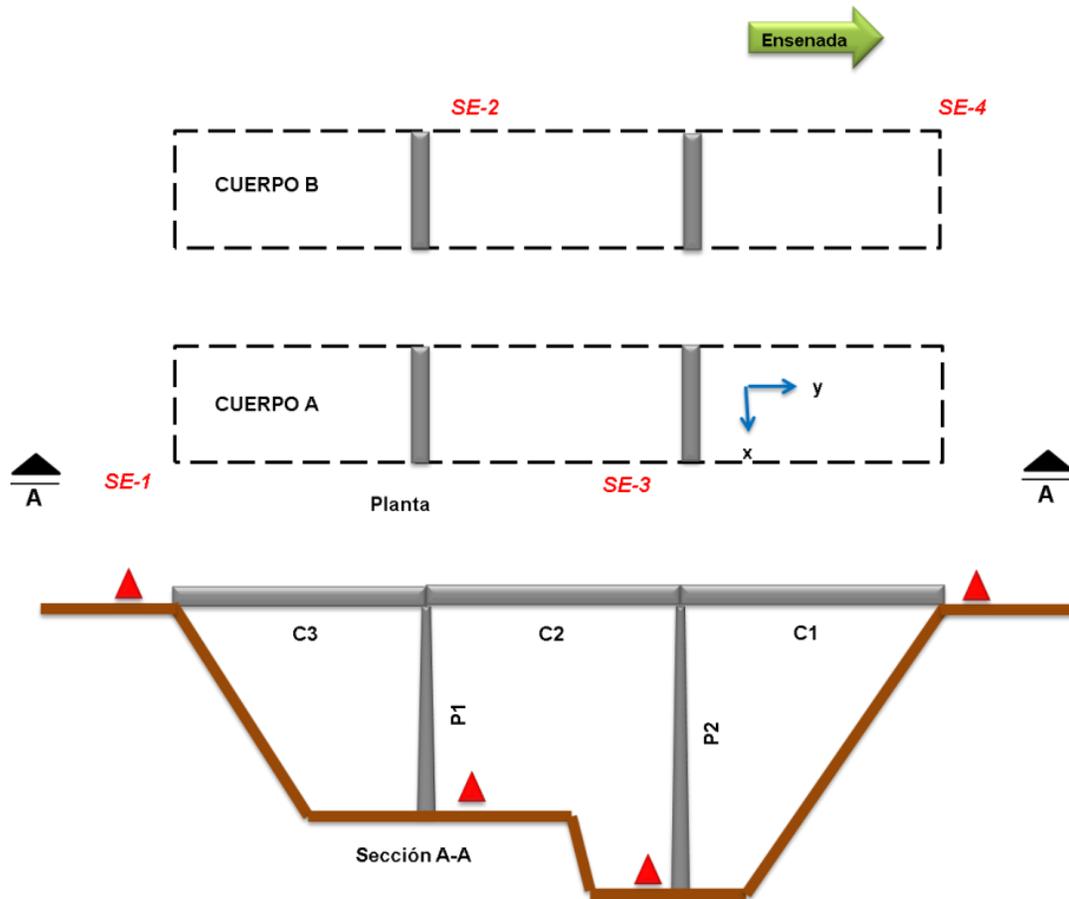


Figura 9. Ubicación de sondeos SE-1, SE-2, SE-3 y SE-4.

Tabla 2. Estratigrafía y tipos de suelos (QUID, 2008).

Sondeo	Profundidad (m)	Estratigrafía	Clasificación SUCS
SE-1	0.00 a 7.80	Arcilla muy poco arenosa, gris verdoso, con gravas aisladas, de baja plasticidad, entre poco firme y duro.	CL
	7.80 a 13.84	Arcilla arenosa, gris claro verdoso, con grumos calizos, de baja plasticidad, muy dura.	CL
SE-2	0.00 a 2.85	Arcilla poco arenosa, gris verdoso, de baja plasticidad, de firme a muy dura.	CL
	2.85 a 6.80	Gravas empacadas en arena poco arcillosa, café y gris verdosa, muy compactas.	GC
	6.80 a 9.40	Arena poco limosa, café y gris verdoso, con gravas, muy compacta.	SM
	9.40 a 10.65	Arcilla arenosa, café y gris verdoso con gravas, de baja plasticidad, muy dura.	CL
SE-3	0.00 a 2.00	Arcilla arenosa, café y gris verdoso con gravas aisladas, de alta plasticidad, entre poco firme y firme.	CH
	2.00 a 3.00	Arena arcillosa, café y gris verdoso con gravas (relleno compactado).	-
	3.00 a 4.20	Gravas empacadas en limo arenoso, café y gris verdoso (material de relleno).	-
	4.20 a 4.81	Limo poco arenoso, gris verdoso, muy duro.	-
	4.81 a 6.00	Fragmentos de roca, muy fracturada.	-
	6.00 a 9.00	Arcilla arenosa, gris verdoso de baja plasticidad, con fragmentos de roca intercalados, muy dura.	CL
	9.00 a 11.44	Arcilla poco arenosa, gris claro verdoso, de baja plasticidad, muy dura.	CL
SE-4	0.00 a 6.50	Arcilla arenosa, café y gris verdoso, con gravas aisladas, de baja plasticidad, entre muy firme y muy dura.	CL
	6.50 a 8.60	Arcilla muy poco arenosa, café y gris verdoso, de baja plasticidad, muy dura.	CL
	8.60 a 13.26	Arcilla arenosa, café y gris verdoso, de baja plasticidad, muy dura.	CL

Capítulo 3

Datos, métodos a utilizar y antecedentes

Existen diversos métodos para la estimación de la frecuencia natural y el amortiguamiento de diferentes tipos de sistemas, que en el campo de la ingeniería civil se denomina estructura. Estos métodos pueden dividirse en teóricos y experimentales. Dentro de las pruebas experimentales, destacan las siguientes:

- i. de vibración ambiental,
- ii. de tracción,
- iii. con cargas estáticas y dinámicas (Sánchez et al., 2005).

Uno de los métodos más usados para determinar experimentalmente los parámetros dinámicos de estructuras, está basado en registros de vibración ambiental. Esta vibración ambiental tiene como principales fuentes de origen las: (i) antropogénicas (como por ejemplo las causadas por el funcionamiento de maquinaria industrial o el tráfico vehicular), y (ii) naturales (vibraciones producidas por el viento las que son introducidas en el subsuelo por árboles o edificaciones, cambios de presión barométrica, entre otras) (Barreras, 2002).

En el presente estudio se decidió utilizar las pruebas de vibración ambiental, ya que son un método para medir las propiedades dinámicas de edificios. Entre las principales ventajas de este tipo de pruebas, es que no se interrumpe el uso de la estructura, el equipo que se usa es pequeño, ligero, portátil y de bajo costo. Además son pruebas no destructivas, por lo que no dañan a la estructura en estudio. Es importante mencionar que debido al rango de amplitud de la vibración ambiental ($10^{-5}g$), las características dinámicas obtenidas no necesariamente coincidirán con las obtenidas de registros de movimientos fuertes ($>0.1g$) (Dunand et al., 2004), sin embargo representan una muy buena estimación.

Desde hace tiempo, los procedimientos aplicados para el diseño de estructuras han mostrado una marcada tendencia hacia el uso de técnicas numéricas. Ahora es común el uso de programas computacionales para el análisis y diseño de estructuras. Hay diversos programas en los cuales se generan modelos estructurales y permiten visualizar su respuesta teórica ante diferentes condiciones de cargas. La mayoría de estos programas se basan en la técnica de elemento finito.

Para la obtención del modelo numérico de estructuras, se utilizan diferentes programas de cálculo estructural. Uno de los programas más usados en la ingeniería civil es el SAP2000 (Structural Analysis Program), el cual es una herramienta confiable, sofisticada y fácil de usar para determinar la respuesta numérica de una estructura mediante el método de elementos finitos.

Dentro del procesamiento de registros de movimientos fuertes, también se han desarrollado considerables avances, y con un tratamiento cuidadoso es posible obtener desplazamientos y velocidades tanto del suelo como de estructuras. Existen algunos métodos aplicados a registros de aceleración, con los cuales se realizan las correcciones necesarias para obtener valores de velocidad y desplazamiento. Para determinar experimentalmente las deflexiones generadas en diferentes puntos de estructuras, se utilizan varios métodos, dentro de los cuales destaca el uso de programas de procesamiento de acelerogramas. El programa Strong Motion Analyst (SMA), es una herramienta utilizada para el procesamiento de registros de movimientos fuertes, el cual cuenta con la corrección por instrumento, edición de datos, filtrado, integración de acelerogramas, cálculo de espectros de respuesta y es ampliamente aceptado a nivel internacional.

Para la caracterización tanto teórica como experimental de las condiciones locales del terreno, el modelado numérico y la estimación de cocientes espectrales de mediciones de vibración ambiental son ampliamente usados. En este trabajo se utilizó el método de matrices de rigidez para la caracterización teórica, y el método de cocientes espectrales H/V en la caracterización experimental. El método de matrices de rigidez ha

sido utilizado en otros estudios para el modelado numérico de suelos (Contreras, 2010, Song, 2010).

En la sección 3.1 se describen las mediciones de vibración ambiental realizadas, así como del equipo utilizado en este trabajo. Los métodos aplicados para el procesamiento y análisis de datos se presentan en la sección 3.2.

3.1. Datos

En esta sección se hace una descripción del equipo utilizado en las mediciones de vibración ambiental. Este equipo incluye los sensores, grabadora de registro, computadora y otros accesorios. También se explica la ubicación de los sensores y la toma de datos mediante registros de vibración ambiental.

3.1.1 Equipo de medición

Para la realización de las mediciones de vibración ambiental sobre el puente y el terreno, se utilizaron tres acelerómetros triaxiales EpiSensor ES-T, una grabadora Kinometrics SSR-1, una computadora (laptop), baterías, cables de diferentes longitudes y otros accesorios importantes. La figura 10 exhibe cada uno de los elementos del equipo de medición.

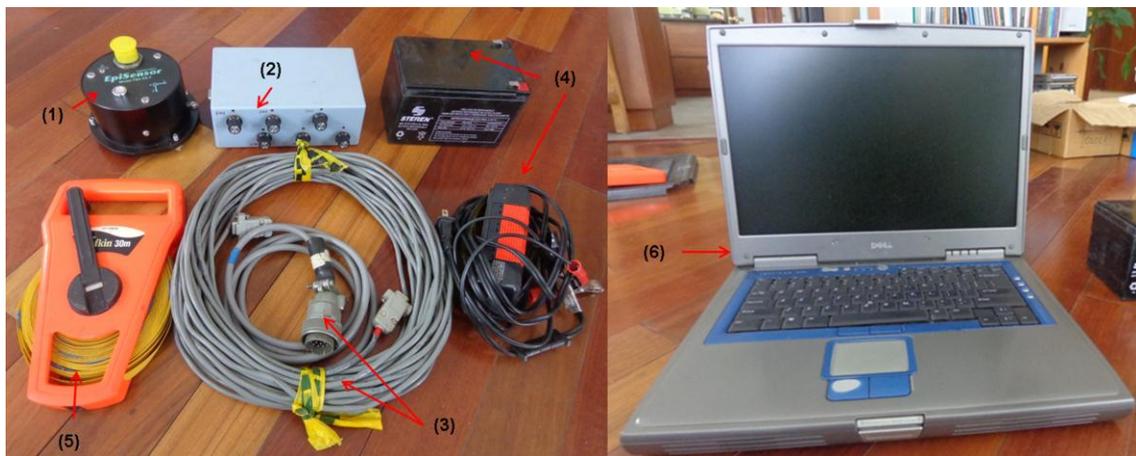


Figura 10. Equipo de medición: (1) sensor (2) interfase de conexión, (3) cables (4) batería y cargador y (6) laptop.

3.1.1.1 Diagramas de conexión del equipo

El equipo de registro se conectó de dos diferentes formas, la primera de ellas (figura 11) se utilizó cuando se tomaron registros de dos componentes de cada uno de los tres sensores. La segunda configuración (figura 12), se empleó cuando se registraron tres componentes de dos sensores.

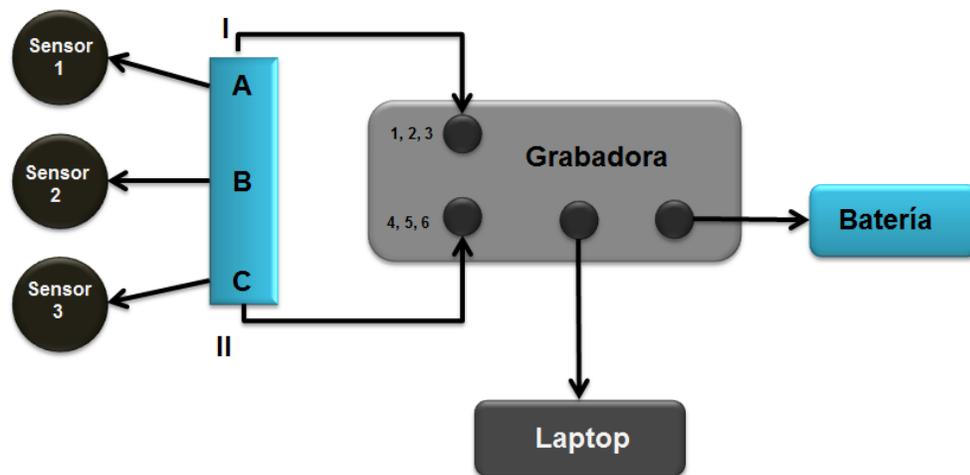


Figura 11. Diagrama 1: tres sensores conectados por medio de una interfase de conexión para registrar dos componentes de cada sensor.

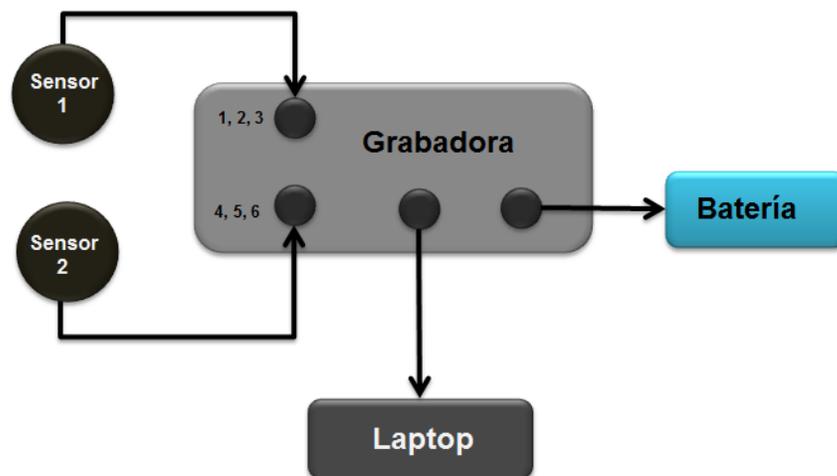


Figura 12. Diagrama 2: dos sensores conectados directamente a la grabadora para registrar las tres componentes de cada sensor.

3.1.1.2 Grabadora de registro

La grabadora de registro que se utilizó es marca Kinemetrics (figura 13), modelo SSR-1 de 6 canales, memoria de estado sólido y convertidor A/D (analógico/digital) de 16 bits. En la tabla 3 se presentan las características y especificaciones más importantes de esta grabadora.



Figura 13. Grabadora Kinemetrics SSR-1 de 6 canales.

Tabla 3. Características y especificaciones de la grabadora

Marca	Kinemetrics
No. Canales	6
Modelo	SSR-1
Memoria	Estado sólido
Convertidor A/D	16 bits
Rango máximo de voltaje	$\pm 2.5V$
Filtros	Tipo Butterworth de 6 polos y Bessel con frecuencias de corte de 5, 15 o 50Hz
Ganancia	1, 10, 100 ó 1000
Frecuencias de muestreo	50, 100 ó 200mps

En las mediciones de vibración ambiental para el presente trabajo, se seleccionó una frecuencia de muestreo de 100Hz y ganancia unitaria, obteniéndose un intervalo de muestreo de 0.01s y frecuencia de Nyquist de 50Hz. Se generaron registros con un contenido de 86 272 muestras o series de tiempo de longitud igual a 862.72s.

3.1.1.3 Sensores

Para obtener las componentes ortogonales del movimiento generado sobre el puente y el terreno, se emplearon tres acelerómetros triaxiales EpiSensor, modelo FBA ES-T (figura 14). Las características y especificaciones de este tipo de sensores se describen en la tabla 4 y, en la figura 15 se presenta la respuesta en frecuencia y fase de los sensores utilizados.



Figura 14. Acelerómetro triaxial EpiSensor FBA ES-T.

Tabla 4. Características y especificaciones del sensor

Marca	EpiSensor / Kinematics
Modelo	FBA ES-T
Ancho de banda DC	200Hz
Sensitividad	20V/g
Rango a escala total	$\pm 0.25g$
Voltaje al rango de escala total	20V

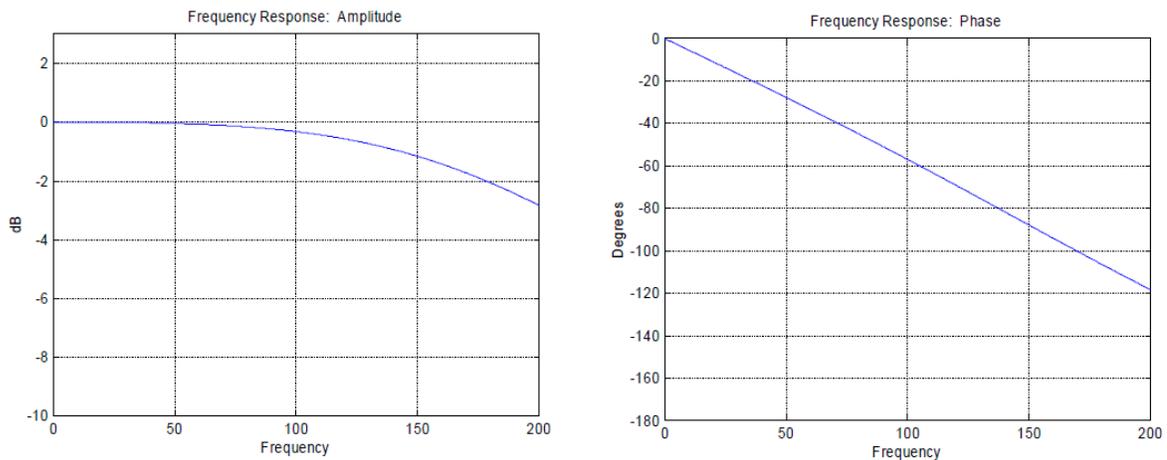


Figura 15. Respuesta en amplitud y fase de sensor EpiSensor. Adaptado de “User guide, EpiSensor Force Balance Accelerometer” de Kinemetrics Inc., 2005, p. 39.

3.1.1.4 Computadora, baterías y cables

Los sensores previamente descritos, se conectan a la grabadora de registro por medio de cables especiales, y se inicia el registro de datos. Una vez que la memoria de la grabadora llega al límite de almacenamiento, se transfieren los datos a una computadora (en este caso a una laptop) para continuar con los registros necesarios. Es necesario alimentar energía a la grabadora y la computadora por medio de baterías, como se muestra en las figuras 11 y 12.

3.1.2 Mediciones de vibración ambiental

Las mediciones de vibración ambiental se realizaron sobre el cuerpo B del puente Manantiales y en el suelo que lo rodea. Se obtuvieron registros de aceleración de cinco puntos diferentes de la estructura, para lograr esto, personal de CAPUFE (Caminos y Puentes Federales) se encargó de cerrar uno de los dos carriles del cuerpo B, el izquierdo, permitiendo así el desarrollo de las mediciones mientras el tránsito seguía circulando por el carril contiguo (figura 17). Sobre el terreno natural, se efectuaron mediciones en campo libre en cuatro puntos diferentes.

Con el propósito de registrar las tres componentes ortogonales de vibración ambiental, se generaron diferentes arreglos para la obtención de los registros de aceleración de las componentes transversal, longitudinal y vertical de los diversos puntos seleccionados sobre estructura y el terreno natural, para posteriormente procesarlos y extraer las propiedades dinámicas de la estructura.

Se colocó un sensor al centro de cada uno de los tres claros, y debido a que la grabadora de registro es de seis canales, se realizaron registros simultáneos con diferentes combinaciones de componentes. A su vez, con el uso de un cronómetro de mano, se registró el tiempo al cual cruzaban los vehículos por determinado punto sobre el puente, anotando también el número de ejes y tipo de vehículo (ver sección 3.2.6), facilitando así la identificación de los intervalos de tiempo en que se tenía el efecto de vibraciones inducidas. Además, se realizaron mediciones sobre los apoyos de las dos pilas (P1 y P2), en este caso en particular, se utilizaron dos sensores conectados directamente a la grabadora de registro.

Para conocer el comportamiento del terreno, se tomaron registros en campo libre, esto es, alejados un mínimo 10m de la base de las pilas. En estas mediciones, se colocaron dos acelerómetros, conectados de manera directa a la grabadora, registrando las tres componentes (transversal, longitudinal y vertical) de vibración ambiental (figura 16).



Figura 16. Sensor ubicado en campo libre.

La colocación del sensor en cada una de los diferentes puntos mencionados, consistió en ubicar la posición en la cual se deseaba obtener el registro, orientar la componente longitudinal (“Y”) del sensor con la componente longitudinal del puente, hacer coincidir la componente transversal (“X”) del sensor con la componente transversal de la estructura, nivelar el sensor utilizando los tres tornillos que tiene en su base, proteger y conectar el cable en el sensor.

3.1.3 Ubicación de los sensores y registro del paso de vehículos

En las mediciones de vibración ambiental se realizaron cinco arreglos diferentes, tres de ellos al nivel de la superestructura (figura 17) y dos al nivel del terreno natural. Se trabajó con tres acelerómetros, a cada uno de ellos se le asignó un nombre diferente (S16, S17 y S18) para tener un mejor control de los registros generados. También se tomó el registro del paso de vehículos que transitaron por el puente durante las mediciones realizadas.

A continuación se describe el procedimiento que se llevó a cabo para el registro del paso de camiones pesados, los arreglos y sus diferentes mediciones, y en la tabla 5 se resume la información de los arreglos.



Figura 17. Sensor ubicado sobre la superficie de rodamiento mientras el tráfico fluía por el carril contiguo.

Tabla 5. Resumen de arreglos y mediciones de vibración ambiental

Arreglo	Medición	Sensor	Ubicación	Componentes	Observaciones
A1	M1	S16	Centro C3	Longitudinal y vertical	-
		S17	Centro C2	Longitudinal y vertical	-
		S18	Centro C1	Longitudinal y vertical	Sin registro en componente vertical
	M2	S16	Centro C3	Transversal y vertical	-
		S17	Centro C2	Transversal y vertical	-
		S18	Centro C1	Transversal y vertical	Sin registro en componente vertical
	M3	S16	Centro C3	Transversal y longitudinal	-
		S17	Centro C2	Transversal y longitudinal	-
		S18	Centro C1	Transversal y longitudinal	-
A2	M1	S17	Intersección C3-C2	Transversal, longitudinal y vertical	-
		S18	Intersección C2-C1	Transversal, longitudinal y vertical	Sin registro en componente transversal
A3	M1	S16	A 38.36m de estribo 1	Transversal, longitudinal y vertical	-
		S18	Centro C2	Transversal, longitudinal y vertical	Sin registro en componente transversal
A4	M1	S16	Punto 1 en campo libre	Transversal, longitudinal y vertical	Sin registro en componente transversal
		S17	Punto 2 en campo libre	Transversal, longitudinal y vertical	-
A5	M1	S16	Punto 3 en campo libre	Transversal, longitudinal y vertical	Sin registro en componente transversal
		S17	Punto 4 en campo libre	Transversal, longitudinal y vertical	-

3.1.3.1 Registro del tipo de vehículos

Debido a que las deflexiones máximas calculadas teóricamente se presentan al centro de cada claro del puente, se tomó la decisión de colocar sensores en estos puntos para obtener las aceleraciones en la componente vertical. Por seguridad del personal y del equipo, los sensores se colocaron aproximadamente al centro del carril cerrado y no en el centro geométrico (figura 17).

Con el objetivo de estimar las deflexiones generadas por diferentes tipos de vehículos, se tomó nota del tiempo al cual cruzaba cada vehículo pesado por el centro del claro 2 (punto de referencia), usando cronómetro de mano. También se generó un registro de las características de cada camión, anotando el número de ejes y cajas, para posteriormente, clasificarlo bajo la NOM-012-SCT-2-2008 y obtener el peso máximo permitido con el cual circula cada vehículo de autotransporte (ver apéndice D).

Una vez clasificados los vehículos que pasaron por el puente durante los registros de aceleración, se seleccionaron las porciones de las series de tiempo correspondientes a la respuesta generada por cada uno de los camiones. De esta forma, se aplicó el procedimiento que se describe en la sección 4.1.7 para obtener las deflexiones inducidas por cada vehículo registrado y relacionarlas con el peso del mismo.

3.1.3.2 Primer arreglo

En el primer arreglo se emplearon tres acelerómetros (S16, S17 y S18), se colocó un sensor al centro de cada uno de los tres claros del puente y posteriormente se llevaron a cabo tres mediciones diferentes, en la figura 18 se muestra la posición de los tres sensores.

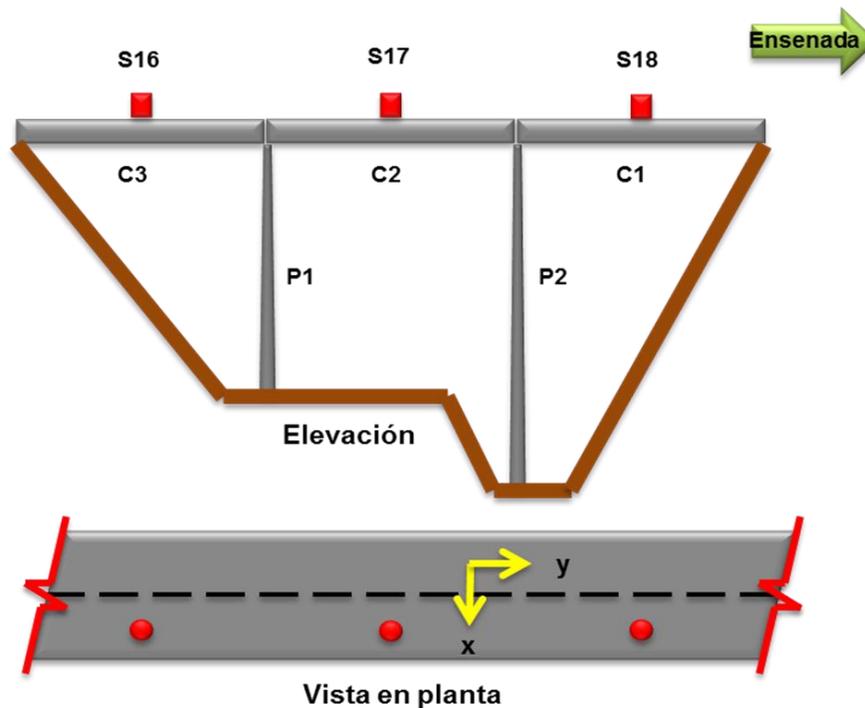


Figura 18. Primer arreglo de sensores, en el cual se realizaron tres mediciones: (1) componente longitudinal y vertical, (2) componente transversal y vertical y (3) componente transversal y longitudinal.

En la primera medición se registró la componente longitudinal y vertical de cada uno de los tres sensores. En la segunda medición, se tomaron registros de la componente transversal y vertical de los sensores. Por último, en la tercera medición se registró la componente transversal y longitudinal de los tres acelerómetros.

3.1.3.3 Segundo arreglo

Se utilizaron dos sensores en el segundo arreglo (S17 y S18). En este caso, los sensores se colocaron sobre los apoyos de las dos pilas (P1 y P2), esto es, sobre las intersecciones de los claros C1-C2 y C2-C3. En el segundo arreglo se tomó una medición, registrándose las componentes transversal, longitudinal y vertical de cada uno de los acelerómetros (figura 19).

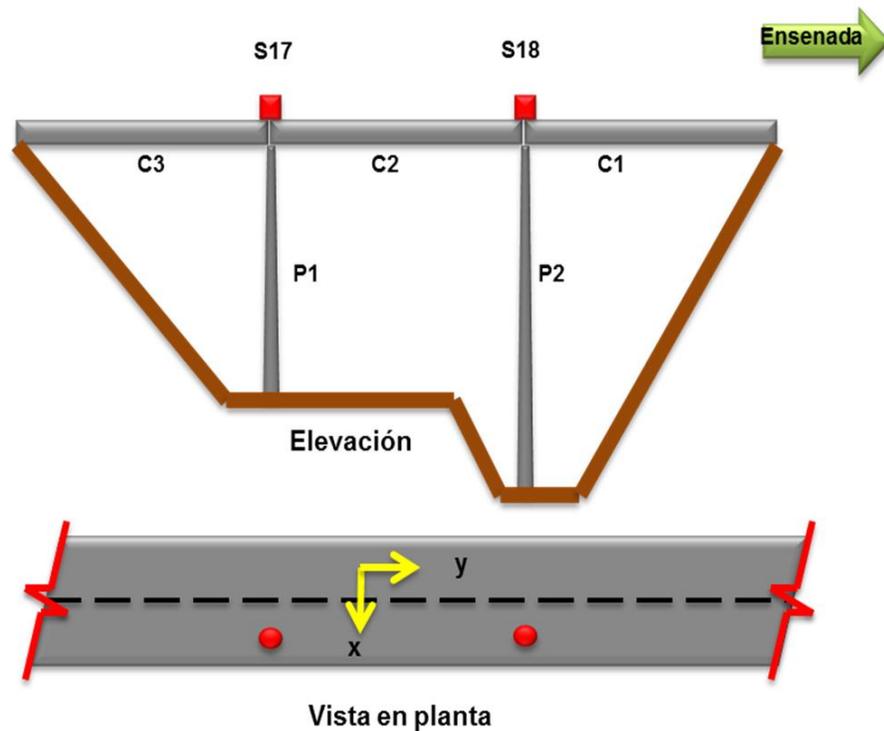


Figura 19. Segundo arreglo: registro de las componentes transversal, longitudinal y vertical de dos sensores ubicados en las intersecciones de los claros C1-C2 y C2-C3.

3.1.3.4 Tercer arreglo

En el tercer arreglo se usaron los sensores S16 y S18. El sensor S18 se posicionó al centro del claro C2 y el sensor S16 alejado 38.36m del estribo 1. En una sola medición, se generaron registros de las componentes transversal, longitudinal y vertical de cada uno de los dos sensores (figura 20).

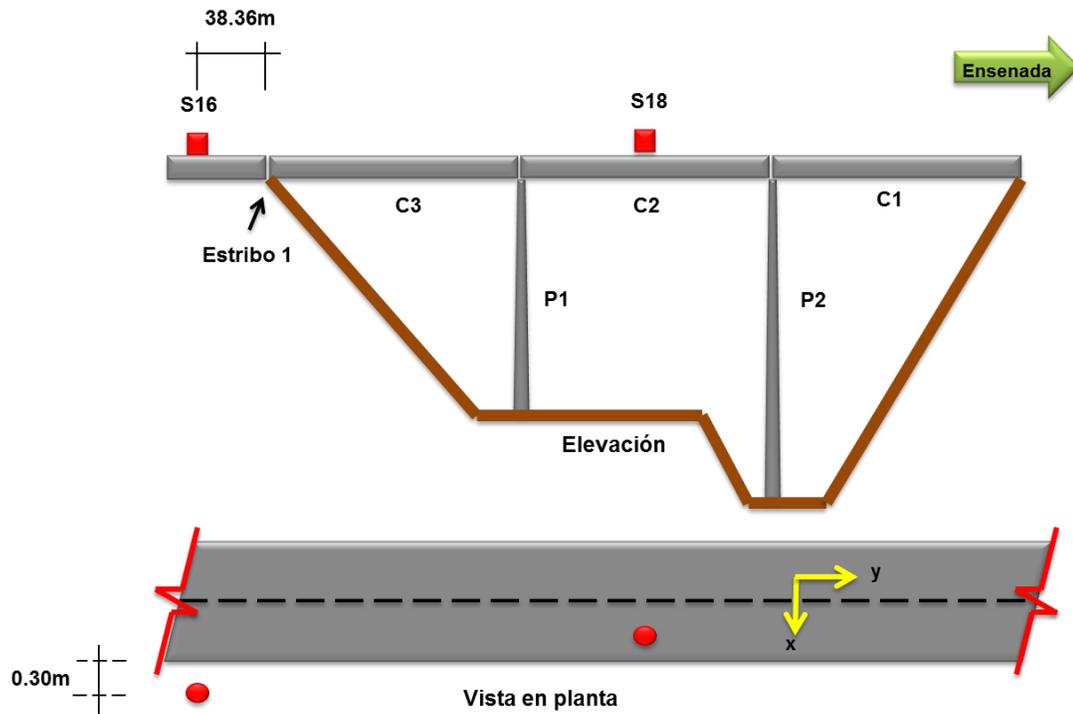


Figura 20. Tercer arreglo: medición de componente transversal, longitudinal y vertical de dos sensores ubicados al centro del claro C2 y a 38.36m alejado de estribo 1.

3.1.3.5 Cuarto arreglo

El cuarto arreglo se desarrolló en campo libre, en el cual se requirieron dos sensores (S16 y S17), la ubicación de cada uno de ellos se puede visualizar en la figura 21. El sensor S16 se colocó bajo el claro 1 del cuerpo B y el sensor S17 entre el cuerpo A y B. Los dos acelerómetros se orientaron de la misma forma que se hizo en las mediciones sobre el puente. Se obtuvieron registros de las dos componentes horizontales y la vertical, realizando una sola medición.

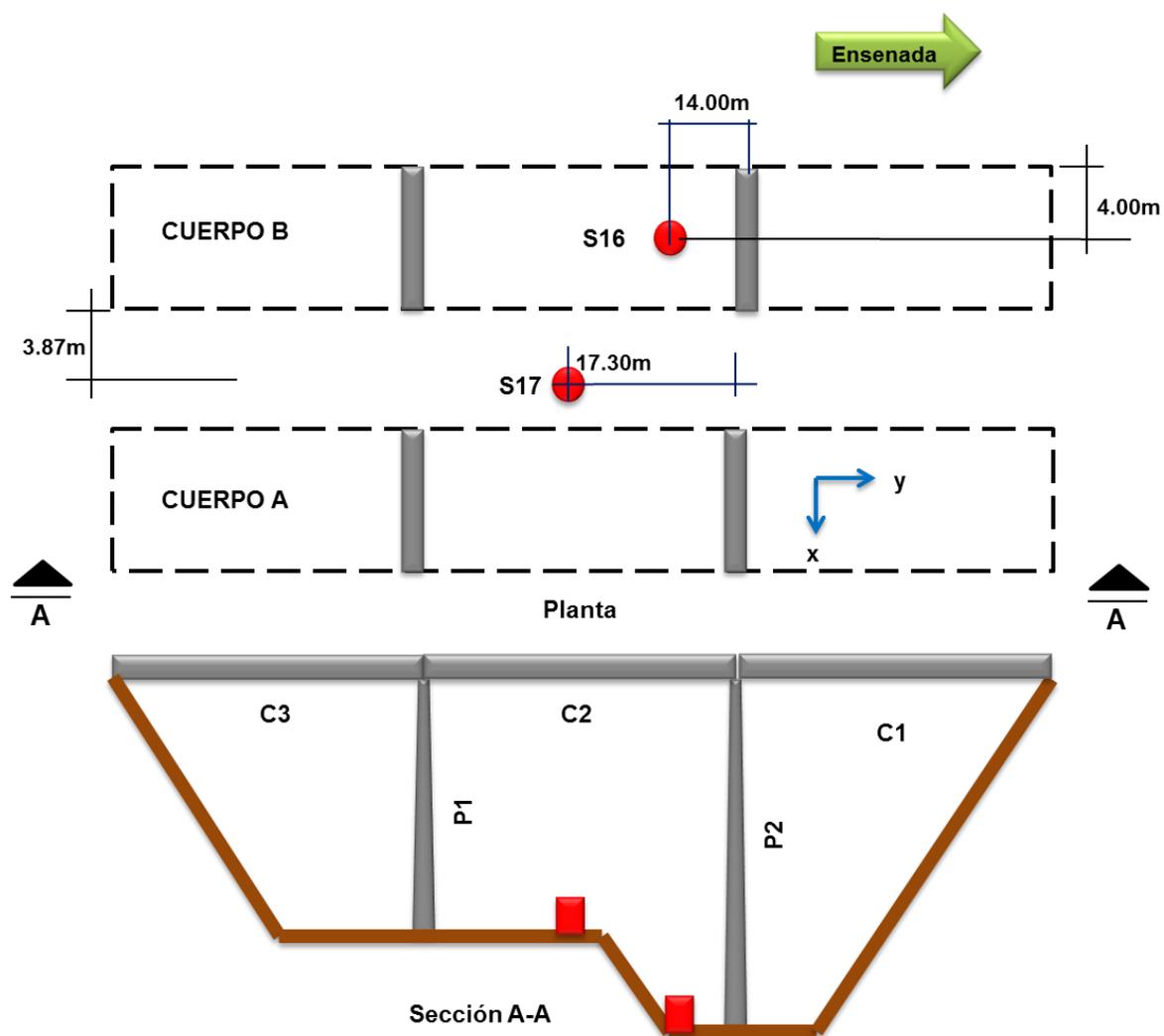


Figura 21. Cuarto arreglo: registro de la componente transversal, longitudinal y vertical de dos sensores ubicados en campo libre.

3.1.3.6 Quinto arreglo

De manera similar al arreglo anterior, en el arreglo 5 se utilizaron dos sensores (S16 y S17), registrando la componente transversal, longitudinal y vertical de ambos puntos. El sensor S16 fue ubicado a 17.00m aguas arriba del cuerpo B y el sensor S17 se posicionó a 15.00m aguas abajo del cuerpo B (figura 22).

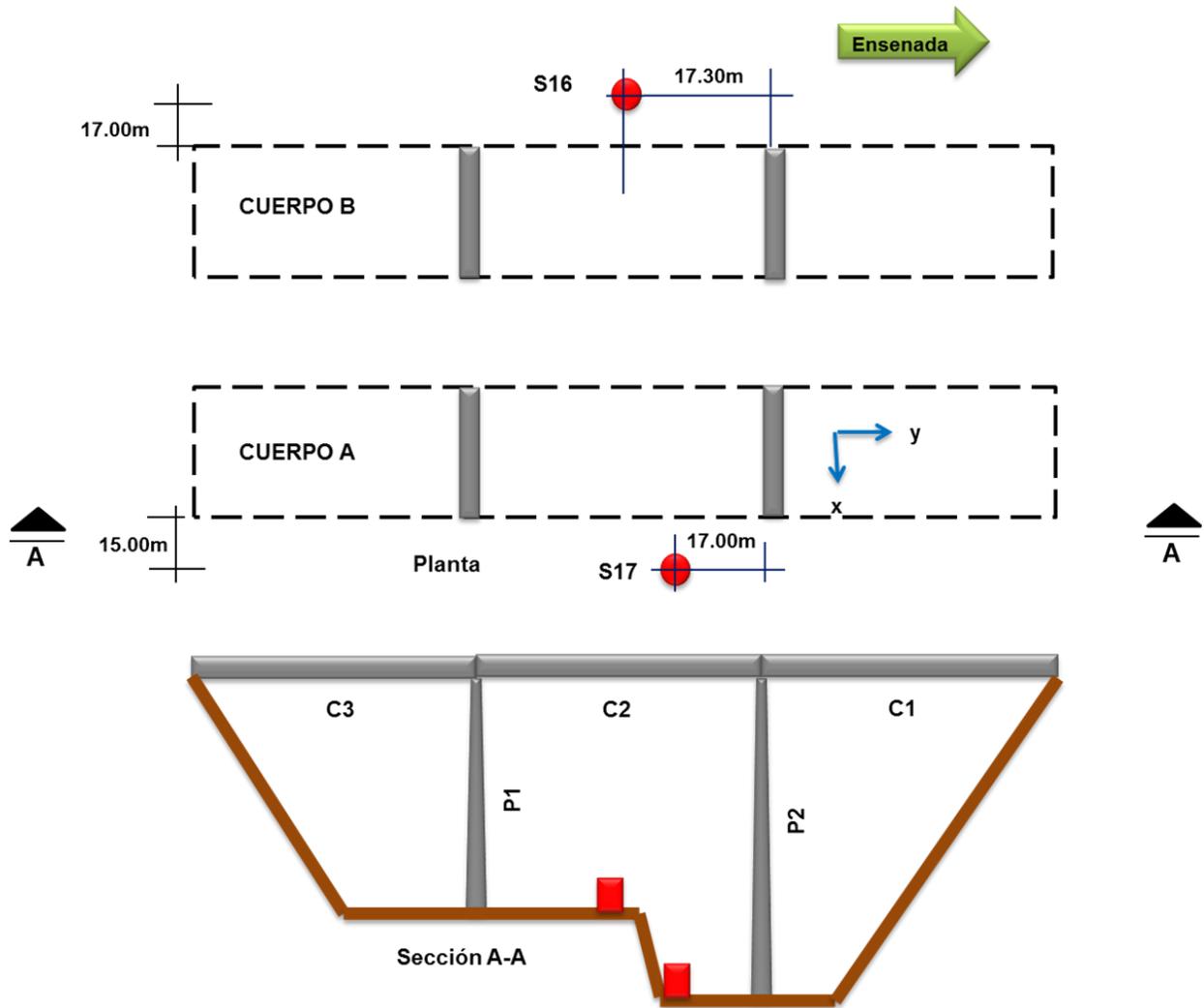


Figura 22. Quinto arreglo: medición de la componente transversal, longitudinal y vertical de dos sensores ubicados sobre el nivel del terreno natural.

3.2 Métodos de procesado y análisis de datos

Los métodos utilizados en el presente trabajo son explicados en esta sección. Se describirán los espectros de Fourier, espectros de densidad de potencia (PSD), cocientes espectrales, técnica del decremento aleatorio (TDA), obtención de deflexiones máximas esperadas, estimación de deflexiones experimentales usando el programa Strong Motion Analyst (SMA), modelado numérico en SAP2000 y modelado numérico del suelo por medio de la propagación de ondas con el método de matrices de rigidez.

3.2.1 Espectros de Fourier

El espectro de Fourier es una herramienta que ofrece información acerca del contenido de frecuencias de series de tiempo y se define matemáticamente como:

$$FS = \sqrt{\left[\int_0^t a(\tau) \cos(w\tau) d\tau \right]^2 + \left[\int_0^t a(\tau) \text{sen}(w\tau) d\tau \right]^2} \quad (1)$$

Por medio de los espectros de Fourier, se determinan cuáles son las frecuencias o periodos más importantes de la señal, visualizando los valores en los cuales se tienen los picos de amplitud. También se puede ver cuál es la frecuencia predominante del registro de aceleración.

Numéricamente, la estimación del espectro de Fourier se realiza mediante la transformada discreta de Fourier (TDF) utilizando el programa MATLAB. La definición matemática de la transformada discreta de Fourier es:

$$X^{(k)}[l] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^{(k)}[n] e^{-i2\pi nl/N} \quad (2)$$

3.2.2 Espectros de densidad de potencia (PSD)

Otro método con el cual se determina la frecuencia fundamental en el presente trabajo, es el de espectros de densidad de potencia (Power Spectral Density o PSD). Este método ha sido utilizado para definir el periodo fundamental de sistemas y se ha usado para estudiar la vibración teórica y experimental de edificios (Huerta et al., 2007).

Los espectros de densidad de potencia, presentan la ventaja de no tener que extraer, manualmente o mediante un algoritmo automático, los transientes presentes en la señal por analizar (energía presente en las series de tiempo debido al paso de peatones, motores eléctricos, elevadores, u otras fuentes de tipo industrial).

Este método sigue las reglas del análisis de Fourier, mediante la cual se multiplica el espectro de Fourier por su complejo conjugado y estima el promedio del conjunto de subsegmentos de la serie de tiempo original. El resultado de dicha sobreposición ayuda también para disminuir aquellos picos que son menos significativos y acentúa aquellos con un mayor contenido de energía.

La expresión matemática de lo descrito anteriormente es la siguiente:

$$\hat{S}^{(k)}[l] = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |X^{(k)}[l]|^2, \quad l = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad (3)$$

3.2.3 Cocientes espectrales (HVSR)

El método de cocientes espectrales con mediciones de vibración ambiental, es también conocido como método de Nakamura (1989). Este método permite evaluar de manera experimental el período fundamental de depósitos de sedimentos, utilizando registros de vibración ambiental o microtemblores obtenidos en la superficie.

Esta técnica ha demostrado generar resultados confiables para la obtención de la frecuencia preferencial de vibración del suelo. Las principales ventajas que hacen atractivo su uso son: (i) no necesitan una fuente externa para la generación de vibraciones, (ii) no se requiere de un sitio de referencia, (iii) es fácil de aplicar y (iv) es más económica que algunas técnicas geofísicas tradicionales.

El método de Nakamura (1989) considera que al efectuar mediciones de vibración ambiental en suelos rocosos o muy rígidos, las componentes verticales y horizontales son similares. En este caso, al estimar la relación entre los espectros de Fourier de las componentes horizontales y verticales, el resultado sería aproximadamente 1. Al realizar mediciones sobre materiales no consolidados, la amplificación del movimiento de las componentes verticales es relativamente baja comparada con la amplificación del movimiento de las componentes horizontales.

Nakamura (1989) describe que al realizar el cociente de los espectros de Fourier de la componente horizontal y vertical, se elimina el efecto de las ondas Rayleigh que se presenta en la vibración ambiental y se obtiene una estimación de la función de transferencia de capas de depósitos superficiales.

En esta tesis se calculan los cocientes espectrales utilizando espectros de Fourier y espectros de densidad de potencia (PSD). El procedimiento que se sigue es explicado en la sección 4.1.5.

III.2.4 Técnica del Decremento Aleatorio (TDA)

La técnica del decremento aleatorio ha sido aplicada en diversas ramas de la ingeniería para caracterizar sistemas y determinar valores de amortiguamiento. En ingeniería civil se ha usado para la caracterización de sistemas estructurales, tales como puentes y edificios (Kohler et al., 2005, Ortiz et al., 2010, Mikael et al., 2013) y también en estudios para obtener características de suelos (Fernández et al., 2009, Bejarano, 2006).

La TDA puede ser utilizada para determinar el período dominante y el amortiguamiento de un sistema sujeto a una excitación aleatoria variable. Con este método no se requiere del conocimiento de la excitación, ya que el sistema es considerado un proceso aleatorio de ruido blanco (Haddara y Wu, 1994). La técnica del decremento aleatorio se basa en el supuesto de que la respuesta dinámica de un sistema es lineal, invariante en el tiempo y sujeta a una excitación con ruido blanco gaussiano, por lo que el principio de superposición puede usarse para formular la ecuación del decremento aleatorio. El objetivo principal de la TDA es extraer de la respuesta total, la componente que corresponde a la vibración libre del sistema. Los fundamentos matemáticos de esta técnica fue desarrollada por Chang (1975) y un resumen de la misma se puede consultar en Caldwell (1978).

De acuerdo con la TDA (Ortiz et al., 2010), la respuesta dinámica de un sistema consta de dos partes:

- 1) una componente determinística que correspondiente a las vibraciones libres
- 2) una componente aleatoria correspondiente a las vibraciones forzadas.

El objetivo de esta técnica es eliminar la componente aleatoria y obtener de la componente determinística, la curva de decaimiento típico de las vibraciones libres, de donde se pueden estimar el valor del amortiguamiento y el período dominante.

La figura 23 es una representación gráfica de la hipótesis anterior. Dicha hipótesis establece que la respuesta de cada segmento consiste de tres términos. El primer término corresponde a las vibraciones libres que resultan del desplazamiento inicial, el cual es el mismo para todos los segmentos. El segundo término corresponde a la respuesta libre del sistema a la velocidad inicial. A cada segmento con velocidad inicial positiva, le sigue otro con velocidad inicial negativa, de forma se espera que este término se minimice o se cancele a medida que aumente el número de segmentos a promediar. Por último, el tercer término corresponde a las vibraciones forzadas, el cual es aleatorio y se espera se cancele en el promediado de los segmentos, debido a su carácter aleatorio.

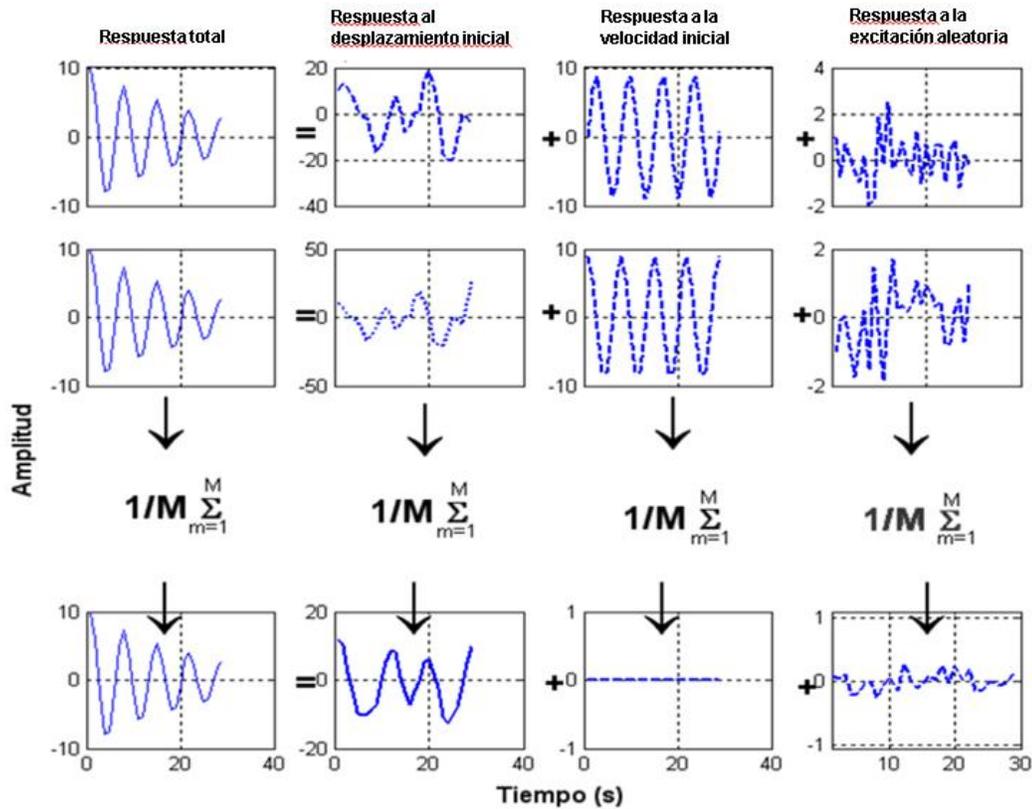


Figura 23. Representación gráfica de la hipótesis de la TDA. Adoptado de “Estudio de la Técnica del Decremento Aleatorio para la estimación in-situ de propiedades de suelos” de Bejarano, 2006. Tesis de maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, p. 8.

Los segmentos se superponen unos a otros para obtener un valor promedio llamado *firma característica del sistema*. Para obtenerla, es necesario fijar un umbral de amplitud y_0 y una duración de la ventana de tiempo τ . Cada vez que la señal pase por el umbral de amplitud y_0 , comienza un segmento, el cual termina cuando su duración es igual a τ . Mientras mayor es el número de segmentos considerados, mejor converge la firma característica a la forma de la curva de vibraciones libres del sistema.

La siguiente ecuación, propuesta por Cole (1973), describe como se obtiene numéricamente la firma característica de un sistema:

$$\delta(\tau) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M y(t_m + \tau) \quad (4)$$

donde t_m representa los tiempos a los cuales diferentes segmentos de la serie de tiempo original $y(t)$ atraviesan el umbral predeterminado de amplitud y_0 , y τ es la longitud del segmento también previamente definido, y cuyo inicio corresponde con el tiempo t_m . M es el número de segmentos que cumplen con las condiciones de amplitud y duración de la ventana de tiempo.

3.2.5 Deflexiones teóricas y experimentales

Un parámetro importante en el diseño de una estructura, es la deflexión máxima esperada (teórica), y en las estructuras ya construidas, es conveniente conocer la deflexión real obtenida de manera experimental.

Para la estimación teórica de las deflexiones debido a carga móvil, se considera el peso de los ejes de determinado tipo de vehículo en su posición más crítica, su impacto, y finalmente utilizando el método de la viga conjugada (Fajardo, 2011), y así se obtienen dichas deflexiones.

Con el fin de estimar las deflexiones de manera experimental y su patrón de comportamiento (aunque no las máximas), se hace uso de los registros de aceleración, y con un procesamiento adecuado, se determinan los desplazamientos generados en puntos específicos de la estructura.

Una vez definidos los puntos en los cuales se requiere determinar los desplazamientos verticales, se colocan sensores para obtener los registros de aceleración de la componente vertical. Los registros obtenidos son sometidos a un procedimiento (ver sección 4.6) para obtener los desplazamientos verticales mediante una doble integración numérica con respecto al tiempo.

El procesamiento realizado incluye las siguientes acciones:

- a. Corrección de línea base

- b. Corrección instrumental
- c. Integración para obtener velocidades
- d. Integración para obtener desplazamientos

La corrección de línea base, la corrección instrumental y la doble integración se realizó utilizando el programa SMA (Strong Motion Analyst), el cual se describe a continuación.

3.2.5.1 SMA

El programa SMA, es una herramienta diseñada para el procesamiento de acelerogramas desarrollado por Kinematics. En el SMA se generan tres volúmenes de procesamiento (V1, V2 y V3).

El volumen 1 (V1) consiste en convertir la serie de tiempo en unidades de aceleración (cm/s^2), generando un archivo con terminación .V1. En el volumen 2 (V2) se realiza la corrección instrumental y la integración para obtener velocidad y desplazamiento, guardando las series en un archivo .V2. En el volumen 3 (V3), se determinan los espectros de Fourier y espectros de respuesta para diferentes tipos de amortiguamiento y diferentes periodos, generando un archivo con terminación .V3.

Por otra parte, el programa SMA tiene dos opciones para la obtención de los desplazamientos, la primera utiliza el método de Trifunac (Trifunac y Lee, 1973) y la segunda usa el método de Shakal & Ragsdale (Shakal y Ragsdale, 1984).

3.3 Modelado Numérico

En esta sección se describen los conceptos y métodos generales utilizados para el modelado numérico de puentes y del suelo. El modelado del puente se realizó con el programa de análisis estructural SAP2000 y el modelado numérico del suelo en su entorno, se efectuó mediante la propagación de ondas con el método de matrices de rigidez.

3.3.1 SAP2000

El comportamiento de estructuras es de vital importancia, y gracias al avance de la informática, hoy en día hay una amplia variedad de programas para el cálculo y diseño estructural. Esto hace posible tener un mejor entendimiento del comportamiento de una estructura en poco tiempo, comparado con el que se hacía algunas décadas atrás.

El programa SAP2000 (Structural Analysis Package) es uno de los más usados para resolver sistemas estructurales sometidos a diferentes condiciones de carga, cuenta con una interfaz gráfica muy amigable y con el conocimiento adecuado en estructuras, es fácil de utilizar.

SAP2000 realiza análisis tridimensional estático y dinámico de estructuras por el método de elementos finitos. Este método consiste en dividir la estructura en elementos y describe el comportamiento ellos por medio de ecuaciones constitutivas básicas. Estos elementos se interconectan en nodos y al aplicar el principio de equilibrio, se obtiene un conjunto de ecuaciones simultáneas (García, 1998).

El programa SAP2000 contiene cuatro tipos de análisis:

- 1) estático
- 2) P-delta
- 3) modal para los modos de vibración (usando eigenvectores o vectores de Ritz)
- 4) de cargas móviles para cargas vivas de vehículos en puentes.

En este estudio se realiza el análisis modal usando eigenvectores y el análisis de cargas móviles usando el módulo de puentes.

Con el análisis de eigenvectores se determinan las formas modales para vibración libre no amortiguada y frecuencias del sistema (ver apéndice E). Con estos modos naturales se obtiene una visión excelente en el comportamiento de la estructura. El análisis de

eigenvectores (vectores característicos) se utiliza la solución de la ecuación de eigenvalores (valores característicos) generalizada dado por la ecuación 5:

$$K\Phi = M\Phi\Omega^2 \quad (5)$$

donde:

K = matriz de rigidez

M = matriz diagonal de masa

Ω = matriz diagonal de eigenvalores

Φ = matriz de los correspondientes eigenvectores (formas modales)

3.3.2 Propagación de ondas con el método de matrices de rigidez

El modelado numérico del suelo se realizó mediante el método de matrices de rigidez propuesto por Kausel y Roësset (1981). Este método se utiliza para describir la propagación de ondas mediante el uso de matrices de rigidez (ver apéndice K).

El modelado de la respuesta del suelo se realiza en términos de la función de transferencia, espesor de las capas del subsuelo, frecuencia fundamental de vibración, número de onda, densidad, relación de Poisson y velocidad de ondas de corte.

El método consiste en encontrar la matriz de rigidez para cada estrato del subsuelo, la cual dependerá del número de onda, frecuencia y de las propiedades del material. De esta forma es posible ensamblar el sistema completo y de manera similar al método matricial utilizado en el análisis estructural, encontrar los respectivos desplazamientos.

El método de matrices de rigidez ha sido utilizado en diversos trabajos para la caracterización de suelos (Tapia, 2009, Contreras, 2010, Song, 2010). En este estudio, las propiedades del material y espesores de las capas del subsuelo, se obtienen del estudio de mecánica de suelos descrito en la sección 2.4.

Capítulo 4

Procesado de datos

En la primera parte de esta sección, se describe el procesado de datos para: (i) la estimación de las frecuencias fundamentales, (ii) el amortiguamiento, y (iii) el patrón de deflexiones de la estructura. Por su parte en la segunda sección, se explica el modelado numérico del puente Manantiales y del suelo que lo rodea.

4.1 Secuencia del procesado de datos

El procesamiento de datos que se aplicó a los registros de vibración ambiental, se realizó siguiendo la secuencia descrita a continuación:

- i. Conversión a unidades físicas de aceleración (cm/s^2). No fue necesario realizar corrección instrumental debido a que se trabajó en la banda de frecuencias de los sensores, en la que su respuesta es plana.
- ii. Estimación de los espectros de Fourier y espectros de densidad de potencia, ambos para la estimación de la frecuencia preferencial de vibración de la estructura.
- iii. Estimación de cocientes espectrales H/V, para determinar la función de transferencia del terreno en la vecindad de la estructura.

En los apartados anteriores se siguió el esquema estándar de procesado de datos de señales que incluye: (a) remoción de la media, (b) corrección de línea base, (c) selección de longitud de segmentos para dividir la serie de tiempo original, (d) aplicación de ventana del tipo taper cosenoidal Hanning, y (e) suavizado de los espectros promediados con una ventana móvil.

- iv. Aplicación de la técnica del decremento aleatorio (TDA), para la estimación conjunta de amortiguamiento y periodo fundamental de la estructura.
- v. Estimación del patrón de deflexiones generadas al centro de los claros del puente.

4.1.1 Preparación para procesamiento de datos

Debido a que la grabadora de registro genera archivos en formato binario (cuentas), la preparación para el procesamiento de datos comenzó con la conversión a formato ASCII. El programa cnva.exe (propiedad de Kinematics) fue utilizado para realizar la conversión a formato ASCII en unidades de volts.

Se desarrolló un programa en plataforma de MATLAB con el que se graficaron las series de tiempo y se realizó la conversión de volts a unidades de aceleración (cm/s^2) utilizando el factor de sensibilidad del acelerómetro (ver sección 3.1.1.3). En el apéndice F se proveen detalles del procedimiento y las constantes específicas del equipo utilizado para la conversión de cuentas a unidades físicas de aceleración. En esta etapa se hizo también una inspección visual de las series de tiempo, con el objetivo de identificar cualquier anomalía en los registros.

En esta parte se detectaron seis registros en los cuales no se tuvo señal, por lo que fueron excluidas de la base de datos. En las observaciones de la tabla 5 se mencionan los registros que no se tomaron en cuenta en el procesamiento de datos.

4.1.2 Corrección de línea base

La corrección de línea base se realizó utilizando un programa desarrollado en la plataforma de MATLAB y se aplicó en todas las series de tiempo registradas. La corrección de línea base consistió en remover la media a cada uno de los elementos de la serie de tiempo, y cuando fue necesario se ajustó un polinomio a la serie de tiempo, para regresar la señal a su línea base, en este paso se aplicó un algoritmo utilizado por Tapia (2009).

4.1.3 Espectros de Fourier

Las series de tiempo de aceleración con 86 272 muestras, se dividieron en segmentos de 8400 muestras de longitud, lo cual permitió visualizar frecuencias de interés para este trabajo (0.1Hz a 20Hz). El ensamblaje para estimar los espectros de Fourier de los segmentos se hizo con un traslape del 75%. Una vez obtenidos los segmentos, se determinaron los espectros de Fourier de cada uno de ellos y los espectros finales se estimaron determinando la media y la mediana de los segmentos. Para la obtención de los espectros de Fourier de esta sección, se utilizó como base un algoritmo usado en Huerta (2002).

4.1.4 Espectros de densidad de potencia (PSD)

Otro método con el cual se determinó la frecuencia fue mediante la estimación de los espectros de densidad de potencia (PSD). La estimación de los PSD sigue las reglas del análisis de Fourier, según fue descrito en la sección 3.2.2, se realiza multiplicando el espectro de Fourier por su complejo conjugado y se estima el promedio de los subsegmentos de la serie de tiempo original.

De manera similar a la descrita en la sección 4.1.3, las series de tiempo de aceleración de 86 272 muestras, se dividieron en de 8192 muestras de longitud usando un traslape del 75%.

Una vez divididos los segmentos, se determinó la transformada digital de Fourier (DFT) y se multiplicó por su complejo conjugado. Los espectros de potencia finales se obtuvieron promediando los segmentos. Para la obtención de los PSD, se utilizó como base el algoritmo usado en Huerta (2002).

4.1.5 Cocientes espectrales (HVSR)

Se realizaron los cocientes espectrales utilizando los espectros de amplitud de Fourier y los espectros de densidad de potencia de los registros tomados en campo libre. A continuación se enuncia el procedimiento que se siguió.

- i. Se seleccionan secciones (ventanas) de ruido ambiental donde no se observen notoriamente la presencia de señales transitorias.
- ii. Se calculan las transformadas de Fourier y espectros de densidad de potencia (PSD) de cada componente (vertical y horizontal), según fue descrito en las secciones 4.1.3 y 4.1.4.
- iii. Se calcula la razón espectral H/V mediante el valor medio cuadrático de las dos componentes horizontales H1 y H2 (ortogonales), expresada por la ecuación 6.

$$\frac{H}{V} = \sqrt{\frac{H_1^2 + H_2^2}{2V^2}} \quad (6)$$

En los puntos en los cuales se tuvo solamente una componente horizontal y la componente vertical, se realizó el cociente espectral mostrada en la ecuación 7.

$$\frac{H}{V} = \frac{H_2}{V} \quad (7)$$

donde:

H₁: componente transversal

H₂: componente longitudinal

V: componente vertical

R: cociente espectral

- iv. Se aplica un suavizado de media móvil a la razón espectral con una cantidad de puntos del 0.1 % de la longitud del espectro.
- v. Se estima tanto la media aritmética y la mediana de los cocientes espectrales de todas las ventanas.
- vi. Se grafica el promedio de las curvas en ejes logarítmicos.

Este procedimiento ha sido utilizado para la obtención de la frecuencia fundamental de suelos en diversos trabajos, por ejemplo Song, 2010 y Tapia, 2009. El grupo SESAME ha hecho algunas recomendaciones para la selección de la frecuencia fundamental (SESAME, 2004) y determinar la duración de los registros (ver apéndice B).

4.1.6 Técnica del Decremento Aleatorio (TDA)

La técnica del decremento aleatorio se aplicó en los registros de aceleración, de las componentes verticales generadas al centro del claro 2 y claro 3 del puente. La TDA no se aplicó en los datos del claro 1, ya que no se tuvieron registros de la componente vertical en este punto.

Partiendo de las series de tiempo de aceleración, se seleccionaron segmentos en los cuales se visualiza una señal característica de vibración libre amortiguada. Una vez seleccionados los segmentos, se aplicó la TDA utilizando un programa desarrollado en ambiente MATLAB en Huerta et al. (2002).

Los detalles de los fundamentos teóricos y del procedimiento numérico para aplicar la TDA fueron dados en la sección 3.2.4. Debido a que no existe un parámetro explícito para seleccionar el umbral de amplitud y la longitud de la ventana que genere la mejor curva de pseudovibración libre amortiguada, en el desarrollo del programa para la aplicación de la TDA, se usó un rango de valores de umbral de amplitud (y_0) y de longitud de segmento (τ), con lo que se obtiene una matriz de curvas de pseudovibración libre, y se aplicó un criterio estadístico para la selección de la mejor firma característica, mismo que se describe a continuación (Bejarano, 2006):

i) Estimación del coeficiente de correlación r de Pearson

La curva de pseudovibración libre amortiguada presenta un decaimiento logarítmico al graficarse a escala normal. Al representar sus amplitudes absolutas en forma lineal

utilizando una escala semilogarítmica, es posible realizar una regresión lineal e identificar el mejor ajuste lineal mediante la estimación del coeficiente de correlación.

El coeficiente de correlación r es dado por la siguiente fórmula (Press *et al.*, 1986):

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

donde:

$$\bar{x} = \text{media de los valores } x_i \text{ y } \bar{y} = \text{media de los valores } y_i$$

Si r toma el valor de $r = 1$, se dice que hay una “correlación completa positiva”, y se tiene cuando los datos caen en una línea recta con pendiente positiva. Si r toma el valor de $r = -1$, se tiene “correlación completa negativa”, y se obtiene cuando los datos caen en una línea recta con pendiente negativa. Si el valor de r es cercano a cero, indica que las variables x e y no se encuentran correlacionadas linealmente. Por lo tanto, en este trabajo se busca que los coeficientes de correlación r sean muy cercanos a -1.

ii) Prueba de hipótesis nula

La prueba de hipótesis nula se utilizó para estimar el nivel de significancia del coeficiente de correlación obtenido. La hipótesis nula establece que las variables x e y no están correlacionadas. Si se obtienen valores cercanos a cero, indica que hay una fuerte correlación y será un indicador que ayuda a decidir el mejor coeficiente de correlación.

IV.1.6.1 Estimación del amortiguamiento

La estimación del amortiguamiento (ξ) el cual se calcula con el programa mencionado anteriormente, considera cuatro criterios descritos en Bejarano (2006) y son:

- i. La relación de las amplitudes del primer ciclo en las firmas (figura 22).
- ii. La relación de los valores absolutos de los puntos medios del primero y segundo ciclo (figura 22).
- iii. Utilizar el promedio de la relación entre los valores de las amplitudes absolutas de cada medio ciclo (figura 22).
- iv. La pendiente (denotada por a) del ajuste obtenido una vez aplicado los valores de amplitudes absolutas tomados de cada medio ciclo (figura 24).

Las ecuaciones que se utilizaron para cada consideración son las siguientes (Bejarano, 2006): para el primero y segundo caso se usó la ecuación 9, en el tercer caso se utilizó la ecuación 10 y en el cuarto caso la ecuación 11.

$$\xi = \frac{\ln A_1 - \ln A_2}{2\pi} \quad (9)$$

$$\xi = \frac{1}{\pi n} \sum_{i=1}^n \ln \frac{|A_i|}{|A_{i+1}|} \quad (10)$$

$$\xi = \frac{-a}{\pi} \quad (11)$$

donde:

ξ =amortiguamiento

A_i =amplitud de ciclo

n =número de amplitudes

a =pendiente del ajuste

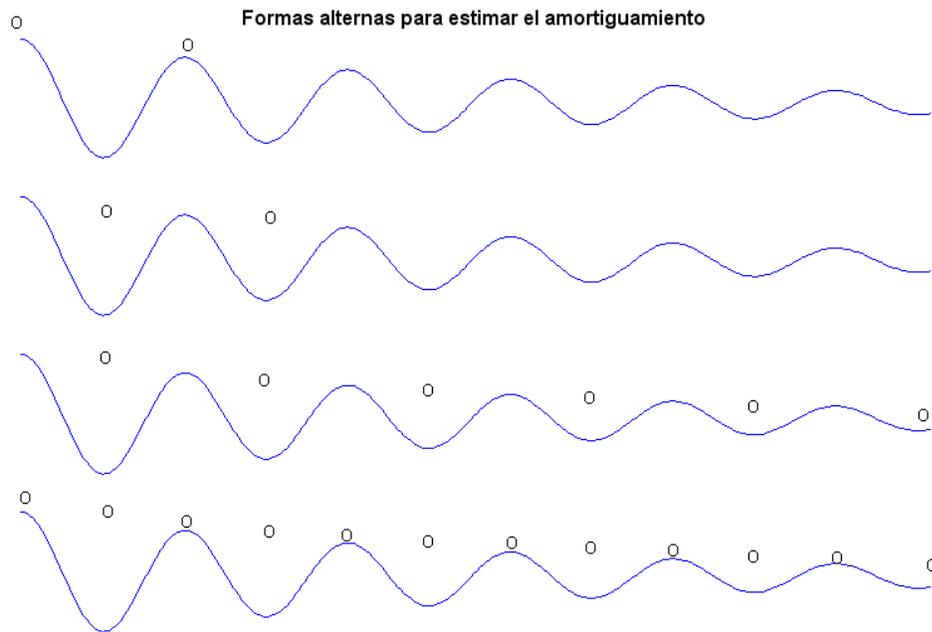


Figura 24. Firmas del decremento aleatorio donde se muestran las cuatro formas alternas utilizadas para estimar el amortiguamiento. Adoptado de “Estudio de la Técnica del Decremento Aleatorio para la estimación in-situ de propiedades de suelos” de Bejarano, 2006. Tesis de maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, p. 44.

4.1.6.2 Procedimiento para obtención de las firmas del decremento aleatorio

El procedimiento que se siguió para obtener las firmas del decremento aleatorio, consistió en realizar una primera iteración del programa. En esta primera parte se visualizaron los rangos de umbrales de amplitud y longitudes de segmento, en los cuales se presentan las firmas características de una curva típica de vibración libre amortiguada. Como longitud mínima se eligió un ciclo completo en la firma y para la longitud máxima del segmento, se acotó mediante inspección visual (Bejarano, 2006).

El procedimiento seguido para realizar las iteraciones del programa de la técnica del decremento aleatorio se enuncia a continuación y la interfaz del programa se puede visualizar en la figura C1:

- i. Indicar la cantidad de umbrales de amplitud.

- ii. Indicar la cantidad de longitud de segmentos.
- iii. Seleccionar umbral de inicio.
- iv. Seleccionar umbral final.
- v. Indicar valor máximo de τ .
- vi. Inspección visual de las firmas obtenidas.

El programa muestra las firmas obtenidas en cada valor de umbral de amplitud combinado con cada longitud de segmento seleccionada, también indica los cinco mejores casos obtenidos, mostrando el coeficiente de correlación y el valor de la hipótesis nula de cada uno de ellos (figura C2). Los valores obtenidos se fueron afinando, realizando el número de iteraciones del programa hasta que se encuentran las mejores firmas.

En la figura C3 se presenta un ejemplo de los amortiguamientos generados con el programa de la técnica del decremento aleatorio. Dentro de cada gráfica se visualizan los cuatro valores de amortiguamiento obtenidos en cada caso, y en el encabezado de cada una de ellas, se encuentra el promedio de esos cuatro valores y su desviación estándar.

La mejor firma se eligió buscando el coeficiente de correlación más alto y el caso con la hipótesis nula más baja. Para la estimación de las frecuencias naturales de cada registro, se tomó en cuenta la longitud de onda entre los puntos máximos del primer ciclo en las firmas.

4.1.7 Deflexiones

En esta parte se describe el procesamiento de datos realizado para la estimación de las deflexiones experimentales, y el cálculo de las deflexiones teóricas para diferentes tipos de vehículos.

4.1.7.1 Deflexiones experimentales

Debido a que se requería estimar las deflexiones generadas al centro de cada claro del puente, se utilizaron los registros de la componente vertical obtenidas en dichos puntos. El primer paso fue extraer los segmentos de cada registro correspondientes al paso de vehículos específicos según la norma NOM-012-SCT-2-2008 (tablas 23 y 24), para posteriormente aplicar el procesamiento de datos en el programa SMA para obtener las estimaciones de desplazamiento por doble integración.

El procedimiento efectuado para la utilización de este programa se resume en los siguientes pasos:

- i. Cargar archivo tipo ascii.
- ii. Ingresar valores de:
 - a. Frecuencia de muestreo (sps)
 - b. Sensitividad del acelerómetro (v/g)Nota: ver figura G1.
- iii. Seleccionar V1:
 - a. Indicar formato para archivos V1, V2 y V3.
 - b. Ingresar f_n y λ del sensor.Nota: ver figura G2.
- iv. Seleccionar V2: Ingresar método para integración (Trifunac o Shakal & Ragsdale). En este estudio, se utilizó el método de Trifunac.
Nota: ver figura G3.
- v. Seleccionar V3: Ingresar amortiguamientos y periodos para generar SA, SV y SD; por default se presentan amortiguamientos de 0%, 2%, 5%, 10% y 20% y periodos de 0.04s a 15s.
Nota: ver figura G4.

Con el objetivo de comprobar que los resultados obtenidos en el programa SMA son confiables, se realizó una prueba de calibración, la cual se describe en el anexo H.

4.1.7.2 Deflexiones teóricas

Para la estimación de las deflexiones teóricas de la superestructura, es necesario tener información sobre la geometría del puente y propiedades de los materiales con los que fue construido. Existe poca información sobre las especificaciones de los materiales usados en la construcción del puente Manantiales, y no se cuenta con planos arquitectónicos ni estructurales.

Debido a que no se tiene la fecha exacta en que fue construido el puente Manantiales, pero se estima que tiene aproximadamente 46 años de servicio, se decidió usar información de las normas de construcción de esos años de la Secretaría de Obras Públicas, sobre proyectos tipo de puentes para carreteras.

La información sobre la geometría de los elementos de la estructura, se obtuvo de planos que se generaron a partir de un levantamiento geométrico que se hizo en el año 2003 y se realizaron visitas al sitio de estudio para completar los datos requeridos. Se asumió que el concreto utilizado en la construcción del puente fue de $f'_c=250\text{kg/cm}^2$, y el acero de refuerzo de $LE\geq 4000\text{kg/cm}^2$.

En el presente trabajo, la estimación teórica fue realizada por el Ingeniero Esparza Fuentes en el año 2012 (ver apéndice I). Las deformaciones máximas verticales se presentaron al centro de cada claro del puente, tomando en consideración diferentes tipos de vehículos. El cálculo fue analizado para longitudes de claro de 34m y de 36m. El claro de 34m corresponde al tramo 2 del puente en estudio, y el claro de 36m de longitud a los tramos 1 y 3.

Se determinaron las deflexiones del claro de 36m para tres casos diferentes de vehículos: (i) HS20, (ii) T3S3 y (iii) T3S2R4. Para el claro de 34m de longitud, se estimaron los desplazamientos verticales para el paso del vehículo T3S2R4. En la tabla 6 se presentan las deflexiones obtenidas.

Tabla 6. Deformaciones teóricas estimadas en la superestructura, Δ =deflexión, CP=carga muerta, CM=carga móvil

Longitud de claro (m)	Tipo de vehículo	Ubicación de deflexiones máximas	Δ CP (cm)	Δ CM + I* (cm)	Δ total (cm)
36	HS20	Al centro	2.64	3.06	5.70
36	T3S3	Al centro	2.64	4.00	6.64
36	T3S2R4	Al centro	2.64	6.37**	9.01
34	T3S2R4	Al centro	2.56	4.37	6.93

*Impacto del 20%, ** estimación realizada por el autor de esta tesis.

La deflexión por carga muerta toma en cuenta el peso propio de la losa, trabes y acabados. La deflexión por carga móvil considera el peso de los ejes de determinado tipo de vehículo al cruzar el puente, considerando la posición más desfavorable, es decir, en la que se presenten las deformaciones verticales máximas, y se agrega el impacto. El impacto dependerá de la longitud del claro analizado, y no deberá exceder del 30%. La deflexión total es la suma de la deflexión por carga muerta y la deflexión por carga móvil más el impacto, que en este caso fue del 20%.

4.2 Modelado numérico

En esta sección se describe el procedimiento realizado para el modelado numérico del puente Manantiales utilizando el programa SAP2000 y del suelo que lo rodea usando el método de matrices de rigidez.

4.2.1 SAP2000

Para generar el modelado numérico del puente Manantiales, se utilizó el módulo de puentes que ofrece el SAP2000. En el módulo de puentes se incluye el modelado de la subestructura y superestructura.

El modelado en SAP2000 comienza definiendo las unidades en las cuales se trabajará, en este caso se utilizaron toneladas, metros, grados centígrados, y se define la línea de diseño del puente, indicado la longitud del mismo (figura J1). Enseguida se definen los materiales utilizados en la construcción del puente, especificando la resistencia a la compresión del concreto y el límite elástico del acero de refuerzo. Como siguiente paso, se define la sección transversal de los elementos de la estructura.

A continuación, se especifica el tipo de sección con la que se soporta la superficie de rodamiento, en este caso de estudio, el puente está compuesto por una losa de concreto armado descansando sobre cuatro traveses longitudinales tipo T, prefabricadas de concreto presforzado. Esta información se ingresa en el apartado denominado “Deck sections” del programa (figura J2).

En la sección llamada “Diaphragm property” se especifican los diafragmas que actúan como arriostramiento lateral de las traveses del puente (figura J3a). Es importante también indicar los grados de libertad de la superestructura y la subestructura, esta información se define en las secciones “Bridge bearing” (Figura J3b) y “Foundation springs” (figura J3c) respectivamente; el puente Manantiales tiene la característica de tener tres claros simplemente apoyados y las pilas empotradas al suelo.

Los apoyos de los dos extremos del puente o estribos se establecen en el apartado denominado “Abutments” (figura J4), y las pilas que soportan el puente en su parte intermedia se especifican en la sección “Bents” (figura J5). En este caso de estudio, la superestructura está soportada por dos pilas de sección variable con la altura y de concreto reforzado, un estribo es de concreto reforzado y el otro apoyo fue construido de mampostería.

En el apartado “Bridge objects” se definen todos los datos objetos del puente, se realizan cambios y modificaciones finales (figura J6). En este punto se procede a generar el modelo estructural en la opción “Update bridge structural model”. Una vez obtenido el modelo estructural se definen los carriles en la sección “Lanes” y en la

opción “Vehicles” se especifican los vehículos que se usarán para el análisis y el efecto de impacto.

Por último se definen las cargas, en este caso se especifica la carga móvil y se corre el programa. El procedimiento descrito anteriormente para el modelado del puente en SAP2000 usando el módulo de puentes, se resume en los siguientes enunciados:

- i. Definir unidades
- ii. Seleccionar módulo de puentes
- iii. Definir materiales
- iv. Definir secciones
- v. Definir “Layout line”: línea de diseño
- vi. Definir “Deck sections”: secciones del puente
- vii. Definir “Diaphragm property”: diafragmas
- viii. Definir “Bridge bearing”: grados de libertad de la superestructura
- ix. Definir “Foundation springs”: grados de libertad de la subestructura
- x. Definir “Abutments”: apoyos o estribos
- xi. Definir “Bents”: pilas
- xii. Definir “Bridge objects”: objetos del puente
- xiii. Generar el modelo estructural “Update bridge structural model”
- xiv. Definir “Lanes”: carriles
- xv. Definir “Vehicles”: vehículos
- xvi. Definir “Load Case”: estado de cargas
- xvii. Correr el programa

4.2.2 Matrices de rigidez

El modelado numérico del suelo consistió en generar funciones de transferencia teóricas mediante matrices de rigidez, de forma tal que se ajusten a las obtenidas experimentalmente mediante cocientes espectrales. Para esto, es necesario conocer o proponer los parámetros siguientes:

- i. densidad (ρ)
- ii. módulo de Poisson (σ)
- iii. amortiguamiento (ξ)
- iv. velocidad de ondas de corte (V_s)
- v. espesor de los estratos (h)

En esta tesis, los parámetros anteriores se obtuvieron a partir de la información presentada en la sección 2.4, generada en un estudio de mecánica de suelos que se realizó en la zona de estudio. En la tabla 2 se resume la estratigrafía y los tipos de suelos encontrados.

Tomando como base la información obtenida en los cuatro sondeos realizados en el estudio de mecánica de suelos, se propusieron densidades, módulos de Poisson, amortiguamientos y velocidades de ondas de corte para cada capa del suelo de los cuatro puntos de interés.

Para el modelado numérico del suelo, se utilizó un programa desarrollado por Huerta (2001), el cual tiene como fundamento teórico la propagación de ondas usando el método de matrices de rigidez, el cual fue descrito en la sección 3.3.2.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos con cada uno de los métodos utilizados. Se presentan las estimaciones de: (i) frecuencias fundamentales en diferentes puntos del puente, (ii) funciones de transferencia del suelo, (iii) amortiguamiento de la estructura, (iv) el patrón de comportamiento de las deflexiones del puente, y (v) modelado numérico de la estructura y del suelo.

5.1 Espectros de Fourier y espectros de densidad de potencia

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en las mediciones hechas en el puente de estudio. Se incluyen las series de tiempo, acompañadas de los espectros de densidad de potencia (PSD) y espectros de amplitud de Fourier de cada punto de registro (figura 25).

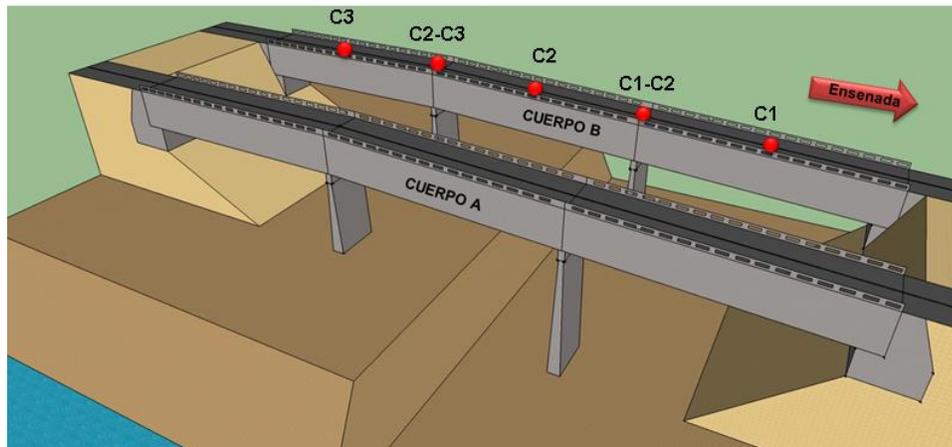


Figura 25. Ubicación de los puntos de registro sobre el puente.

5.1.1 Centro de claro 1

La figura 26 muestra el centro del claro 1, del cual se obtuvieron dos registros de aceleración de la componente transversal y dos de la componente longitudinal. En este

punto, se eliminaron los registros de la componente vertical ya que no presentaron señal.

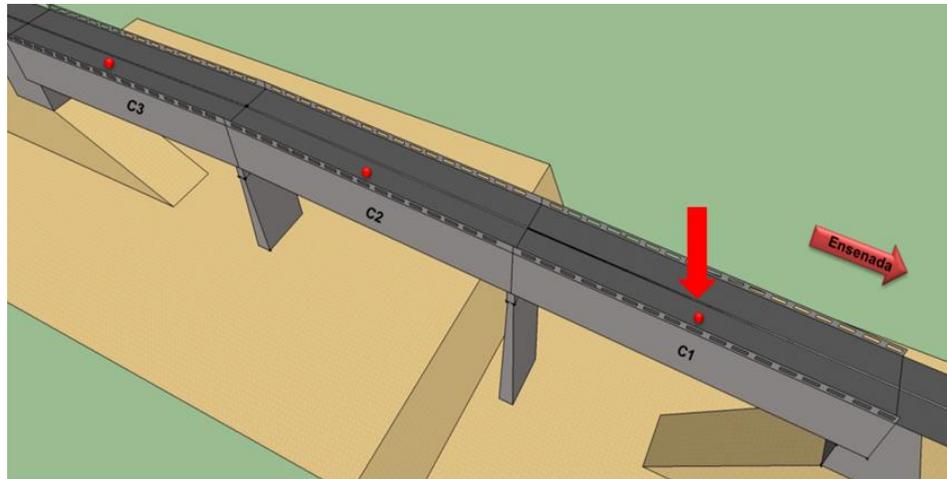


Figura. 26 Mediciones realizadas al centro del claro 1.

Los espectros de densidad de potencia (PSD) de las componentes transversales generadas al centro del claro 1, presentan la frecuencia fundamental en 2.72Hz en la medición 2 del arreglo 1, y 3.04Hz en la medición 3 del arreglo 1 (figura 27).

Por otra parte, en la media de los espectros de Fourier de las componentes transversales del centro del claro 1, se observa la frecuencia fundamental en 2.75Hz y 3.02Hz, en la medición 2 del arreglo 1 y en la medición 3 del arreglo 1 respectivamente (figura 27). En la mediana de los espectros de amplitud de Fourier de las componentes transversales de este punto, se presenta frecuencias fundamentales en 2.72Hz en la medición 2 del arreglo 1 y 3.05Hz en la medición 3 del arreglo 1 (figura 27).

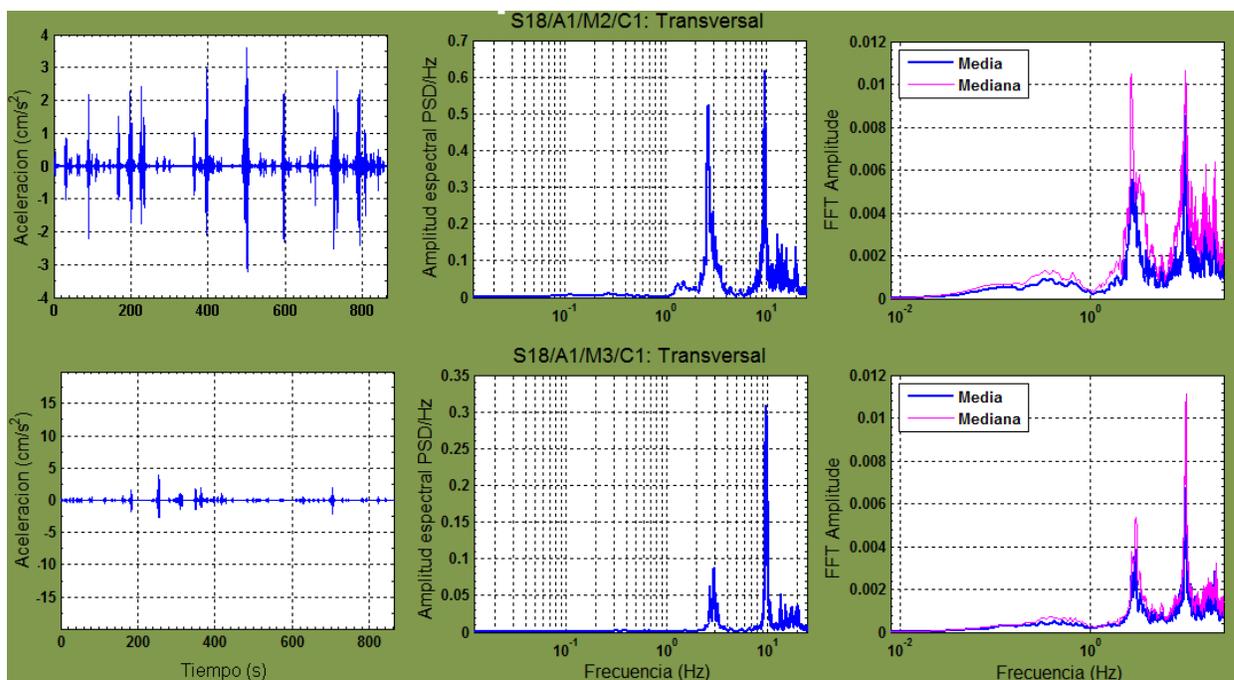


Figura 27. Componentes transversales obtenidas al centro del claro 1. El primer renglón corresponde al registro obtenido con el sensor 18, del arreglo 1 y medición 1. El segundo renglón presenta la información obtenida con el sensor 18, en el arreglo 1 y medición 3. La primera columna exhibe las series de tiempo en aceleración, la segunda columna corresponde a los espectros de densidad de potencia (PSD) y la tercera columna muestra la media y la mediana de los espectros de amplitud de Fourier (en color azul y rosa respectivamente).

Los espectros de densidad de potencia (PSD) de las componentes longitudinales, presentan la frecuencia fundamental en 2.98Hz en la medición 1 del arreglo 1, y 3.04Hz en la medición 3 del arreglo 1 (figura 28).

La media de los espectros de Fourier de las componentes longitudinales, muestra la frecuencia fundamental de 2.72Hz en la medición 1 del arreglo 1, y 3.05Hz en la medición 3 del arreglo 1 (figura 28). La mediana de los espectros de amplitud de Fourier de las componentes longitudinales, presenta frecuencias fundamentales de 2.97Hz en la medición 1 del arreglo 1, y 3.05Hz en la medición 3 del arreglo 1 (figura 28).

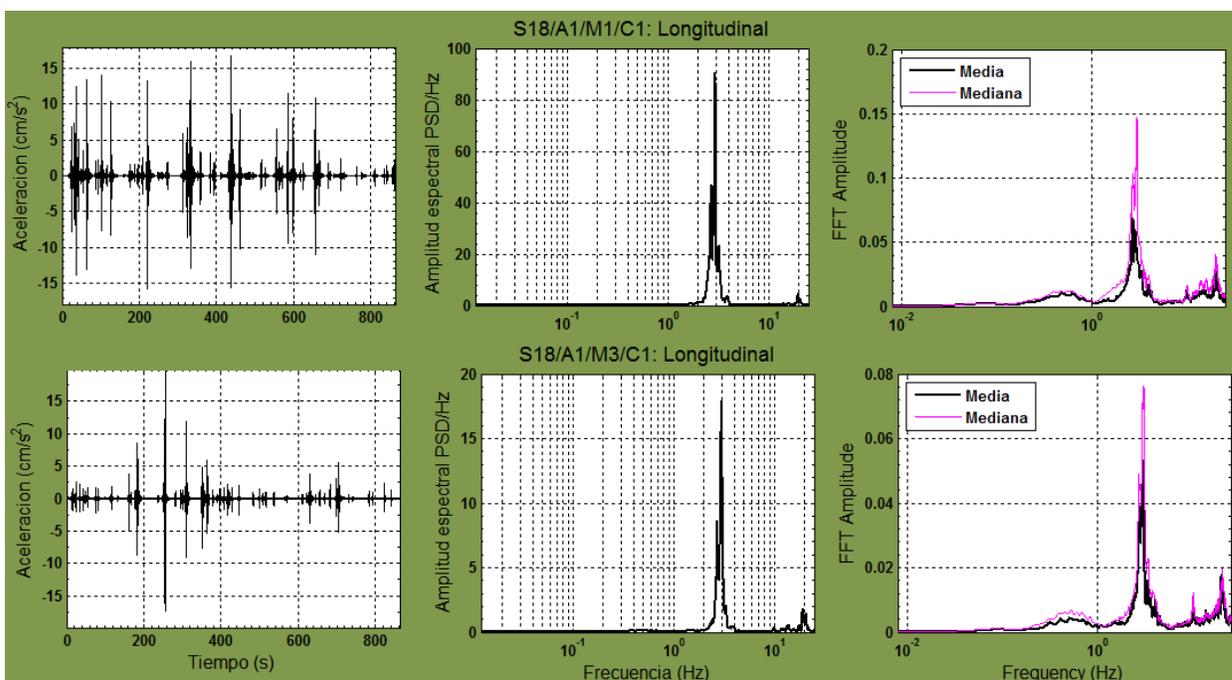


Figura 28. Componentes longitudinales obtenidas al centro del claro 1. El primer renglón corresponde al registro obtenido con el sensor 18, del arreglo 1 y medición 1. El segundo renglón presenta la información obtenida con el sensor 18, en el arreglo 1 y medición 3. La primera columna exhibe las series de tiempo en aceleración, la segunda columna corresponde a los espectros de densidad de potencia (PSD) y la tercera columna muestra la media y la mediana de los espectros de amplitud de Fourier (en color negro y rosa respectivamente).

En la tabla 7 se presentan los resultados mencionados en cada una de las mediciones descritas anteriormente.

Tabla 7. Frecuencias naturales de PSD y espectros de Fourier (Claro 1)

Arreglo	Medición	Ubicación	Sensor	Eje	Frecuencia (Hz)			Frecuencia promedio (Hz)
					PSD	Espectros de Fourier		
						Media	Mediana	
A1	M2	C1	S18	X	2.722	2.747	2.673	2.917
A1	M3	C1	S18	X	3.040	3.021	2.985	
A1	M1	C1	S18	Y	2.979	2.722	2.972	
A1	M3	C1	S18	Y	3.040	3.052	3.046	

5.1.2 Centro de claro 2

La figura 29 muestra el centro del claro 2, en donde se obtuvieron registros de aceleración de las tres componentes ortogonales (transversal, longitudinal y vertical). De la componente transversal se generaron dos registros con el sensor 17, una correspondiente a la medición 2 del arreglo 1 y la otra a la medición 3 del arreglo 1. En la componente longitudinal se obtuvieron tres registros, el primero generado por el sensor 17 en la medición 1 del arreglo 1, el segundo por el sensor 17 en la medición 3 del arreglo 1 y el tercero con el sensor 18 en el arreglo 3.

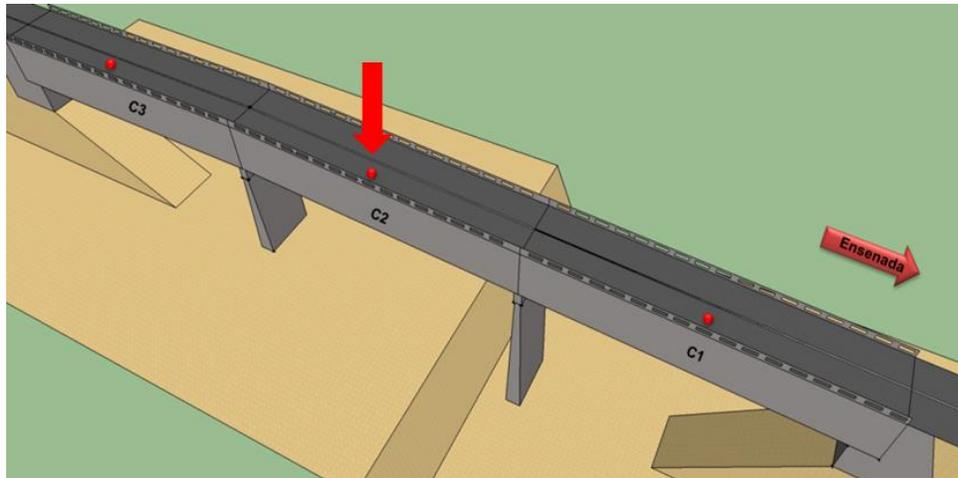


Figura 29. Mediciones registradas al centro del claro 2.

Los espectros de densidad de potencia (PSD) de las componentes transversales, presentan frecuencia fundamental en 2.72Hz en la medición 2 y 3 del arreglo 1 (figura 30).

La media de los espectros de Fourier de las componentes transversales, muestra frecuencias fundamentales de 2.84Hz en la medición 2 del arreglo 1 y 2.71Hz en la medición 3 del arreglo 1 (figura 30). Por otra parte, la mediana de los espectros de amplitud de Fourier de las componentes transversales, presenta frecuencias fundamentales de 2.67Hz en la medición 2 del arreglo 1, y 2.78Hz en la medición 3 del arreglo 1 (figura 30).

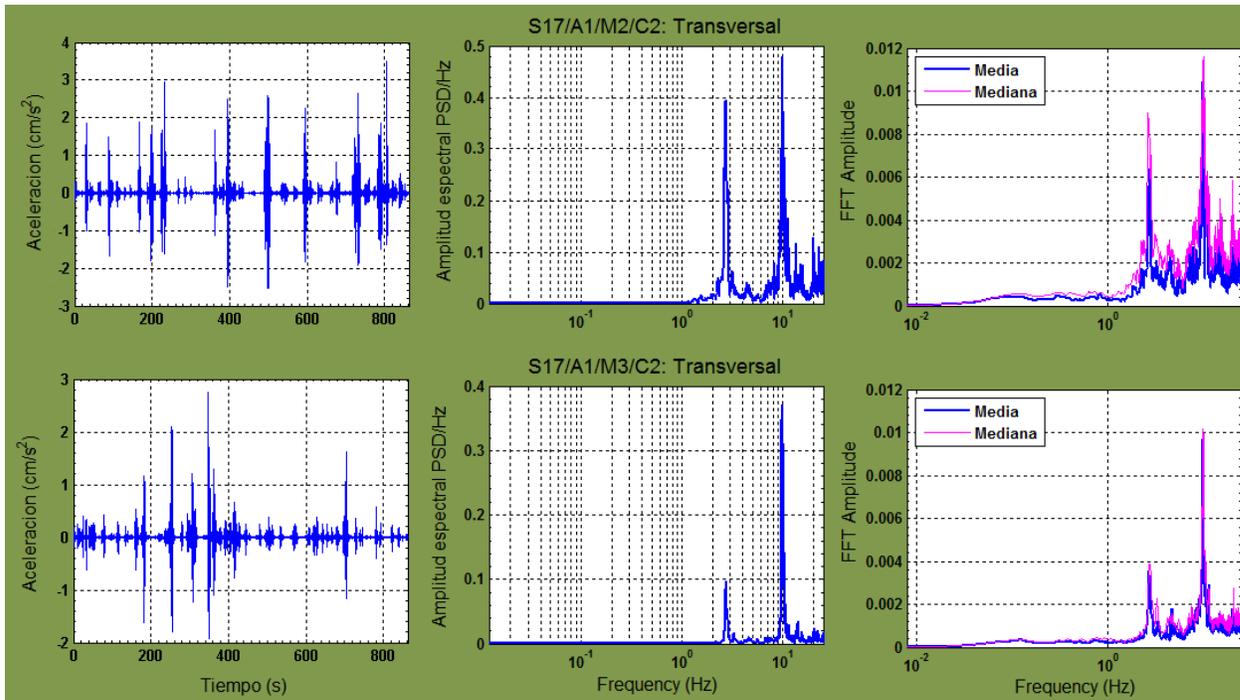


Figura 30. Componentes transversales obtenidas al centro del claro 2. El primer renglón corresponde al registro obtenido con el sensor 17, del arreglo 1 y medición 2. El segundo renglón presenta la información obtenida con el sensor 17, en el arreglo 1 y medición 3. La primera columna exhibe las series de tiempo en aceleración, la segunda columna corresponde a los espectros de densidad de potencia (PSD) y la tercera columna muestra la media y la mediana de los espectros de amplitud de Fourier (en color azul y rosa respectivamente).

Los PSD de las componentes longitudinales, presentan frecuencias fundamentales de 2.76Hz en la medición 1 del arreglo 1, 3.04Hz en la medición 3 del arreglo 1 y 2.86Hz en el arreglo 3 (figura 31).

La media de los espectros de amplitud de Fourier en las componentes longitudinales, muestran frecuencias fundamentales de 2.72Hz en la medición 1 del arreglo 1, 3.03Hz en la medición 3 del arreglo 1 y 2.83Hz en el arreglo 3 (figura 31). La mediana de los espectros de Fourier de las componentes longitudinales, presenta frecuencias fundamentales de 2.77Hz en la medición 1 del arreglo 1, 2.99Hz en la medición 3 del arreglo 1 y 2.83Hz en el arreglo 3 (figura 31).

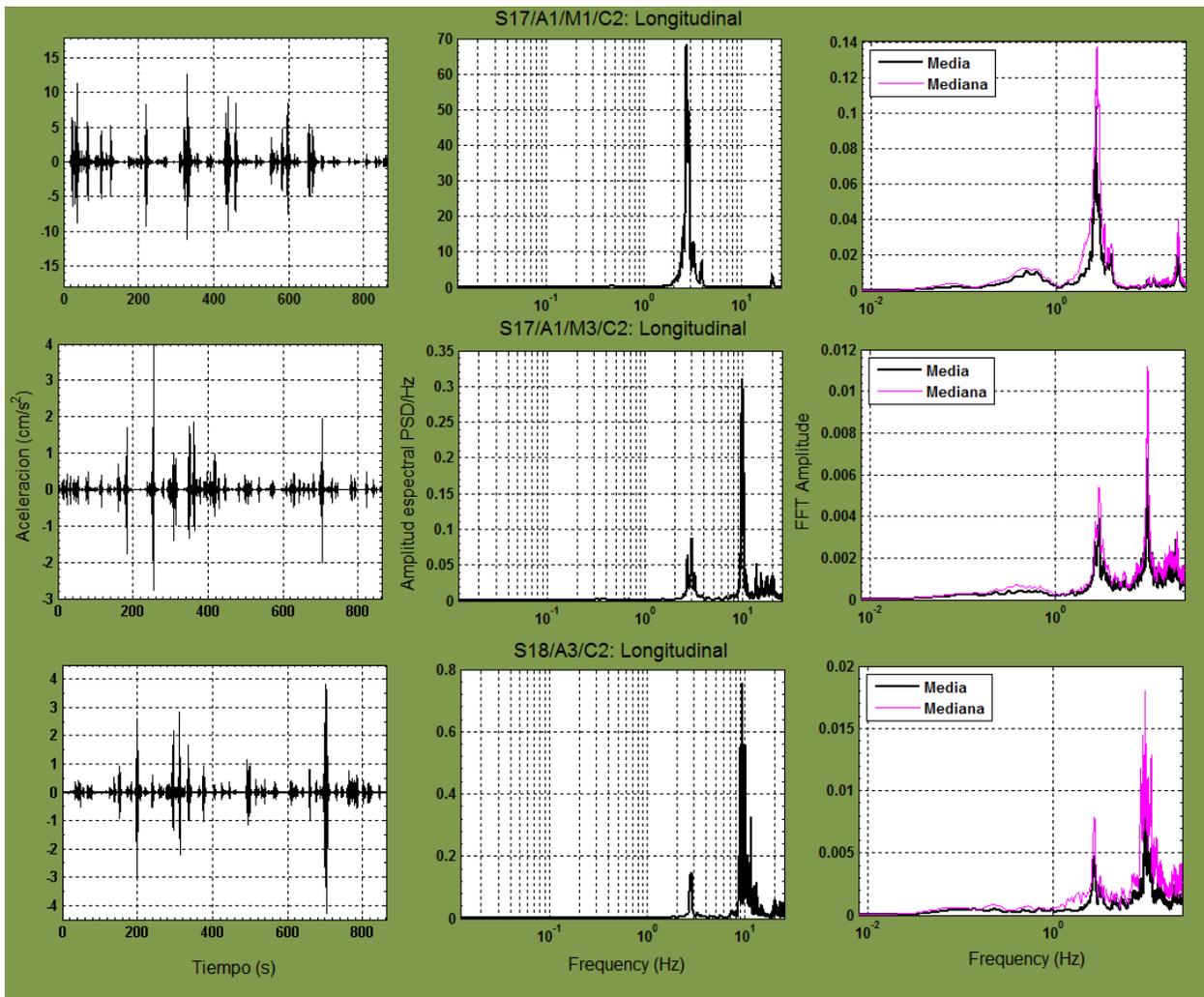


Figura 31. Componentes longitudinales obtenidas al centro del claro 2. El primer renglón corresponde al registro obtenido con el sensor 17, del arreglo 1 y medición 1. El segundo renglón presenta la información obtenida con el sensor 17, en el arreglo 1 y medición 3. El tercer renglón muestra el registro generado por el sensor 18, en el arreglo 3. La primera columna exhibe las series de tiempo en aceleración, la segunda columna corresponde a los espectros de densidad de potencia (PSD) y la tercera columna muestra la media y la mediana de los espectros de amplitud de Fourier (en color negro y rosa respectivamente).

En las componentes verticales, los espectros de densidad de potencia presentan frecuencias fundamentales de 2.98Hz en la medición 1 del arreglo 1, 2.72Hz en la medición 2 del arreglo 1 y 2.77Hz en el arreglo 3 (figura 32).

La media de los espectros de amplitud de Fourier en las componentes verticales, muestran frecuencias fundamentales de 2.72Hz en la medición 1 del arreglo 1, 3.03Hz

en la medición 2 del arreglo 1 y 2.74Hz en el arreglo 3 (figura 32). La mediana de los espectros de amplitud de Fourier de las componentes verticales, presenta frecuencias fundamentales de 2.97Hz en la medición 1 del arreglo 1, 2.72Hz en la medición 2 del arreglo 1 y 2.83Hz en el arreglo 3 (figura 32).

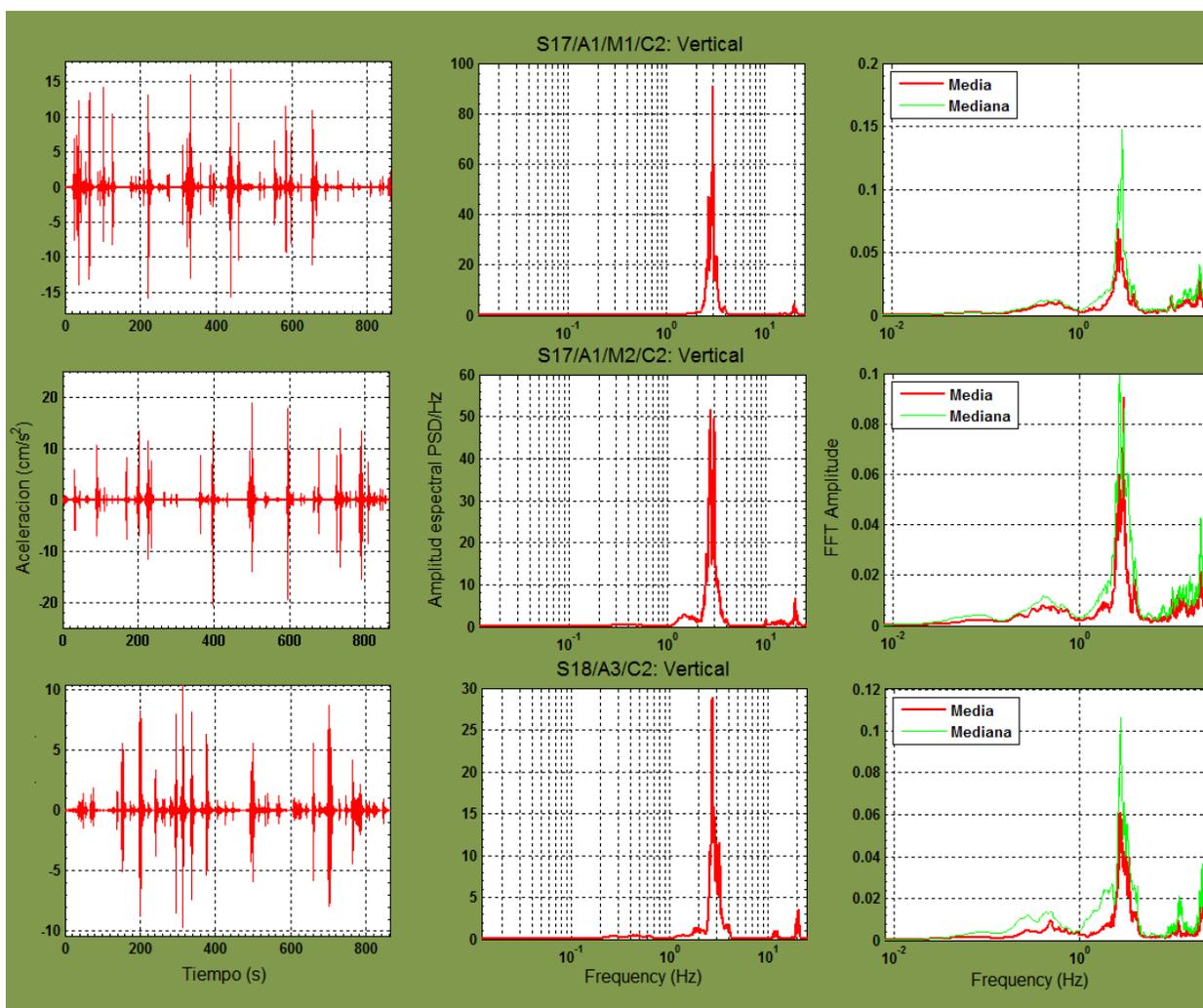


Figura 32. Componentes verticales obtenidas al centro del claro 2. El primer renglón corresponde al registro obtenido con el sensor 17, del arreglo 1 y medición 1. El segundo renglón presenta la información obtenida con el sensor 17, en el arreglo 1 y medición 2. El tercer renglón muestra el registro generado por el sensor 18, en el arreglo 3. La primera columna exhibe las series de tiempo en aceleración, la segunda columna corresponde a los espectros de densidad de potencia (PSD) y la tercera columna muestra la media y la mediana de los espectros de amplitud de Fourier (en color rojo y verde respectivamente).

En la tabla 8 se muestran los resultados mencionados en cada una de las mediciones descritas anteriormente.

Tabla 8. Frecuencias naturales de PSD y espectros de Fourier (Claro 2)

Arreglo	Medición	Ubicación	Sensor	Eje	Frecuencia (Hz)			Frecuencia promedio (Hz)
					PSD	Espectros de Fourier		
						Media	Mediana	
A1	M2	C2	S17	X	2.722	2.838	2.673	2.819
A1	M3	C2	S17	X	2.722	2.710	2.777	
A1	M1	C2	S17	Y	2.759	2.722	2.765	
A1	M3	C2	S17	Y	3.040	3.027	2.985	
A3	M1	C2	S18	Y	2.856	2.832	2.826	
A1	M1	C2	S17	Z	2.979	2.716	2.972	
A1	M2	C2	S17	Z	2.722	3.027	2.722	
A3	M1	C2	S18	Z	2.771	2.740	2.759	

5.1.3 Centro de claro 3

La figura 33 muestra el centro del claro 3, en donde se obtuvieron registros de aceleración de las componentes transversal, longitudinal y vertical. En la componente transversal se generaron dos registros con el sensor 16, una correspondiente a la medición 2 del arreglo 1 y la otra a la medición 3 del arreglo 1. En la componente longitudinal se obtuvieron dos registros con el sensor 16, el primero se generó en la medición 1 del arreglo 1 y el segundo en la medición 3 del arreglo 1.

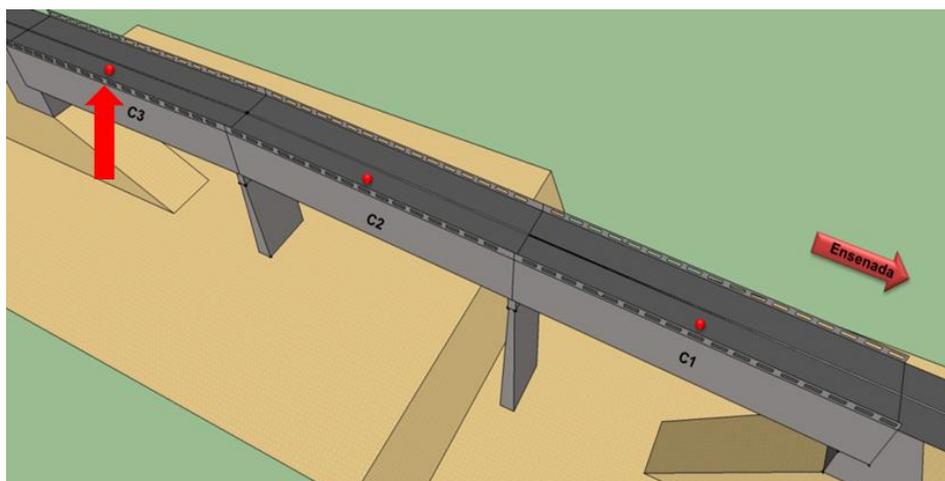


Figura 33. Mediciones registradas al centro del claro 3.

Los espectros de densidad de potencia (PSD) de las componentes transversales, presentan frecuencias fundamentales en 9.89Hz en la medición 2 del arreglo 1 y 9.88Hz en la medición 3 del arreglo 1 (figura 34).

La media de los espectros de Fourier de las componentes transversales, muestra frecuencia fundamental de 10.16Hz en la medición 1 del arreglo 1 y 10.06Hz en la medición 3 del arreglo 1 (figura 34). La mediana de los espectros de Fourier de las componentes transversales, presenta frecuencias fundamentales en 9.89Hz en la medición 2 del arreglo 1, y 9.87Hz en la medición 3 del arreglo 1 (figura 34). Estos valores de frecuencia de aproximadamente 10Hz estimados en las componentes transversales, no se utilizaron en el cálculo del promedio que se presenta en la tabla 9, debido a que se consideran valores similares al periodo predominante del suelo (ver sección 6.1.1).

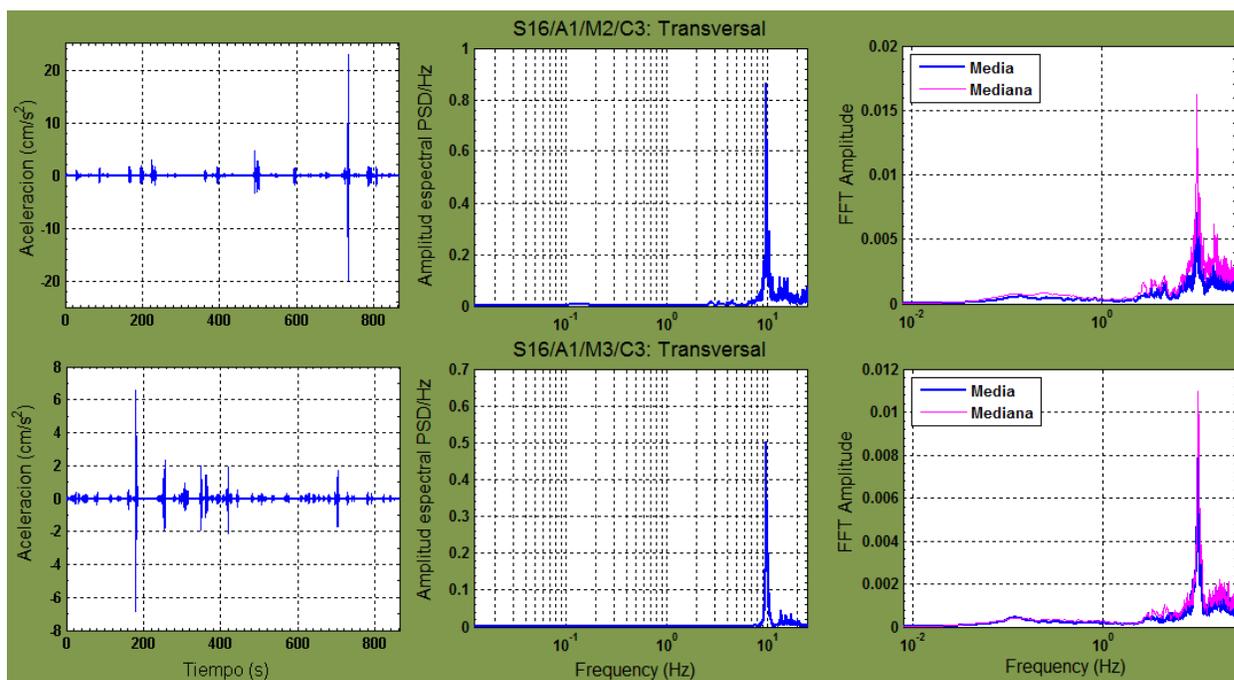


Figura 34. Componentes transversales obtenidas al centro del claro 3. El primer renglón corresponde al registro obtenido con el sensor 16, del arreglo 1 y medición 2. El segundo renglón presenta la información obtenida con el sensor 16, en el arreglo 1 y medición 3. La primera columna exhibe las series de tiempo en aceleración, la segunda columna corresponde a los espectros de densidad de potencia (PSD) y la tercera columna muestra la media y la mediana de los espectros de amplitud de Fourier (en color azul y rosa respectivamente).

Los espectros de densidad de potencia (PSD) de las componentes longitudinales, presentan frecuencias fundamentales de 2.77Hz en la medición 1 y 3 del arreglo 1 (figura 35).

La media de los espectros de amplitud de Fourier de las componentes longitudinales, muestra frecuencias fundamentales de 2.75Hz en la medición 1 del arreglo 1 y 2.83Hz en la medición 3 del arreglo 1 (figura 35). La mediana de los espectros de Fourier de las componentes longitudinales, presenta frecuencias fundamentales de 2.77Hz en la medición 1 del arreglo 1, y 2.82Hz en la medición 3 del arreglo 1 (figura 35).

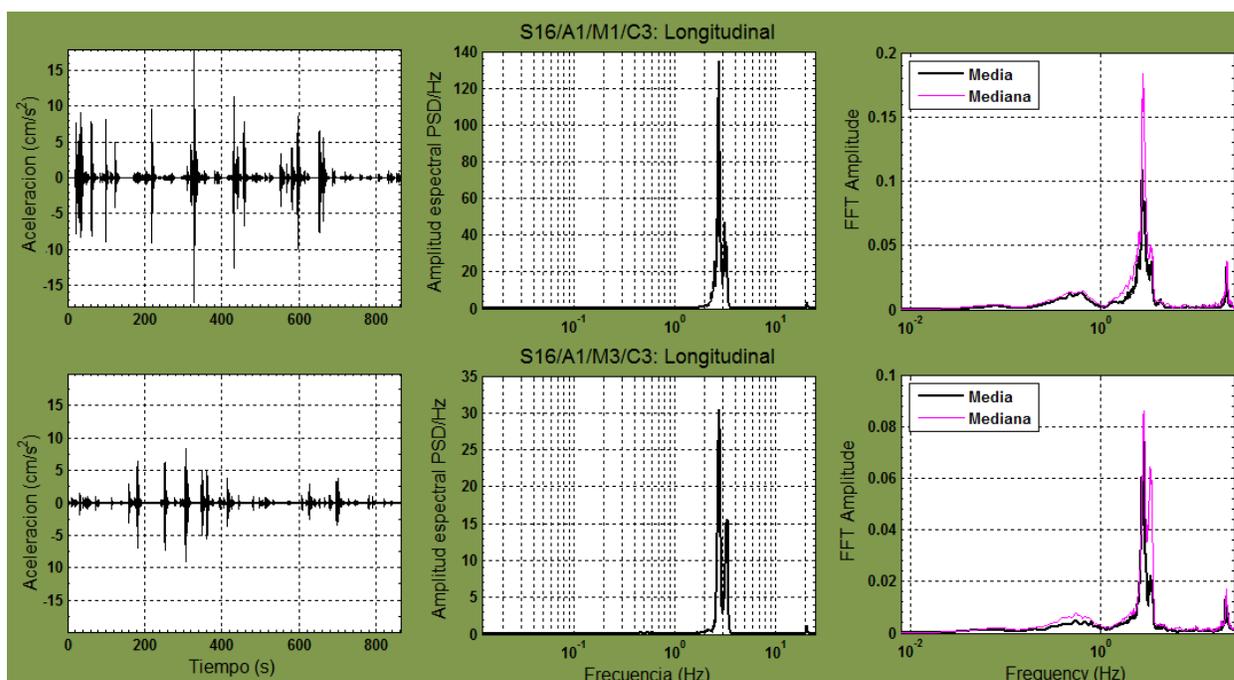


Figura 35. Componentes longitudinales obtenidas al centro del claro 3. El primer renglón corresponde al registro obtenido con el sensor 16, del arreglo 1 y medición 1. El segundo renglón presenta la información obtenida con el sensor 16, en el arreglo 1 y medición 3. La primera columna muestra las series de tiempo en aceleración, la segunda columna corresponde a los espectros de densidad de potencia (PSD) y la tercera columna muestra la media y la mediana de los espectros de amplitud de Fourier (en color negro y rosa respectivamente).

Los PSD de las componentes verticales, presentan frecuencias fundamentales de 3.19Hz en la medición 1 del arreglo 1 y 3.16Hz en la medición 2 del arreglo 1 (figura 36).

La media de los espectros de amplitud de Fourier de las componentes verticales, muestra frecuencias fundamentales de 3.00Hz en la medición 1 del arreglo 1 y 3.19Hz en la medición 2 del arreglo 1 (figura 36). La mediana de los espectros de amplitud de Fourier de las componentes verticales, presenta frecuencias fundamentales de 3.22Hz en la medición 1 del arreglo 1, y 3.16Hz en la medición 2 del arreglo 1 (figura 36).

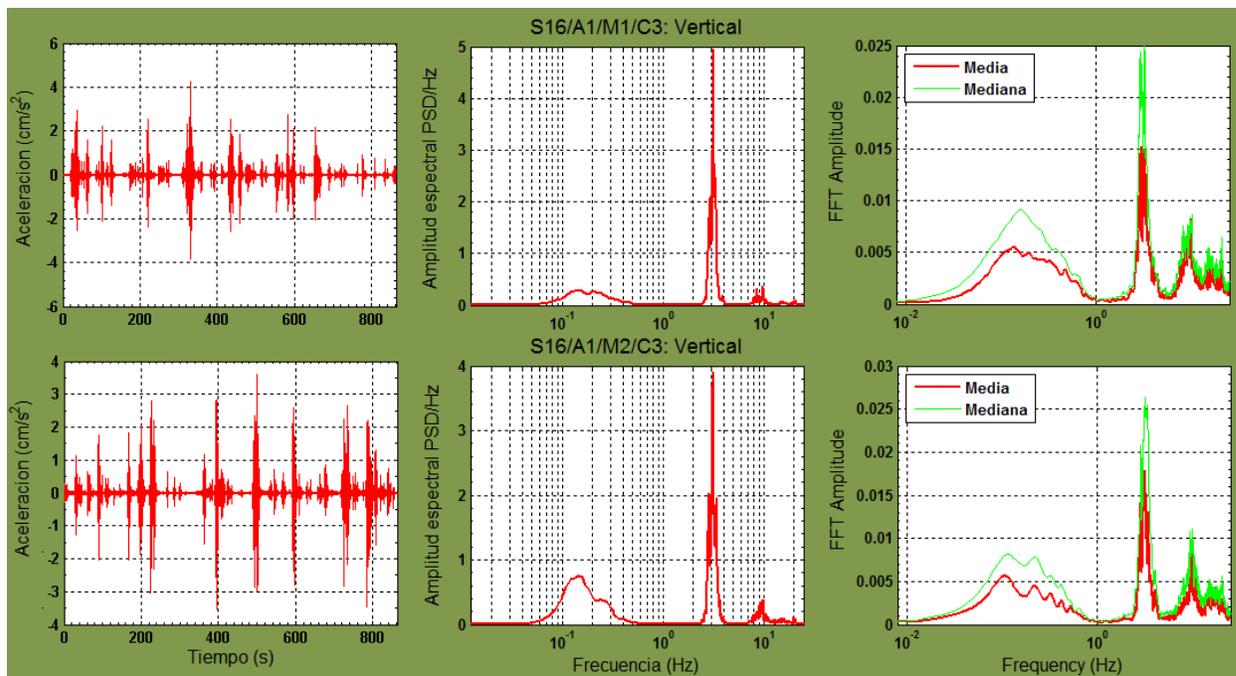


Figura 36. Componentes verticales obtenidas al centro del claro 3. El primer renglón corresponde al registro obtenido con el sensor 16, del arreglo 1 y medición 1. El segundo renglón presenta la información obtenida con el sensor 16, en el arreglo 1 y medición 2. La primera columna exhibe las series de tiempo en aceleración, la segunda columna corresponde a los espectros de densidad de potencia (PSD) y la tercera columna muestra la media y la mediana de los espectros de amplitud de Fourier (en color rojo y verde respectivamente).

En la tabla 9 se muestran los resultados descritos en cada una de las mediciones mencionadas anteriormente.

Tabla 9. Frecuencias naturales de PSD y espectros de Fourier (Claro 3)

Arreglo	Medición	Ubicación	Sensor	Eje	Frecuencia (Hz)			Frecuencia promedio (Hz)
					PSD	Espectros de Fourier		
						Media	Mediana	
A1	M2	C3	S16	X	9.888	10.160	9.894	-
A1	M3	C3	S16	X	9.875	10.060	9.869	
A1	M1	C3	S16	Y	2.771	2.753	2.771	2.969
A1	M3	C3	S16	Y	2.771	2.832	2.820	
A1	M1	C3	S16	Z	3.186	2.997	3.223	
A1	M2	C3	S16	Z	3.162	3.186	3.156	
Ver sección 6.1.1								

V.1.4 Intersección de claro 1 y claro 2

La figura 37 muestra la intersección del claro 1 y claro 2, punto sobre el cual se obtuvo un registro de aceleración de la componente longitudinal y otro de la componente vertical. En este punto, se descartaron los registros de la componente transversal ya que no presentaron señal.

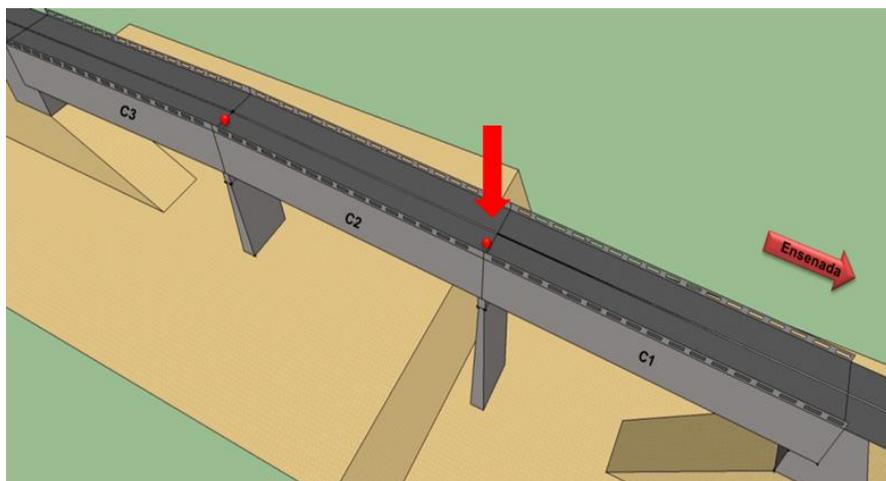


Figura 37. Mediciones generadas en la intersección de los claros C1 y C2.

Los espectros de densidad de potencia (PSD) de la componente longitudinal, presenta la frecuencia fundamental de 2.86Hz y 3.21Hz en la componente vertical (figura 38).

La media de los espectros de Fourier de la componente longitudinal, muestra una frecuencia fundamental de 2.86Hz y 3.22Hz en la componente vertical (figura 38). La mediana de los espectros de amplitud de Fourier de la componente longitudinal, presenta frecuencias fundamentales de 2.84Hz y 3.19Hz en la componente vertical (figura 38).

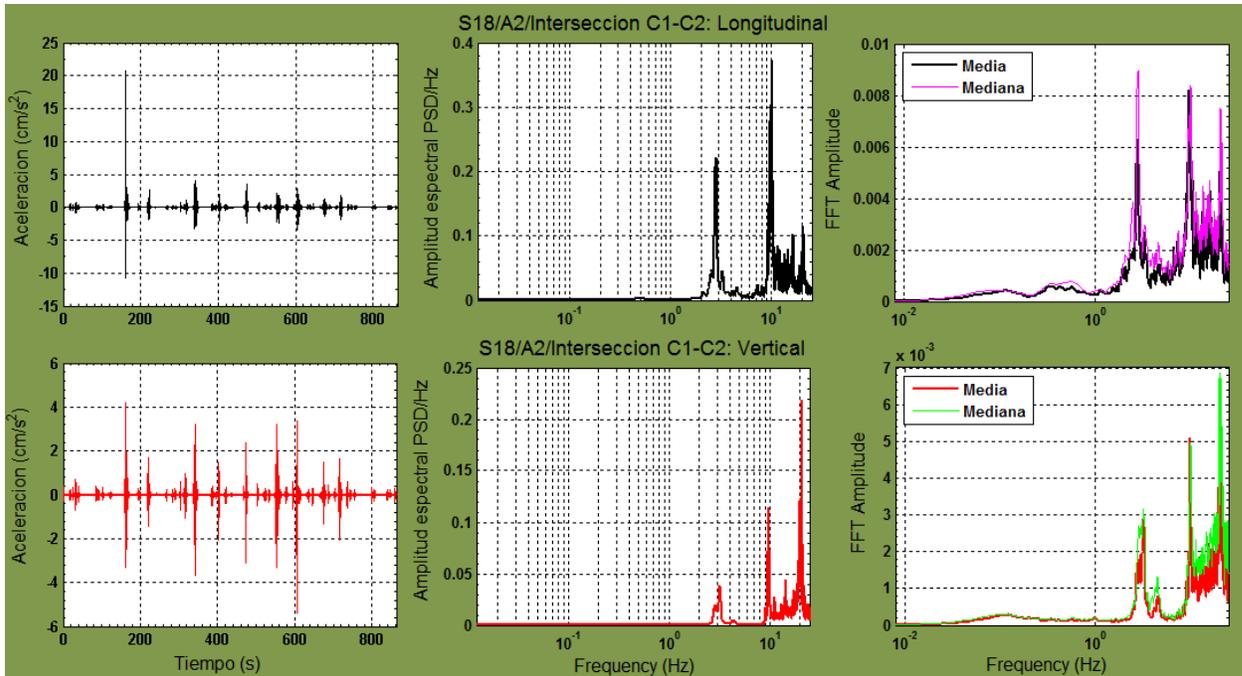


Figura 38. Componentes longitudinal y vertical obtenidas en la intersección del claro 1 y claro 2. El primer renglón corresponde al registro de la componente longitudinal, obtenido con el sensor 18 en el arreglo 2. El segundo renglón presenta la componente vertical registrada con el sensor 18 en el arreglo 2. La primera columna muestra las series de tiempo en aceleración, la segunda columna corresponde a los espectros de densidad de potencia (PSD) y la tercera columna muestra la media y la mediana de los espectros de amplitud de Fourier (en color negro y rosa para la componente longitudinal y, rojo y verde para la componente vertical).

En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos en cada una de las mediciones descritas anteriormente.

Tabla 10. Frecuencias naturales obtenidas por PSD y espectros de Fourier (C1-C2)

Arreglo	Medición	Ubicación	Sensor	Eje	Frecuencia (Hz)			Frecuencia promedio (Hz)
					PSD	Espectros de Fourier		
						Media	Mediana	
A2	M1	Inter C1-C2	S18	Y	2.856	2.863	2.844	3.030
A2	M1	Inter C1-C2	S18	Z	3.210	3.217	3.192	

5.1.5 Intersección de claro 2 y claro 3

La figura 39 muestra la intersección del claro 2 y claro 3, en donde se obtuvieron registros de aceleración de las tres componentes ortogonales. Se generó un registro de la componente transversal, uno de la componente longitudinal y otro de la componente vertical, todos ellos fueron registrados por el sensor 17 en el arreglo 2.

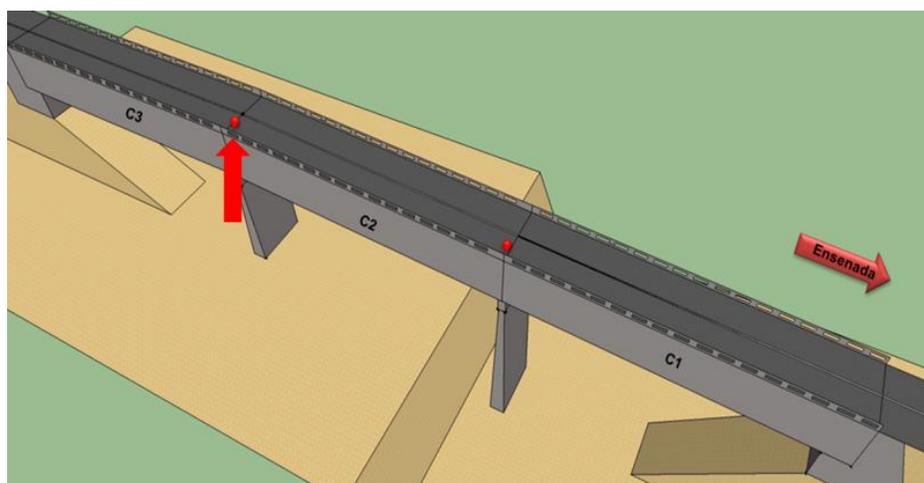


Figura 39. Intersección de los claros C2 y C3.

Los espectros de densidad de potencia (PSD) de la componente transversal, presentan una frecuencia fundamental de 3.26Hz, 2.86Hz en la componente longitudinal y 3.03Hz en la componente vertical (figura 40).

La media de los espectros de amplitud de Fourier de la componente transversal, muestra una frecuencia fundamental de 3.24Hz, 2.84Hz en la componente longitudinal y 3.01Hz en la componente vertical (figura 40). La mediana de los espectros de amplitud

de Fourier de la componente transversal, presenta una frecuencia fundamental de 3.30Hz, 2.85Hz en la componente longitudinal y 3.03Hz en la componente vertical (figura 40).

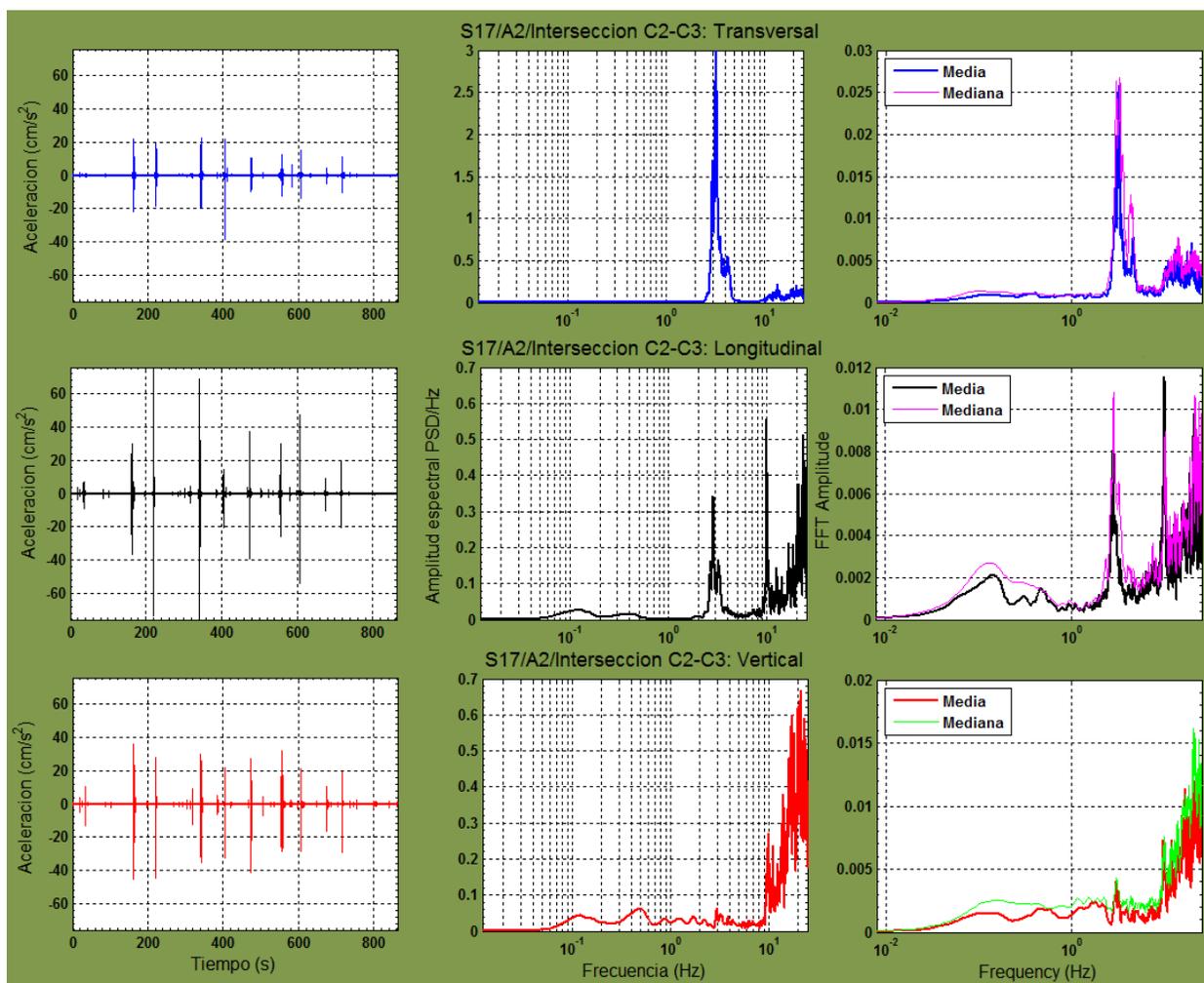


Figura 40. Componentes transversal, longitudinal y vertical obtenidas en la intersección del claro 2 y claro 3, por el sensor 17 en el arreglo 2. El primer renglón corresponde al registro de la componente transversal, el segundo renglón presenta la componente longitudinal y el tercero la componente vertical. La primera columna muestra las series de tiempo en aceleración, la segunda columna corresponde a los espectros de densidad de potencia (PSD) y la tercera columna muestra la media y la mediana de los espectros de amplitud de Fourier.

En la tabla 11 se muestran los resultados obtenidos en cada una de las mediciones descritas anteriormente.

Tabla 11. Frecuencias naturales obtenidas por PSD y espectros de Fourier (C2-C3)

Arreglo	Medición	Ubicación	Sensor	Eje	Frecuencia (Hz)			Frecuencia promedio (Hz)
					PSD	Espectros de Fourier		
						Media	Mediana	
A2	M1	Inter C2-C3	S17	X	3.259	3.241	3.302	3.046
A2	M1	Inter C2-C3	S17	Y	2.856	2.838	2.850	
A2	M1	Inter C2-C3	S17	Z	3.027	3.009	3.033	

5.1.6 Resumen de frecuencias naturales de la estructura

En la tabla 12 se resumen los resultados obtenidos, indicando el número de arreglo, número de medición, ubicación del sensor, eje o componente registrada (x, y o z), las frecuencias fundamentales obtenidas mediante los PSD, y la media y mediana de los espectros de Fourier. En color amarillo se indican las series de tiempo que no registraron señal y no fueron tomadas en cuenta. El eje “x” corresponde a la componente transversal, el eje “y” a la componente longitudinal y el eje “z” a la componente vertical.

Tabla 12. Frecuencias naturales de PSD y espectros de Fourier

Arreglo	Medición	Ubicación	Sensor	Eje	Frecuencia (Hz)			Promedio
					PSD	Espectros de Fourier		
						Media	Mediana	
A1	M2	C1	S18	X	2.722	2.747	2.673	2.714
A1	M3	C1	S18	X	3.040	3.021	2.985	3.015
A1	M1	C1	S18	Y	2.979	2.722	2.972	2.891
A1	M3	C1	S18	Y	3.040	3.052	3.046	3.046
A1	M1	C1	S18	Z	Sin señal	Sin señal	Sin señal	-
A1	M2	C1	S18	Z	Sin señal	Sin señal	Sin señal	-
A1	M2	C2	S17	X	2.722	2.838	2.673	2.744
A1	M3	C2	S17	X	2.722	2.710	2.777	2.736
A3	M1	C2	S18	X	Sin señal	Sin señal	Sin señal	-
A1	M1	C2	S17	Y	2.759	2.722	2.765	2.749
A1	M3	C2	S17	Y	3.040	3.027	2.985	3.017
A3	M1	C2	S18	Y	2.856	2.832	2.826	2.838
A1	M1	C2	S17	Z	2.979	2.716	2.972	2.889
A1	M2	C2	S17	Z	2.722	3.027	2.722	2.824
A3	M1	C2	S18	Z	2.771	2.740	2.759	2.757
A1	M2	C3	S16	X	*9.888	*10.160	*9.894	*9.981
A1	M3	C3	S16	X	*9.875	*10.060	*9.869	*9.935
A1	M1	C3	S16	Y	2.771	2.753	2.771	2.765
A1	M3	C3	S16	Y	2.771	2.832	2.820	2.808
A1	M1	C3	S16	Z	3.186	2.997	3.223	3.135
A1	M2	C3	S16	Z	3.162	3.186	3.156	3.168
A2	M1	Inter C1-C2	S18	X	Sin señal	Sin señal	Sin señal	-
A2	M1	Inter C1-C2	S18	Y	2.856	2.863	2.844	2.854
A2	M1	Inter C1-C2	S18	Z	3.210	3.217	3.192	3.206
A2	M1	Inter C2-C3	S17	X	3.259	3.241	3.302	3.267
A2	M1	Inter C2-C3	S17	Y	2.856	2.838	2.850	2.848
A2	M1	Inter C2-C3	S17	Z	3.027	3.009	3.033	3.023
Serie excluida, *ver sección 6.1.1								

5.2 Cocientes espectrales

En esta parte se presentan los resultados obtenidos en las mediciones realizadas en campo libre. Se incluyen las series de tiempo, acompañadas de los espectros de densidad de potencia (PSD), espectros amplitud de Fourier y cocientes espectrales de cada punto de registro (figura 41).

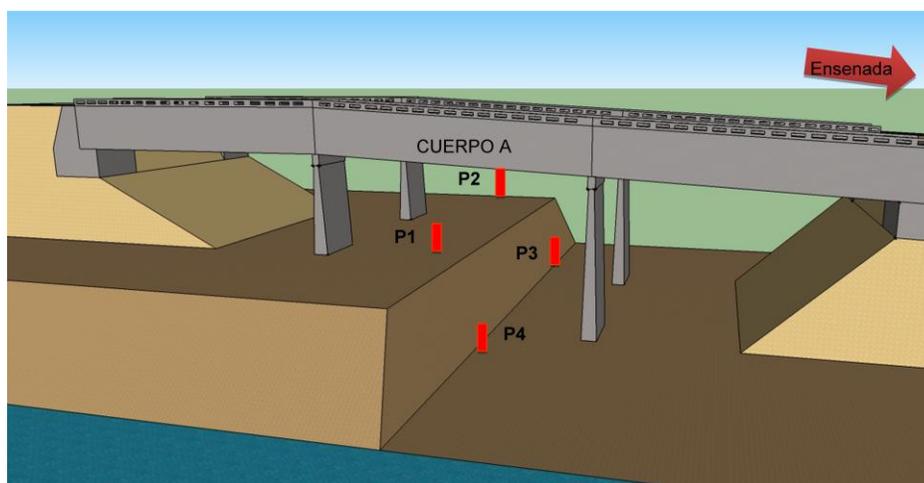


Figura 41. Ubicación de los puntos de registro en campo libre.

5.2.1 Punto 1

En la figura 42 se muestra el punto 1 de mediciones en campo libre, en el cual se obtuvo un registro de aceleración de la componente longitudinal y uno de la componente vertical, generados con el sensor 16 en el arreglo 4. En este punto, se eliminó el registro de la componente transversal ya que no presentó señal, y los cocientes espectrales se estimaron solamente con la componente longitudinal y vertical.

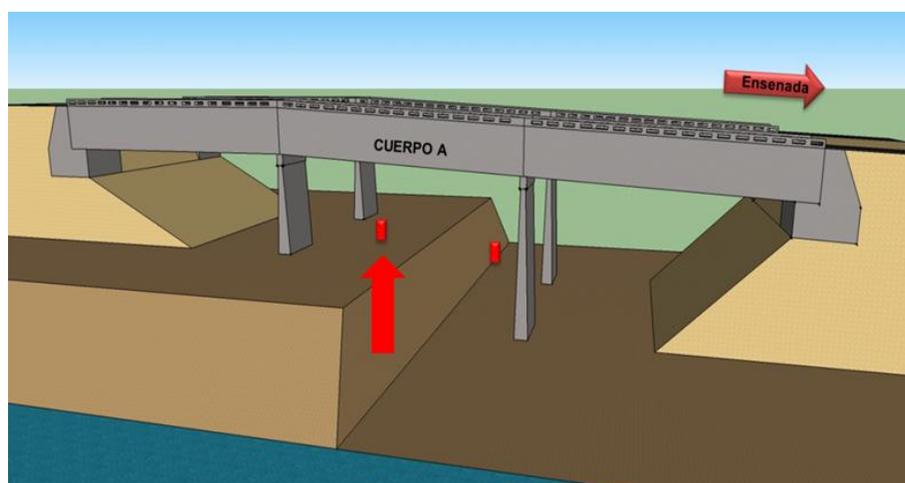


Figura 42. Punto 1 de mediciones en campo libre.

Los espectros de densidad de potencia (PSD) presentan un pico de 10.16Hz en la componente longitudinal y 10.34Hz en la componente vertical (figura 43).

La media de los espectros de amplitud de Fourier muestra un pico espectral de 10.47Hz en la componente longitudinal y 10.05Hz en la componente vertical (figura 43). La mediana de los espectros de Fourier presenta un pico de 10.15Hz en la componente longitudinal y 10.34Hz en la componente vertical (figura 43).

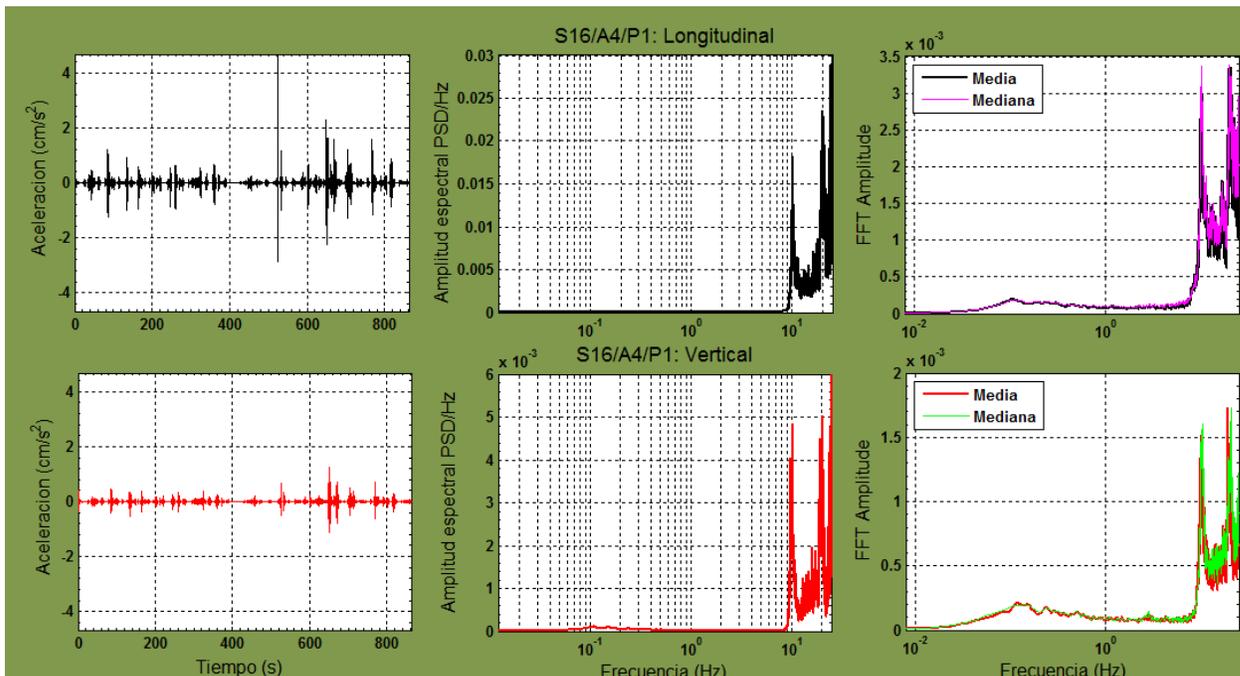


Figura 43. Componentes longitudinal y vertical obtenidas en el punto 1 de mediciones en campo libre. El primer renglón corresponde al registro de la componente longitudinal, obtenido con el sensor 16 en el arreglo 4. El segundo renglón presenta la componente vertical registrada con el sensor 16 en el arreglo 4. La primera columna muestra las series de tiempo en aceleración, la segunda columna corresponde a los espectros de densidad de potencia (PSD) y la tercera columna muestra la media y la mediana de los espectros de amplitud de Fourier (en color negro y rosa para la componente longitudinal y, rojo y verde para la componente vertical).

La estimación de cocientes espectrales utilizando la media de los espectros de Fourier, presentó una frecuencia fundamental de 8.61Hz, 8.62Hz con la mediana de los espectros de Fourier y 7.96Hz en los espectros de densidad de potencia (figura 44).

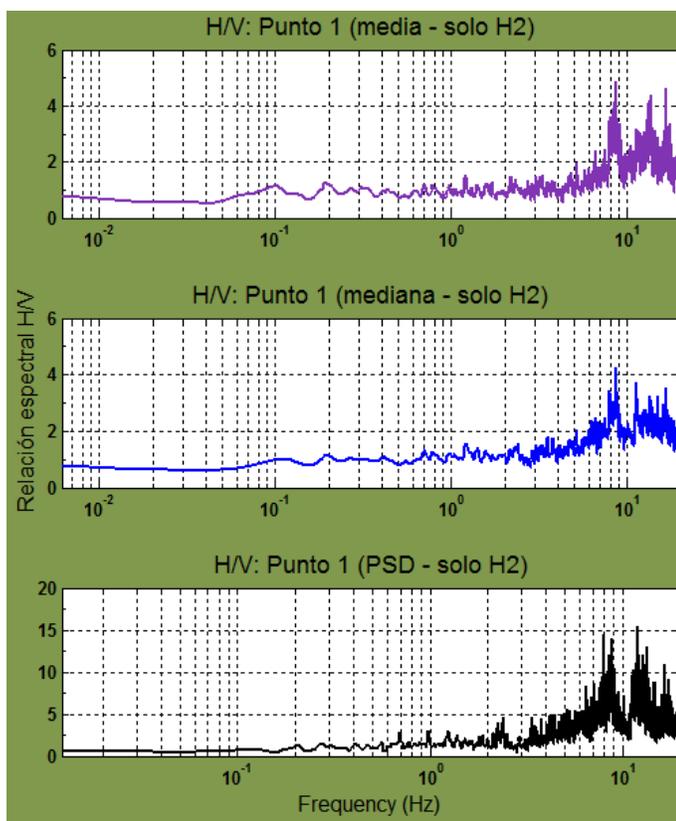


Figura 44. Cocientes espectrales estimados en el punto 1 de mediciones en campo libre. El primer renglón (línea morada) corresponde a la función de transferencia obtenida utilizando la media de los espectros de Fourier. El segundo renglón (línea azul) representa la función de transferencia estimada con la mediana de los espectros de Fourier. El tercer renglón (línea negra) contiene la función de transferencia generada con los espectros de densidad de potencia. Los cocientes espectrales se estimaron solamente con la componente longitudinal (H2) y la componente vertical.

En la tabla 13 se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los registros mencionados anteriormente.

Tabla 13. Frecuencias naturales en PSD, espectros de Fourier y cocientes espectrales de punto P1

Arreglo	Ubicación	Sensor	Eje	Frecuencia (Hz)					
				PSD	Espectros de Fourier		Cocientes espectrales		
					Media	Mediana	PSD	Media	Mediana
A4	Campo libre (P1)	S16	X	Sin señal	Sin señal	Sin señal	7.959	8.606	8.618
			Y	10.160	10.470	10.150			
			Z	10.340	10.050	10.340			
	Serie eliminada								

5.2.2 Punto 2

La figura 45 muestra el punto 2 de mediciones en campo libre, en donde se obtuvieron registros de aceleración de las tres componentes ortogonales. Se generó un registro de la componente transversal, uno de la componente longitudinal y otro de la componente vertical, todos ellos fueron registrados por el sensor 17 en el arreglo 4.

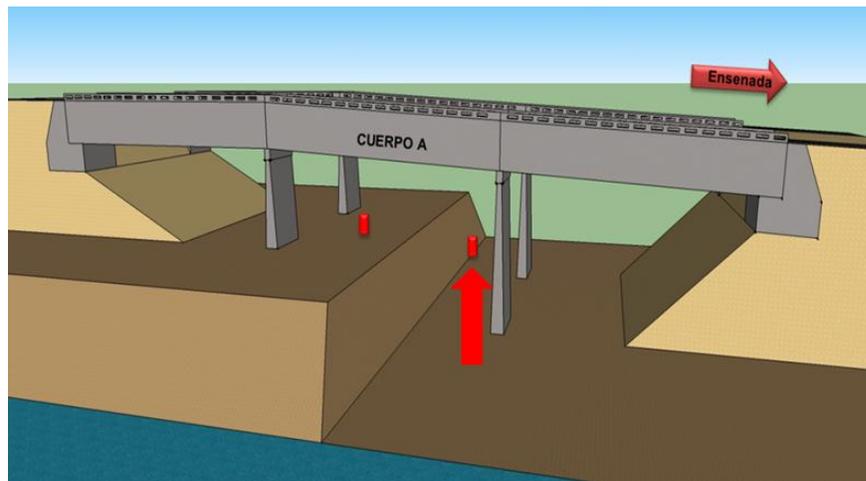


Figura 45. Punto 2 de mediciones en campo libre.

Los espectros de densidad de potencia (PSD) presentan un pico de 9.94Hz en la componente transversal, 10.11Hz en la componente longitudinal y 9.99Hz en la componente vertical (figura 46).

La media de los espectros de Fourier muestra un pico espectral de 10.24Hz en la componente transversal, 10.12Hz en la componente longitudinal y 10.13Hz en la componente vertical (figura 46). La mediana de los espectros de Fourier presenta un pico de 10.18Hz en la componente transversal, 10.13Hz en la componente longitudinal y 10.06Hz en la componente vertical (figura 46).

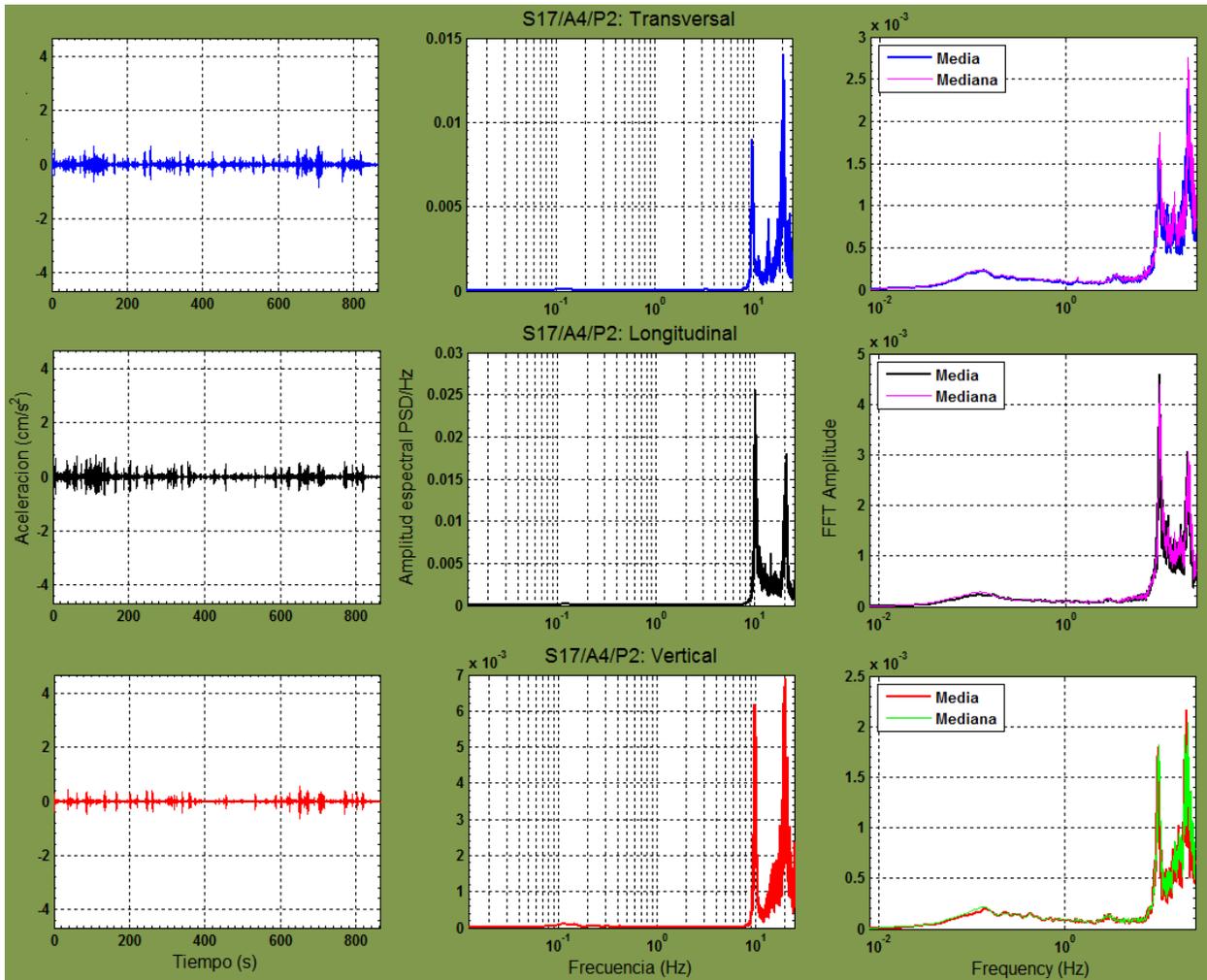


Figura 46. Componente transversal, longitudinal y vertical obtenidas en el punto 2 de mediciones en campo libre. El primer renglón corresponde al registro de la componente transversal, obtenido con el sensor 17 en el arreglo 4. El segundo renglón presenta la componente longitudinal registrada con el sensor 17 en el arreglo 4. El tercer renglón muestra el registro de la componente vertical, obtenido con el sensor 17 en el arreglo 4. La primera columna muestra las series de tiempo en aceleración, la segunda columna corresponde a los espectros de densidad de potencia (PSD) y la tercera columna muestra la media y la mediana de los espectros de amplitud de Fourier.

La estimación de cocientes espectrales utilizando la media de los espectros de Fourier, presentó una frecuencia fundamental de 6.96Hz, 6.96Hz con la mediana de los espectros de Fourier y 6.58Hz en los espectros de densidad de potencia (figura 47).

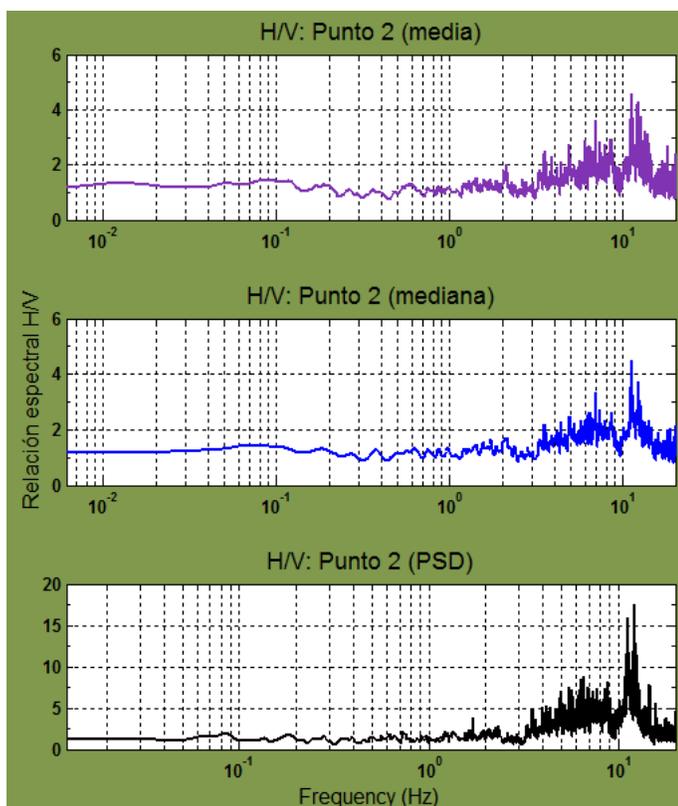


Figura 47. Cocientes espectrales estimados en el punto 2 de mediciones en campo libre. El primer renglón (línea morada) corresponde a la función de transferencia obtenida utilizando la media de los espectros de Fourier. El segundo renglón (línea azul) representa la función de transferencia estimada con la mediana de los espectros de Fourier. El tercer renglón (línea negra) contiene la función de transferencia generada con los espectros de densidad de potencia.

En la tabla 14 se presentan los resultados obtenidos en cada una de los registros descritos anteriormente.

Tabla 14. Frecuencias naturales en PSD, espectros de Fourier y cocientes espectrales de punto P2

Arreglo	Ubicación	Sensor	Eje	Frecuencia (Hz)					
				PSD	Espectros de Fourier		Cocientes espectrales		
					Media	Mediana	PSD	Media	Mediana
A4	Campo libre (P2)	S17	X	9.937	10.240	10.180	6.580	6.958	6.964
			Y	10.110	10.120	10.130			
			Z	9.985	10.130	10.060			

5.2.3 Punto 3

En la figura 48 se muestra el punto 3 de mediciones en campo libre, en el cual se obtuvo un registro de aceleración de la componente longitudinal y uno de la componente vertical, generados con el sensor 16 en el arreglo 5. En este punto, se descartó el registro de la componente transversal ya que no presentó señal, y los cocientes espectrales se estimaron solamente con la componente longitudinal y vertical.

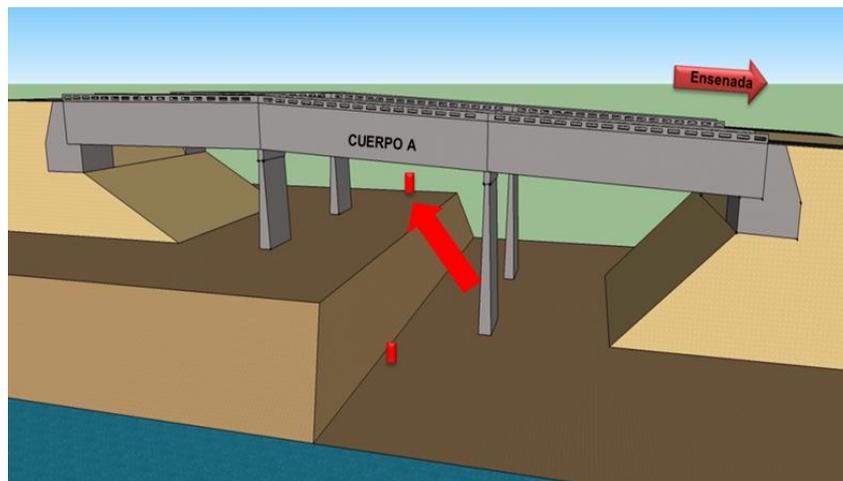


Figura 48. Punto 3 de mediciones en campo libre.

Los espectros de densidad de potencia (PSD) presentan un pico de 10.06Hz en la componente longitudinal y 15.05Hz en la componente vertical (figura 49).

La media de los espectros de amplitud de Fourier muestra un pico espectral de 11.02Hz en la componente longitudinal y 15.69Hz en la componente vertical (figura 49). La mediana de los espectros de Fourier presenta un pico de 10.21Hz en la componente longitudinal y 15.73Hz en la componente vertical (figura 49).

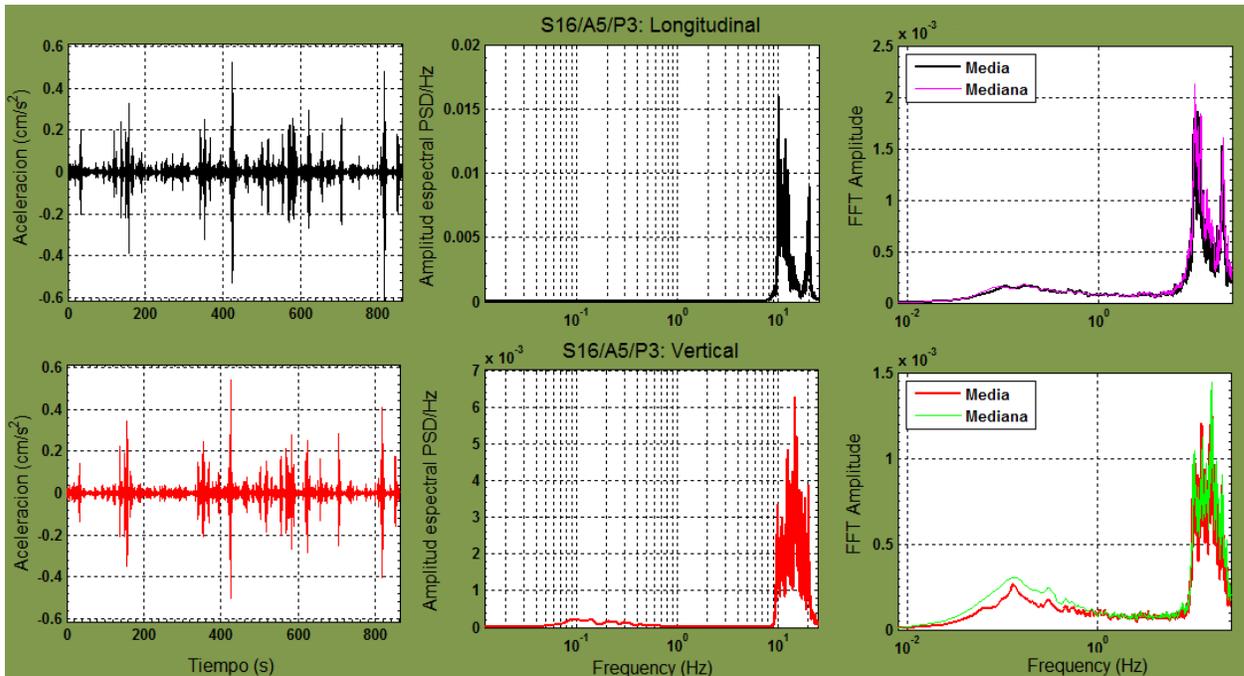


Figura 49. Componentes longitudinal y vertical obtenidas en el punto 3 de mediciones en campo libre. El primer renglón corresponde al registro de la componente longitudinal, obtenido con el sensor 16 en el arreglo 5. El segundo renglón presenta la componente vertical registrada con el sensor 16 en el arreglo 5. La primera columna muestra las series de tiempo en aceleración, la segunda columna corresponde a los espectros de densidad de potencia (PSD) y la tercera columna muestra la media y la mediana de los espectros de amplitud de Fourier (en color negro y rosa para la componente longitudinal y, rojo y verde para la componente vertical).

La estimación de cocientes espectrales utilizando la media de los espectros de Fourier, presentó una frecuencia fundamental de 8.33Hz, 8.50Hz con la mediana de los espectros de amplitud de Fourier y 9.08Hz en los espectros de densidad de potencia (figura 50).

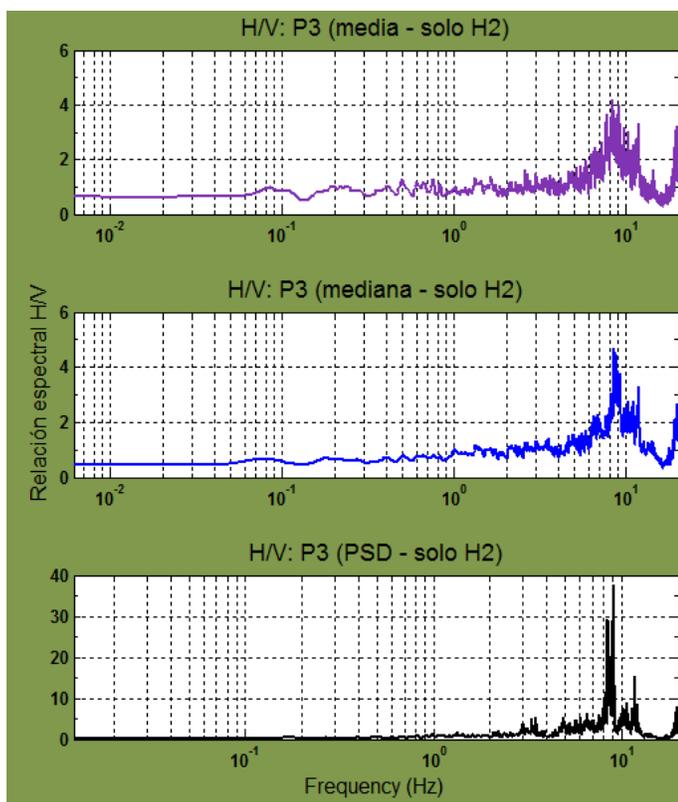


Figura 50. Cocientes espectrales estimados en el punto 3 de mediciones en campo libre. El primer renglón (línea morada) corresponde a la función de transferencia obtenida utilizando la media de los espectros de Fourier. El segundo renglón (línea azul) representa la función de transferencia estimada con la mediana de los espectros de Fourier. El tercer renglón (línea negra) contiene la función de transferencia generada con los espectros de densidad de potencia. Los cocientes espectrales se estimaron solamente con la componente longitudinal (H2) y la componente vertical.

En la tabla 15 se muestran los resultados obtenidos en cada una de los registros mencionados anteriormente.

Tabla 15. Frecuencias naturales en PSD, espectros de Fourier y cocientes espectrales de punto P3

Arreglo	Ubicación	Sensor	Eje	Frecuencia (Hz)					
				PSD	Espectros de Fourier		Cocientes espectrales		
					Media	Mediana	PSD	Media	Mediana
A5	Campo libre (P3)	S16	X	Sin señal	Sin señal	Sin señal	9.082	8.325	8.496
			Y	10.060	11.020	10.210			
			Z	15.050	15.690	15.730			
	Serie descartada								

5.2.4 Punto 4

En la figura 51 se muestra el punto 4 de mediciones en campo libre, en donde se obtuvieron registros de aceleración de las tres componentes ortogonales. Se generó un registro de la componente transversal, uno de la componente longitudinal y otro de la componente vertical, todos ellos fueron registrados por el sensor 17 en el arreglo 5.

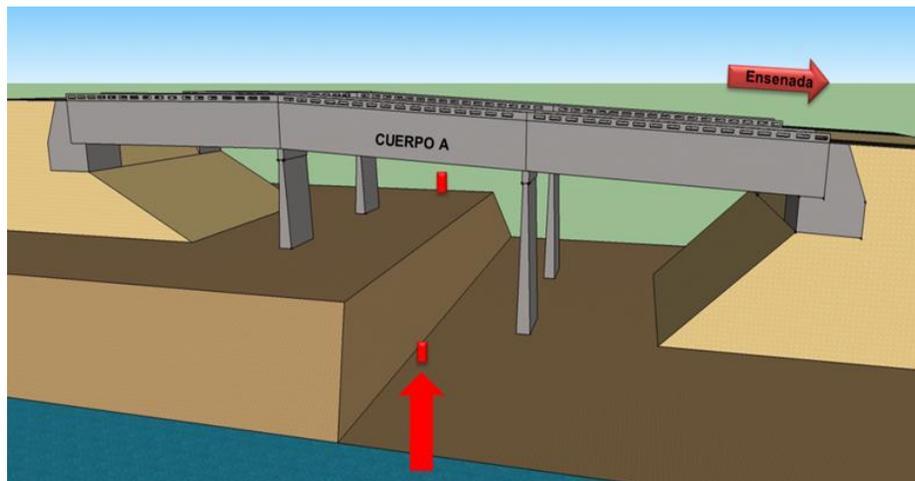


Figura 51. Punto 4 de mediciones en campo libre.

Los espectros de densidad de potencia (PSD) presentan un pico de 10.33Hz en la componente transversal, 9.90Hz en la componente longitudinal y 10.39Hz en la componente vertical (figura 52).

La media de los espectros de amplitud de Fourier muestra un pico espectral de 10.46Hz en la componente transversal, 10.10Hz en la componente longitudinal y 10.36Hz en la componente vertical (figura 52). La mediana de los espectros de amplitud de Fourier presenta un pico de 10.34Hz en la componente transversal, 10.10Hz en la componente longitudinal y 10.25Hz en la componente vertical (figura 52).

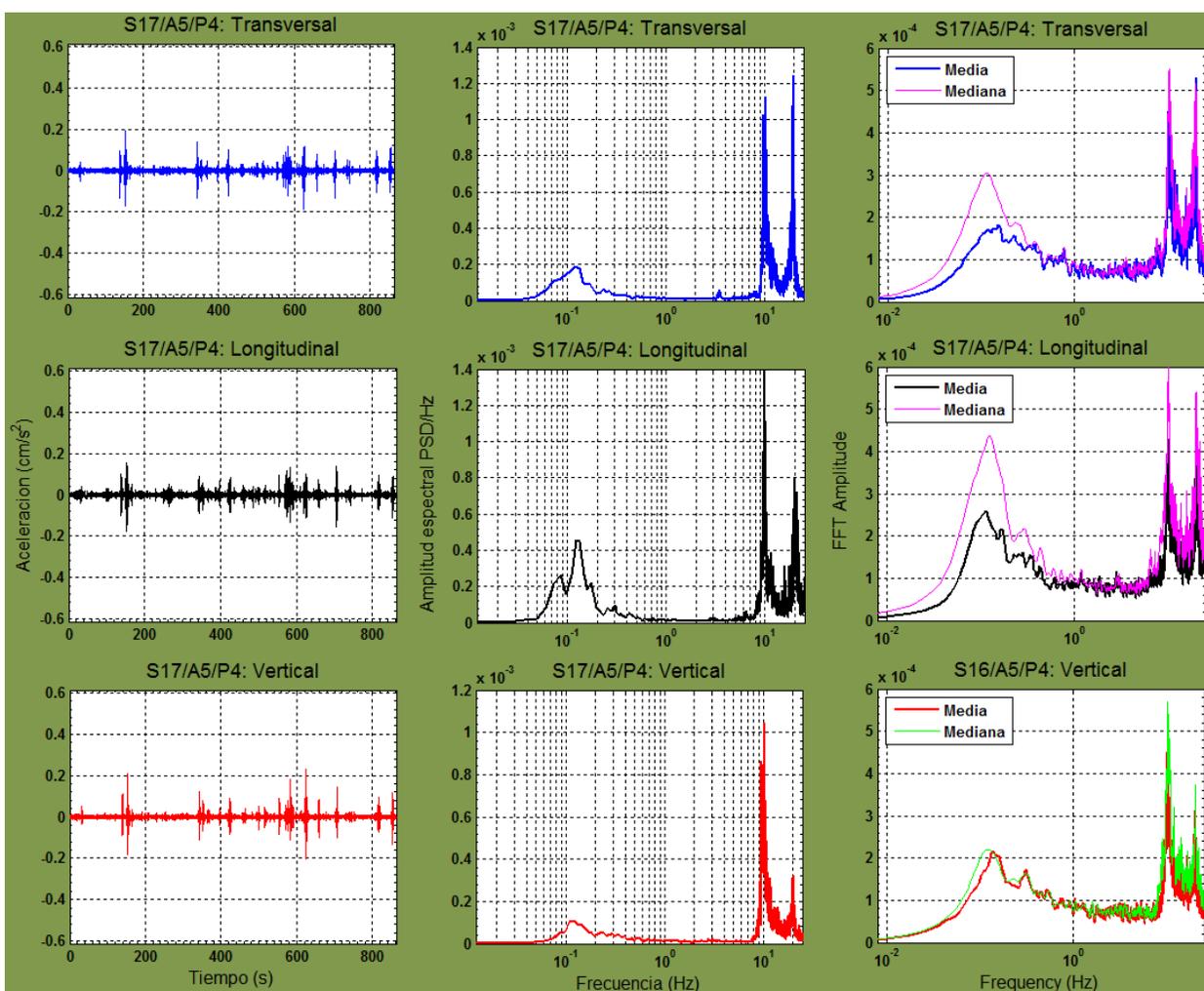


Figura 52. Componente transversal, longitudinal y vertical obtenidas en el punto 4 de mediciones en campo libre. El primer renglón corresponde al registro de la componente transversal, obtenido con el sensor 17 en el arreglo 5. El segundo renglón presenta la componente longitudinal registrada con el sensor 17 en el arreglo 5. El tercer renglón muestra el registro de la componente vertical, obtenido con el sensor 17 en el arreglo 5. La primera columna muestra las series de tiempo en aceleración, la segunda columna corresponde a los espectros de densidad de potencia (PSD) y la tercera columna muestra la media y la mediana de los espectros de amplitud de Fourier.

La estimación de cocientes espectrales utilizando la media de los espectros de Fourier presentó una frecuencia fundamental de 7.45Hz, 7.37Hz con la mediana de los espectros de amplitud de Fourier y 6.58Hz en los espectros de densidad de potencia (figura 53).

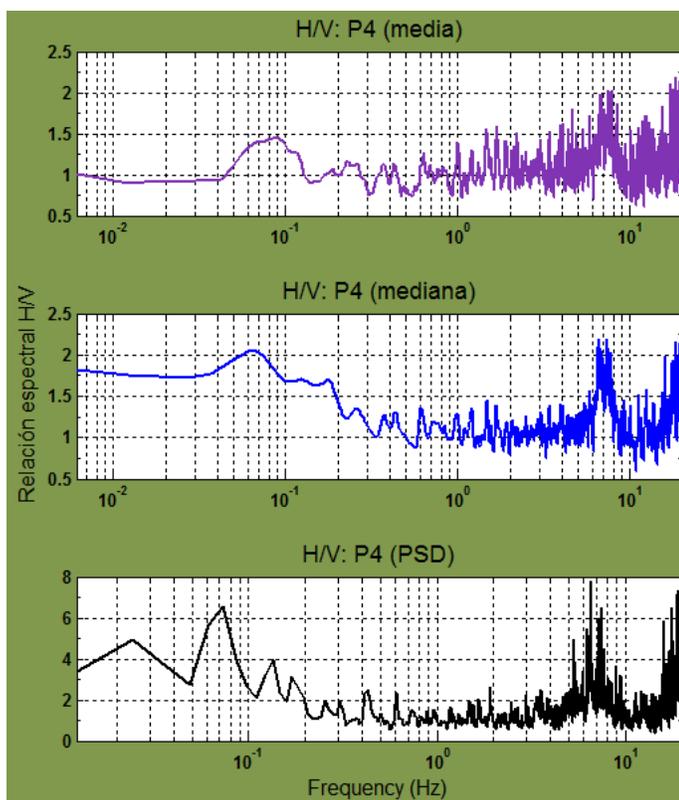


Figura 53. Cocientes espectrales estimados en el punto 4 de mediciones en campo libre. El primer renglón (línea morada) corresponde a la función de transferencia obtenida utilizando la media de los espectros de Fourier. El segundo renglón (línea azul) representa la función de transferencia estimada con la mediana de los espectros de Fourier. El tercer renglón (línea negra) contiene la función de transferencia generada con los espectros de densidad de potencia.

En la tabla 16 se muestran los resultados obtenidos en cada una de los registros mencionados anteriormente.

Tabla 16. Frecuencias naturales en PSD, espectros de Fourier y cocientes espectrales de punto P4

Arreglo	Ubicación	Sensor	Eje	Frecuencia (Hz)					
				PSD	Espectros de Fourier		Cocientes espectrales		
					Media	Mediana	PSD	Media	Mediana
A5	Campo libre (P4)	S17	X	10.330	10.460	10.340	6.58	7.452	7.367
			Y	9.900	10.100	10.100			
			Z	10.390	10.360	10.250			

5.2.5 Resumen de frecuencias fundamentales del suelo

En la tabla 17 se muestran los resultados obtenidos para los puntos de medición en campo libre, indicando el número de arreglo, ubicación del sensor, eje o componente registrada (x, y o z), las frecuencias obtenidas en los espectros de densidad de potencia, en la media y mediana de los espectros de Fourier y la frecuencia fundamental de estimada en los cocientes espectrales. En color amarillo se indican las series de tiempo que no registraron señal y no fueron tomadas en cuenta. El eje “x” corresponde a la componente transversal, el eje “y” a la componente longitudinal y el eje “z” a la componente vertical.

Tabla 17. Frecuencias en PSD, espectros de Fourier y cocientes espectrales de mediciones en campo libre

Arreglo	Ubicación	Sensor	Eje	Frecuencia (Hz)					
				PSD	Espectros de Fourier		Cocientes espectrales		
					Media	Mediana	PSD	Media	Mediana
A4	Campo libre (P1)	S16	X	Sin señal	Sin señal	Sin señal	7.959	8.606	8.618
			Y	10.160	10.470	10.150			
			Z	10.340	10.050	10.340			
	Campo libre (P2)	S17	X	9.937	10.240	10.180	6.58	6.958	6.964
			Y	10.110	10.120	10.130			
			Z	9.985	10.130	10.060			
A5	Campo libre (P3)	S16	X	Sin señal	Sin señal	Sin señal	9.082	8.325	8.496
			Y	10.060	11.020	10.210			
			Z	15.050	15.690	15.730			
	Campo libre (P4)	S17	X	10.330	10.460	10.340	6.580	7.452	7.367
			Y	9.900	10.100	10.100			
			Z	10.390	10.360	10.250			
	Serie eliminada								

El punto registrado alejado 38.36m del estribo 1 (figura 20 de sección 3.1.3.4) no fue tomado en cuenta en la base de datos debido a que presentó registros poco confiables.

5.3 Técnica del decremento aleatorio

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con la técnica del decremento aleatorio, aplicada en segmentos de registros de aceleración y velocidad de la componente vertical, generados al centro del claro 2 (sección 5.3.1) y claro 3 (sección 5.3.2). Se incluyeron pruebas de algunos segmentos de registros de la componente longitudinal, para realizar una comparación de las frecuencias y amortiguamientos generados utilizando las componentes horizontales.

Los resultados generados en el programa de la técnica del decremento aleatorio se presentan en gráficas de las firmas y amortiguamientos obtenidos. En las figuras 55, 58, 61, 64 y 67 se muestran las firmas obtenidas para cada combinación de valores de umbral de amplitud y longitud de segmento, dentro de cada gráfica se incluye el valor del coeficiente de correlación y en el segundo renglón el valor de la hipótesis nula. Por otra parte, en las figuras 56, 59, 62, 65 y 68 se presentan las gráficas de los amortiguamientos estimados para cada combinación de valores de umbral de amplitud y longitud de segmento, dentro de cada gráfica se incluyen los resultados de las cuatro formas diferentes en las que se estimó el amortiguamiento y se indica el número de gráfica; en el encabezado de cada una de ellas se indica el valor promedio del amortiguamiento (md) y la desviación estándar (ds).

5.3.1 Claro 2

De la componente vertical del claro 2, se analizaron cinco segmentos de aceleración y cinco de velocidad. Algunos de ellos se trabajaron utilizando el segmento completo o una porción de él, esto con el propósito de obtener la mejor firma del registro. En la tabla 18 se muestran los resultados obtenidos en cada caso analizado. En las componentes verticales del claro 2 se estimó una frecuencia fundamental promedio de 2.931Hz y un amortiguamiento promedio de 5.4%.

En la figura 54 se muestra como ejemplo, el segmento 4 de un registro de aceleración de la componente vertical, en la figura 55 se presenta la matriz de gráficas de firmas generadas en la TDA y en la figura 56 se exhibe la matriz de gráficas de amortiguamientos obtenidas en la TDA. Encerrada en un círculo color rojo, se indica la mejor firma estimada en este caso particular.

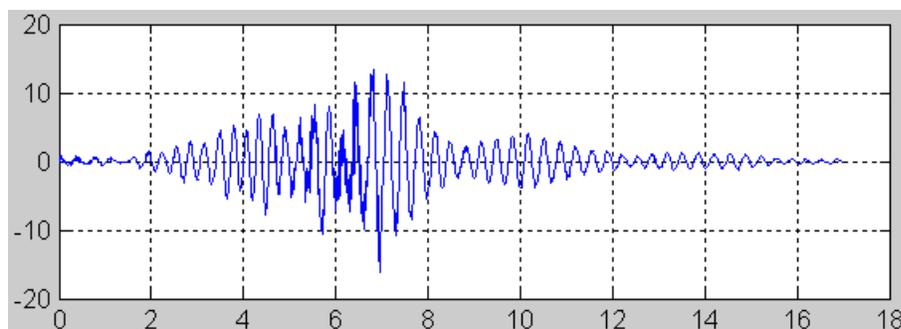


Figura 54. Segmento 4 de aceleración (componente vertical).

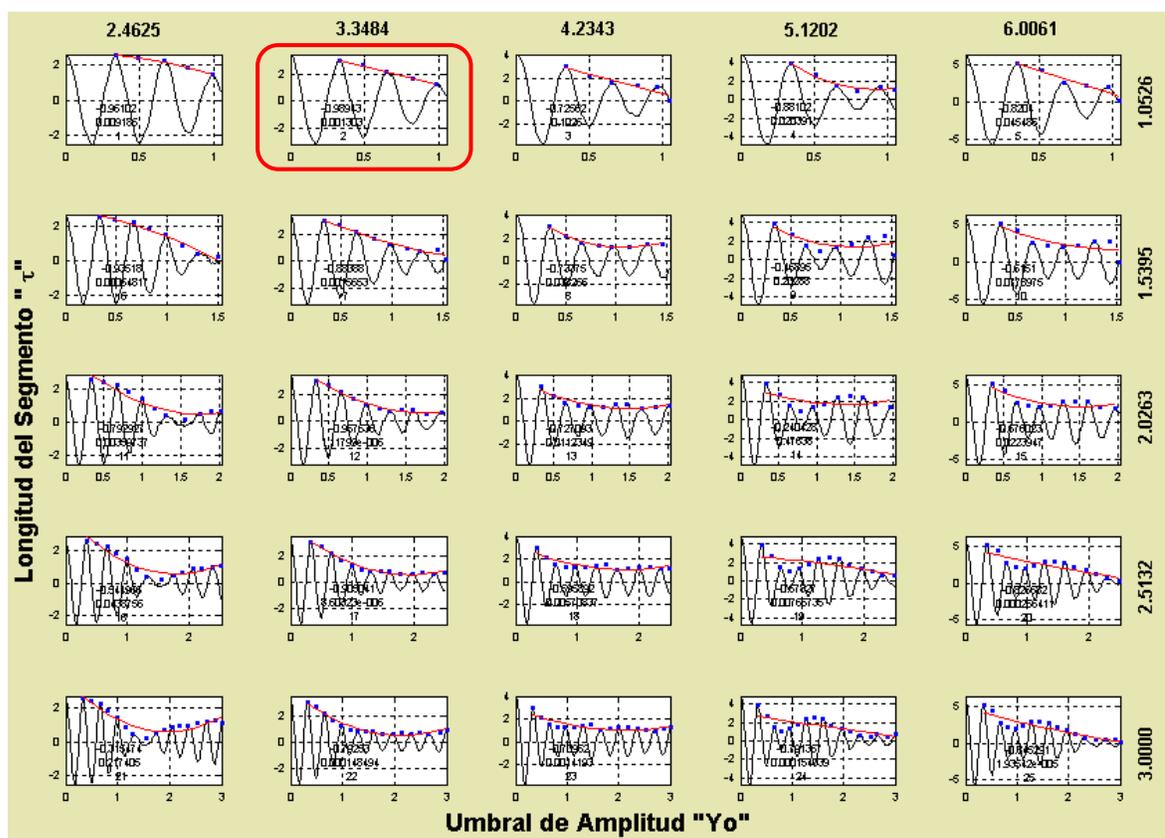


Figura 55. Matriz de gráficas de firmas del segmento 4 de aceleración (componente vertical).

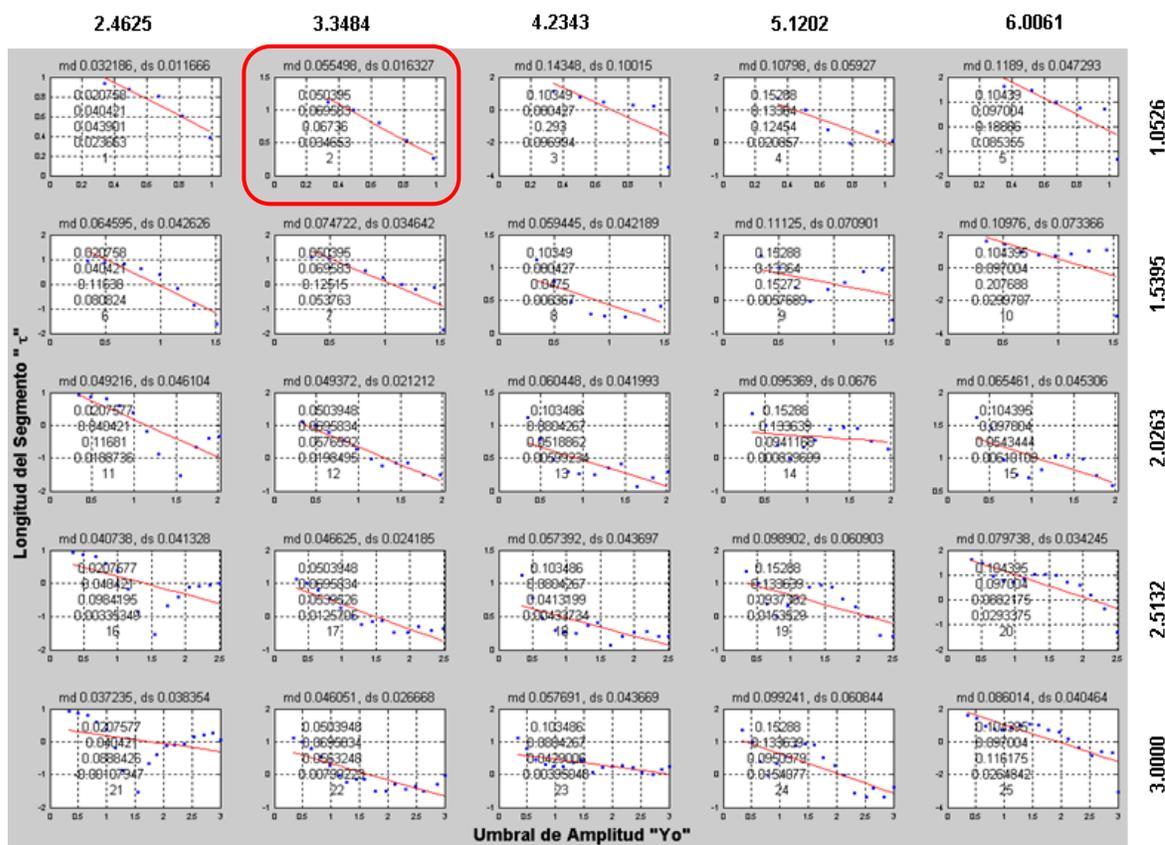


Figura 56. Matriz de gráficas de amortiguamientos del segmento 4 de aceleración (componente vertical).

En la figura 57 se presenta como siguiente ejemplo, una porción del segmento 4 de un registro de velocidad, en la figura 58 se muestra la matriz de gráficas de firmas generadas en la TDA y en la figura 59 se exhibe la matriz de gráficas de amortiguamientos obtenidas en la TDA. Encerrada en un círculo color rojo, se indica la mejor firma estimada en este caso.

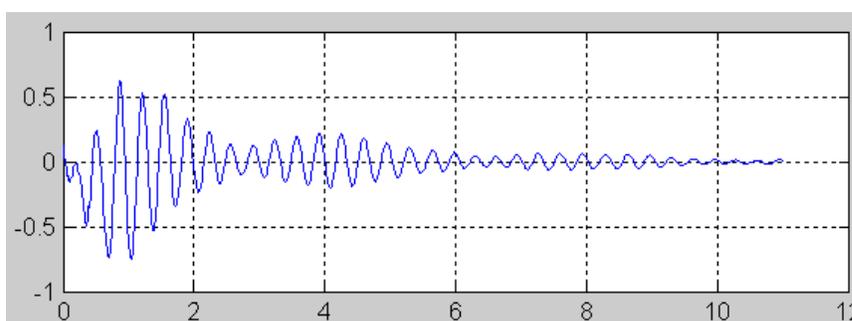


Figura 57. Porción de segmento 4 de velocidad (componente vertical).

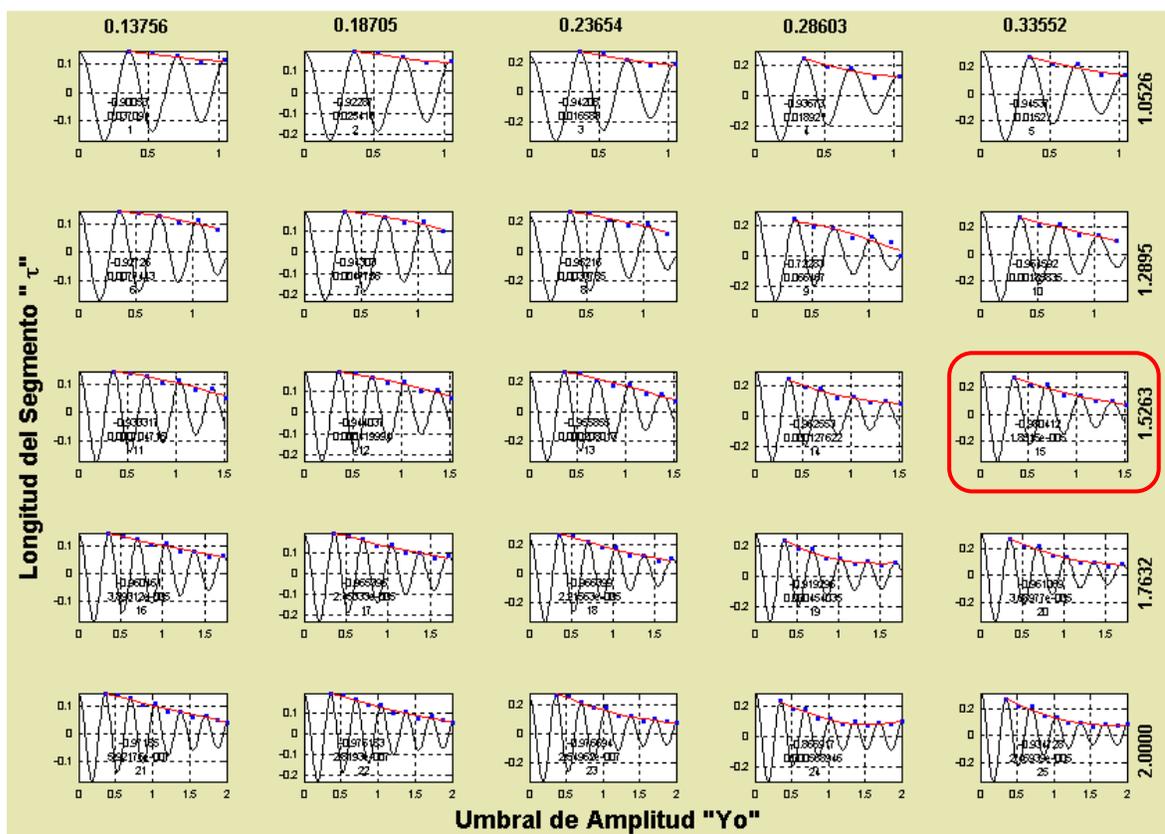


Figura 58. Matriz de gráficas de firmas de la porción del segmento 4 de velocidad (componente vertical).

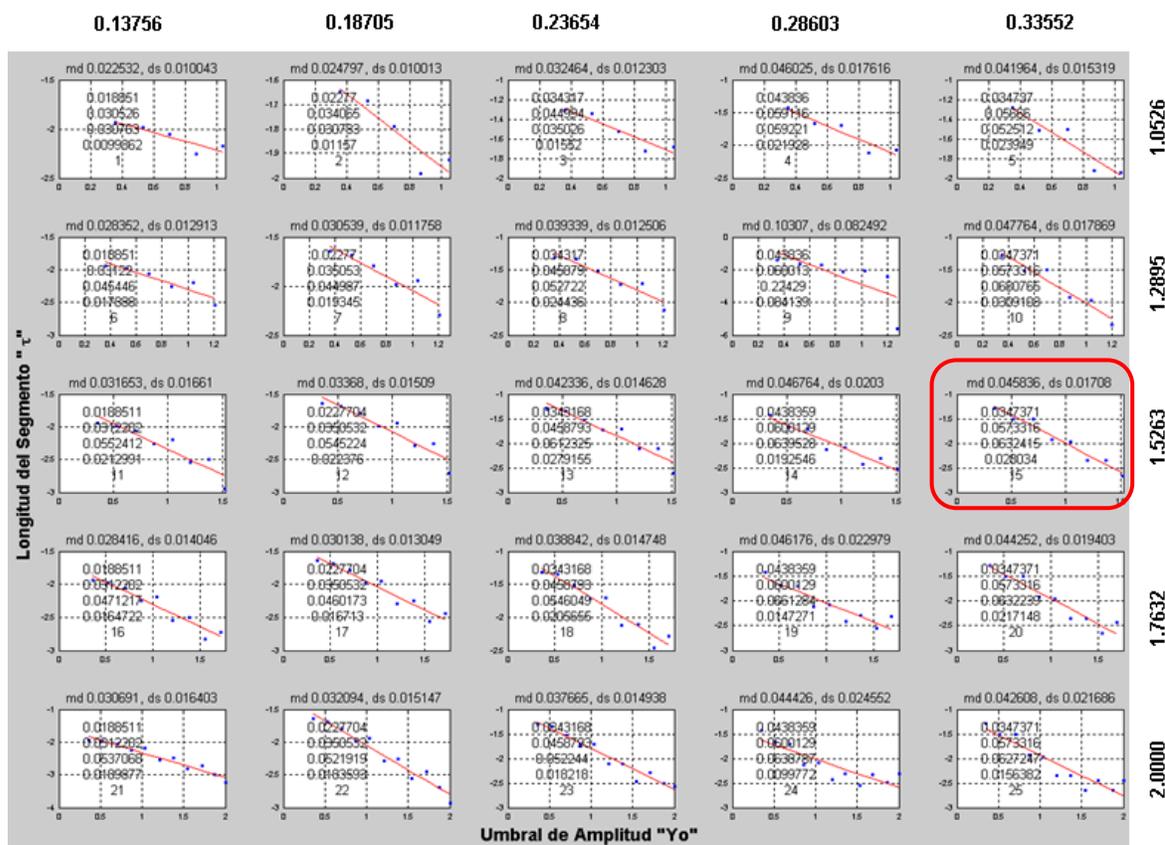


Figura 59. Matriz de gráficas de amortiguamientos de la porción del segmento 4 de velocidad (componente vertical).

Tabla 18. Resultados de la técnica del decremento aleatorio para claro 2
(componentes verticales)

Segmento	Registro	Serie	Yo	τ	C.C.	H.N.	f (Hz)	ξ	ds
S1	Aceleración	Completa	1.0526	1.0526	-0.835	0.079	3.703	0.056	0.042
S1		Porción	1.6154	1.331	-0.957	0.000	2.500	0.065	0.036
S2		Porción	1.9497	1.5395	-0.985	0.000	2.703	0.024	0.009
S3		Porción	2.5000	2.5132	-0.998	0.000	3.226	0.014	0.005
S4		Completa	3.3484	1.0526	-0.989	0.001	3.077	0.055	0.016
S5		Completa	3.2500	1.0526	-0.980	0.003	2.703	0.052	0.015
S1	Velocidad	Porción	0.0500	1.0526	-0.974	0.005	2.667	0.062	0.023
S2		Completa	0.1174	2.0263	-0.925	0.000	3.030	0.105	0.071
S3		Porción	0.1240	2.7057	-0.943	0.000	2.857	0.021	0.018
S4		Porción	0.3355	1.5263	-0.980	0.000	3.030	0.046	0.017
S4		Completa	0.2250	1.2895	-0.969	0.006	3.125	0.085	0.033
S5		Completa	0.2189	1.0526	-0.951	0.013	2.703	0.087	0.036
S5		Porción	0.1722	2.0000	-0.978	0.000	2.778	0.032	0.013
Promedio							2.931	0.054	

seg: segmento, yo: umbral de amplitud, T: longitud de la serie, C.C.:coeficiente de correlación, H.N.: hipótesis nula, f: frecuencia fundamental, ξ : amortiguamiento y ds: desviación estándar.

En la componente longitudinal del claro 2, se analizaron dos segmentos de aceleración. Uno de ellos se trabajó utilizando el segmento completo y el segundo usando solo una porción del segmento, esto con el propósito de obtener la mejor firma del registro. En la tabla 19 se muestran los resultados obtenidos en cada caso analizado. En las componentes longitudinales se estimó una frecuencia fundamental promedio de 2.780Hz y un amortiguamiento promedio de 4.7%.

Tabla 19. Resultados de la técnica del decremento aleatorio para claro 2
(componentes longitudinales)

Segmento	Registro	Serie	Yo	τ	C.C.	H.N.	f (Hz)	ξ	ds
S1	Aceleración	Completa	1.6000	1.108	-0.993	0.001	2.703	0.073	0.026
S2		Porción	2.0048	1.581	-0.999	0.000	2.857	0.021	0.007
Promedio							2.780	0.047	

seg: segmento, yo: umbral de amplitud, T: longitud de la serie, C.C.:coeficiente de correlación, H.N.: hipótesis nula, f: frecuencia fundamental, ξ : amortiguamiento y ds: desviación estándar.

En la figura 60 se presenta un ejemplo de la componente longitudinal, correspondiente al segmento 1 de un registro de aceleración, en la figura 61 se muestra la matriz de gráficas de firmas generadas y en la figura 62 se exhibe la matriz de gráficas de

amortiguamientos obtenidas en la TDA. Encerrada en un círculo color rojo, se indica la mejor firma estimada en este caso.

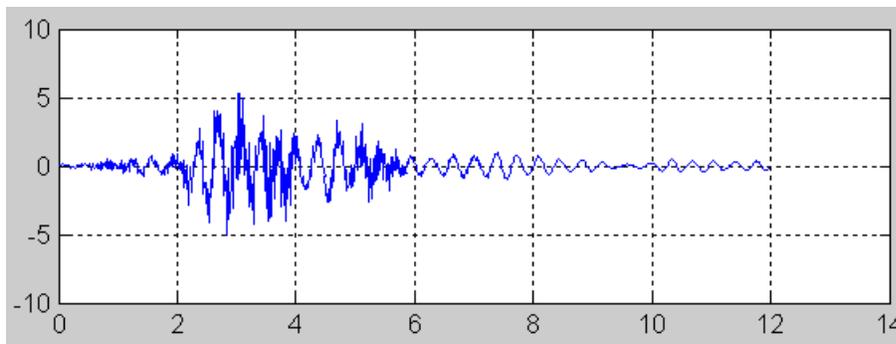


Figura 60. Segmento 1 de aceleración (componente longitudinal).

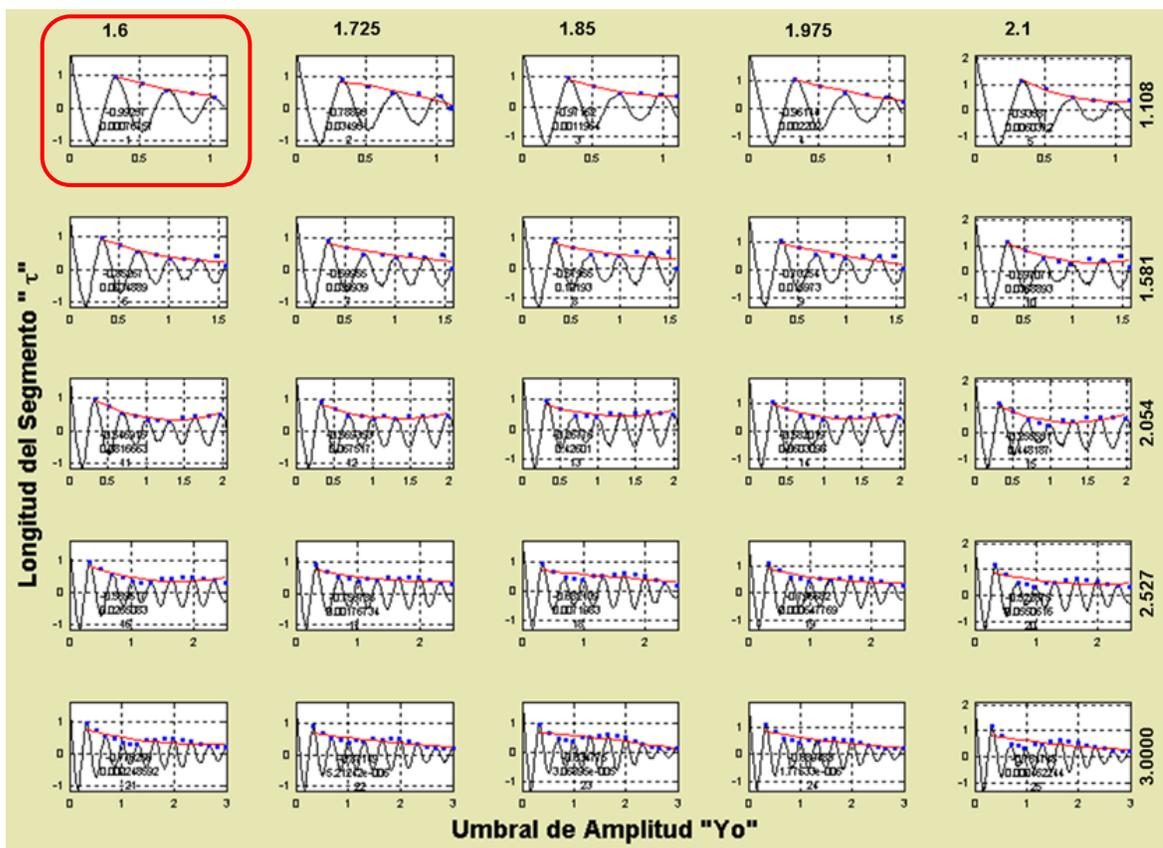


Figura 61. Matriz de gráficas de firmas del segmento 4 de aceleración (componente longitudinal).

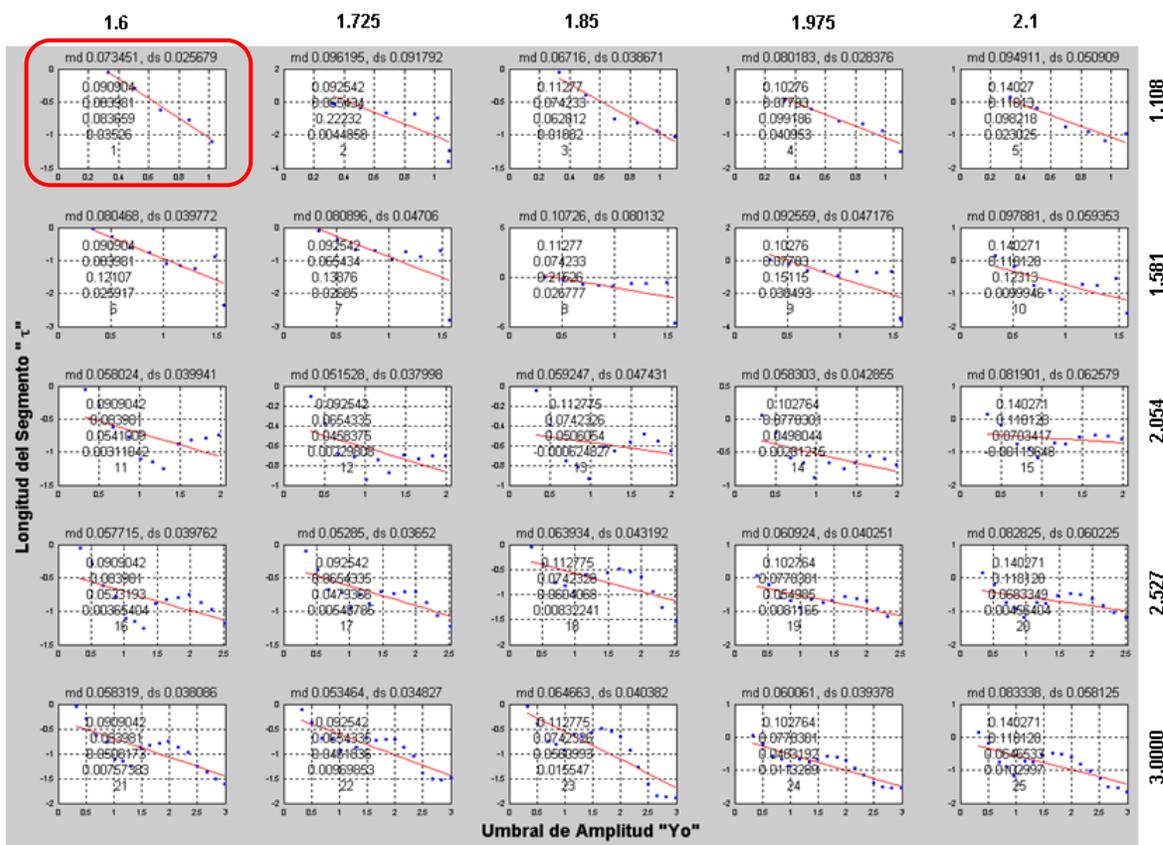


Figura 62. Matriz de gráficas de amortiguamientos del segmento 1 de aceleración (componente longitudinal).

5.3.2 Claro 3

En la componente vertical del claro 3, se analizaron seis segmentos de aceleración, todos se trabajaron utilizando el segmento completo. En la tabla 20 se muestran los resultados obtenidos en cada segmento estudiado. En las componentes verticales del claro 3 se estimó una frecuencia fundamental promedio de 3.108Hz y un amortiguamiento promedio de 3.2%.

En la figura 63 se presenta como ejemplo, el segmento 4 de un registro de aceleración de la componente vertical, en la figura 64 se presenta la matriz de gráficas de firmas generadas en la TDA y en la figura 65 se exhibe la matriz de gráficas de

amortiguamientos obtenidas en la TDA. Encerrada en un círculo color rojo, se indica la mejor firma estimada en este caso particular.

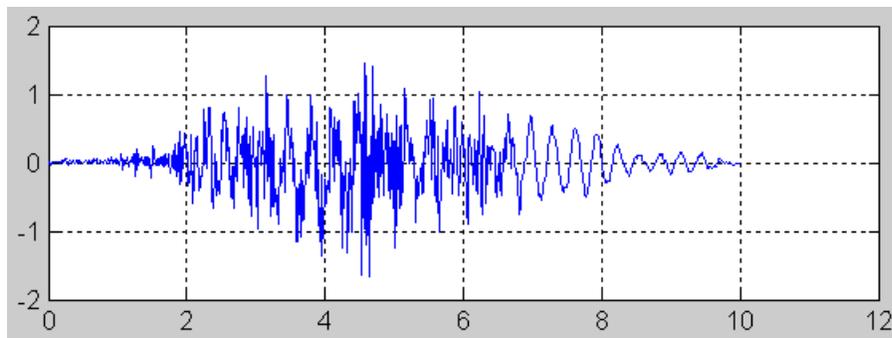


Figura 63. Segmento 1 de aceleración (componente vertical).

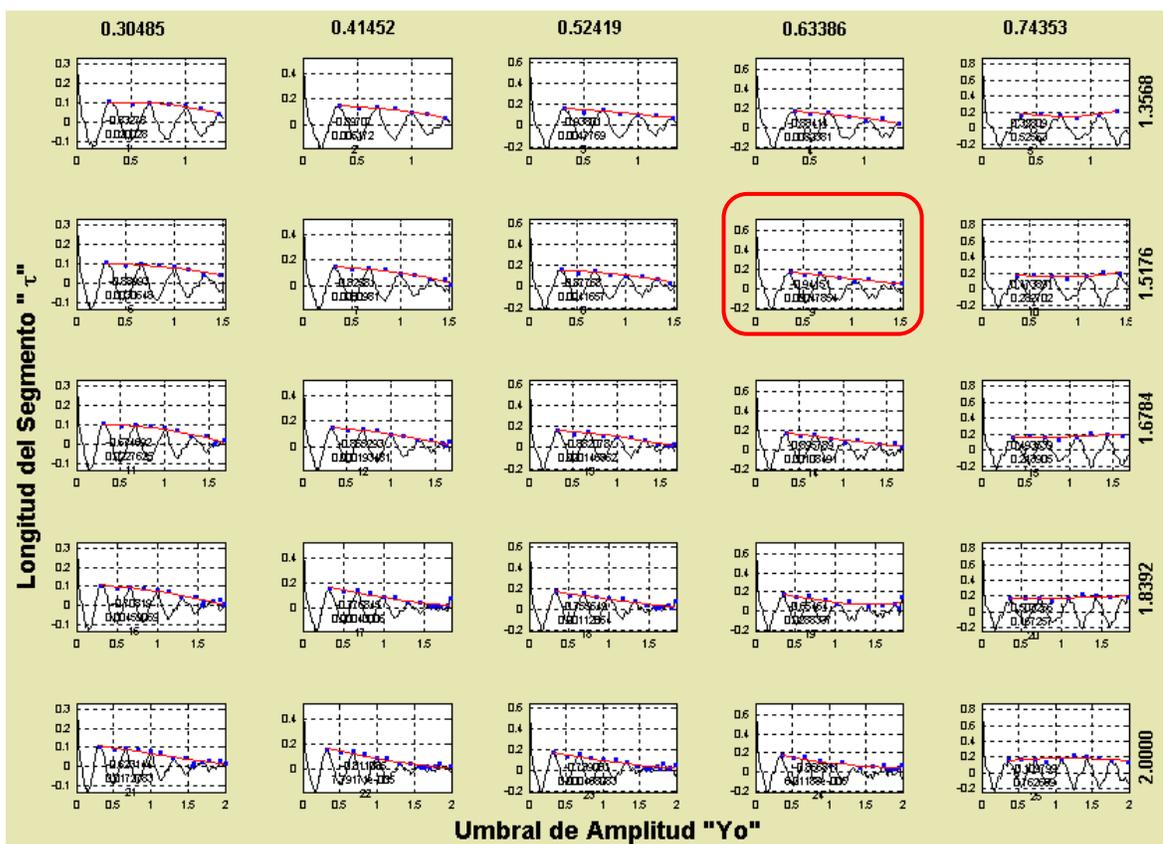


Figura 64. Matriz de gráficas de firmas del segmento 1 de aceleración (componente vertical).

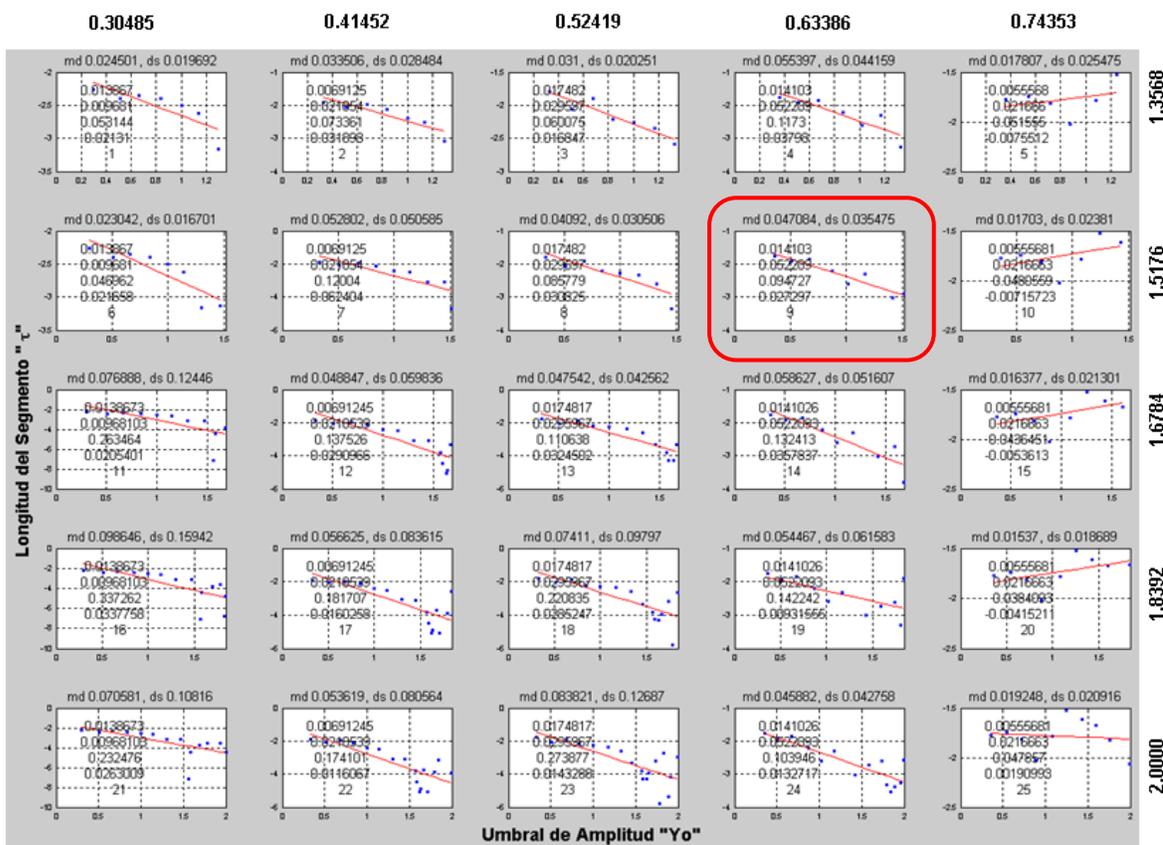


Figura 65. Matriz de gráficas de amortiguamientos del segmento 1 de aceleración (componente vertical).

Tabla 20. Resultados de la técnica del decremento aleatorio para claro 3 (componentes verticales)

Segmento	Registro	Serie	yo	τ	C.C.	H.N.	f (Hz)	ξ	ds
S1	Aceleración	Completa	0.6339	1.5176	-0.942	0.000	3.226	0.041	0.031
S2		Completa	0.4931	2.0263	-0.974	0.000	3.030	0.034	0.019
S3		Completa	0.8165	2.134	-0.932	0.000	2.941	0.015	0.010
S4		Completa	1.7235	1.6205	-0.992	0.000	3.333	0.026	0.009
S5		Completa	1.1587	1.8947	-0.989	0.000	2.941	0.058	0.023
S6		Completa	0.3000	1.2105	-0.963	0.001	3.175	0.017	0.008
Promedio							3.108	0.032	

seg: segmento, yo: umbral de amplitud, T: longitud de la serie, C.C.:coeficiente de correlación, H.N.: hipótesis nula, f: frecuencia fundamental, ξ : amortiguamiento y ds: desviación estándar.

En la componente longitudinal del claro 3, se analizaron tres segmentos de aceleración, utilizando los segmentos completos. En la tabla 21 se presentan los resultados

obtenidos en cada caso analizado. En las componentes longitudinales se estimó una frecuencia fundamental promedio de 2.885Hz y un amortiguamiento promedio de 2.2%. En la figura 66 se presenta como ejemplo, el segmento 4 de un registro de aceleración de la componente vertical, en la figura 67 se presenta la matriz de gráficas de firmas generadas en la TDA y en la figura 68 se exhibe la matriz de gráficas de amortiguamientos obtenidas en la TDA. Encerrada en un círculo color rojo, se indica la mejor firma estimada en este caso particular.

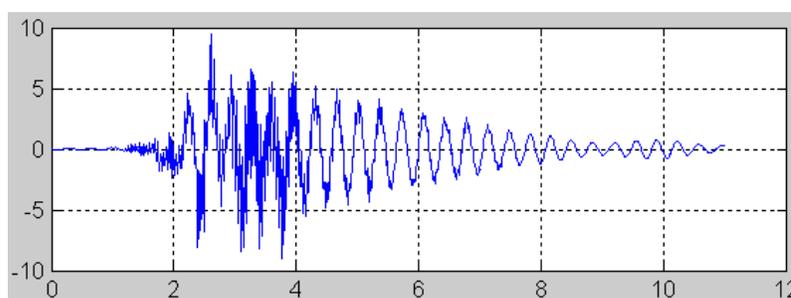


Figura 66. Segmento 1 de aceleración (componente longitudinal).

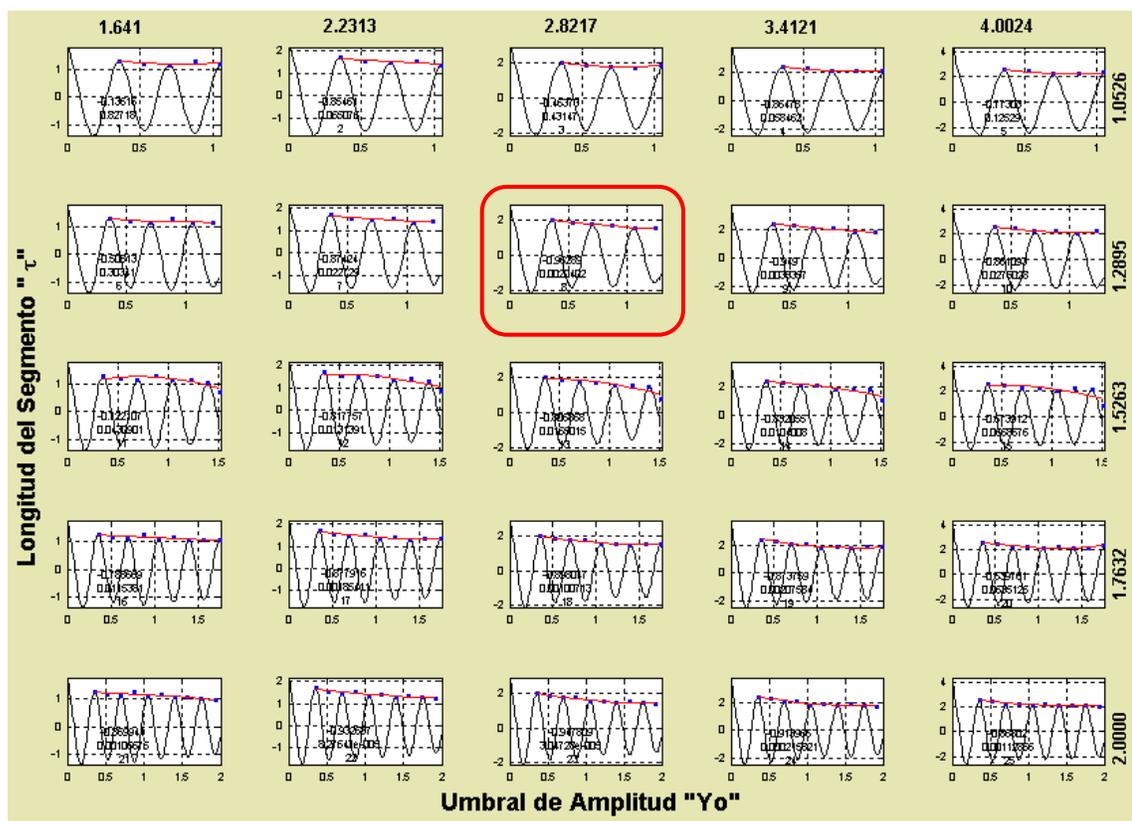


Figura 67. Matriz de gráficas de firmas del segmento 1 de aceleración (componente longitudinal).

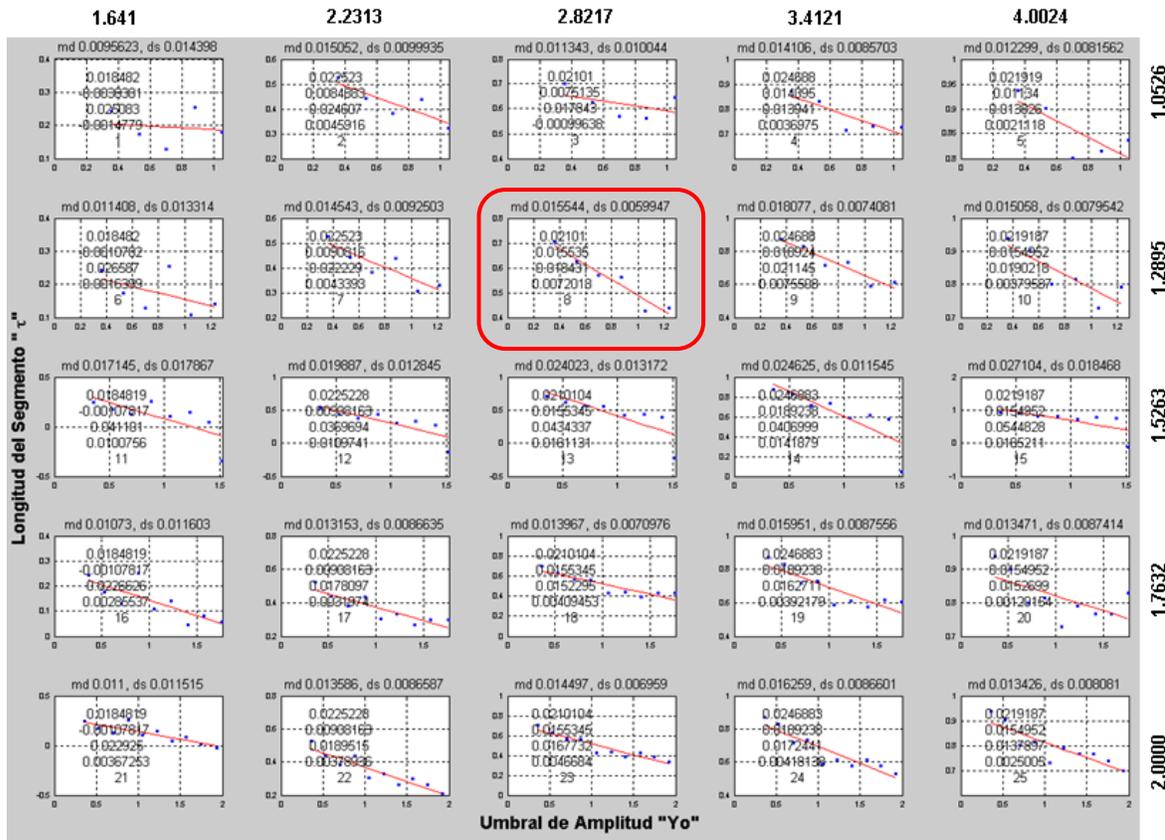


Figura 68. Matriz de gráficas de amortiguamientos del segmento 1 de aceleración (componente longitudinal).

Tabla 21. Resultados de la técnica del decremento aleatorio para claro 3 (componentes longitudinales)

Segmento	Registro	Serie	yo	τ	C.C.	H.N.	f (Hz)	ξ	ds
S1	Aceleración	Completa	2.8217	1.2895	-0.963	0.002	2.857	0.016	0.006
S2		Completa	2.5225	1.5263	-0.988	0.000	2.941	0.013	0.004
S3		Completa	2.1861	1.0526	-0.998	0.000	2.857	0.038	0.013
Promedio							2.885	0.022	

seg: segmento, yo: umbral de amplitud, T: longitud de la serie, C.C.:coeficiente de correlación, H.N.: hipótesis nula, f: frecuencia fundamental, ξ : amortiguamiento y ds: desviación estándar.

5.3.3 Resumen de resultados obtenidos en la técnica del decremento aleatorio

En la tabla 22 se resumen los datos más importantes generados en la TDA para el claro 2 y claro 3. Se indica el claro analizado, número de segmento procesado, eje o componente, tipo de registro (aceleración o velocidad), característica de la serie de

tiempo estudiada (completa o porción del segmento), valor del umbral de amplitud y longitud de segmento que generó la mejor firma, valor del coeficiente de correlación, hipótesis nula, frecuencia fundamental obtenida, valor de amortiguamiento y desviación estándar de la estimación del amortiguamiento.

Tabla 22. Resultados de la técnica del decrecimiento aleatorio del claro 2 y claro 3

Claro	Seg	Eje	Registro	Serie	yo	τ	C.C.	H.N.	f (Hz)	ξ	ds
C2	S1	Z	Aceleración	Completa	1.0526	1.0526	-0.835	0.079	3.703	0.056	0.042
	S1			Porción	1.6154	1.331	-0.957	0.000	2.500	0.065	0.036
	S2			Porción	1.9497	1.5395	-0.985	0.000	2.703	0.024	0.009
	S3			Porción	2.5000	2.5132	-0.998	0.000	3.226	0.014	0.005
	S4			Completa	3.3484	1.0526	-0.989	0.001	3.077	0.055	0.016
	S5			Completa	3.2500	1.0526	-0.980	0.003	2.703	0.052	0.015
	S1	Z	Velocidad	Porción	0.0500	1.0526	-0.974	0.005	2.667	0.062	0.023
	S2			Completa	0.1174	2.0263	-0.925	0.000	3.030	0.105	0.071
	S3			Porción	0.1240	2.7057	-0.943	0.000	2.857	0.021	0.018
	S4			Porción	0.3355	1.5263	-0.980	0.000	3.030	0.046	0.017
	S4			Completa	0.2250	1.2895	-0.969	0.006	3.125	0.085	0.033
	S5			Completa	0.2189	1.0526	-0.951	0.013	2.703	0.087	0.036
	S5			Porción	0.1722	2.0000	-0.978	0.000	2.778	0.032	0.013
	S1			Y	Aceleración	Completa	1.6000	1.108	-0.993	0.001	2.703
S2	Porción	2.0048	1.581			-0.999	0.000	2.857	0.021	0.007	
C3	S1	Z	Aceleración	Completa	0.6339	1.5176	-0.942	0.000	3.226	0.041	0.031
	S2			Completa	0.4931	2.0263	-0.974	0.000	3.030	0.034	0.019
	S3			Completa	0.8165	2.134	-0.932	0.000	2.941	0.015	0.010
	S4			Completa	1.7235	1.6205	-0.992	0.000	3.333	0.026	0.009
	S5			Completa	1.1587	1.8947	-0.989	0.000	2.941	0.058	0.023
	S6			Completa	0.3000	1.2105	-0.963	0.001	3.175	0.017	0.008
	S1	Y	Aceleración	Completa	2.8217	1.2895	-0.963	0.002	2.857	0.016	0.006
	S2			Completa	2.5225	1.5263	-0.988	0.000	2.941	0.013	0.004
	S3			Completa	2.1861	1.0526	-0.998	0.000	2.857	0.038	0.013

seg: segmento, yo: umbral de amplitud, T: longitud de la serie, C.C.:coeficiente de correlación, H.N.: hipótesis nula, f: frecuencia fundamental, ξ : amortiguamiento y ds: desviación estándar.

5.4 Deflexiones

En la primera parte de esta sección, se presentan los resultados de las deflexiones estimadas experimentalmente, al centro del claro 2 y claro 3. En la segunda parte, se hace una comparación de los desplazamientos verticales obtenidos teórica y

experimentalmente y se estima el patrón de comportamiento de las deflexiones teóricas y experimentales.

5.4.1 Deflexiones experimentales

Siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.1.7.1, se determinaron las deflexiones generadas al cruce de vehículos pesados al centro del claro 2 y claro 3. Se trabajó con 56 segmentos de aceleración diferentes, en este trabajo se presentan como ejemplo, solo cuatro de ellos.

El primer ejemplo corresponde al segmento 3 generado al centro del claro 2, en la medición 1 del arreglo 1. En la figura 69 se muestra la serie de tiempo en aceleración, en desplazamiento y el espectro de desplazamiento para diferentes valores de amortiguamiento.

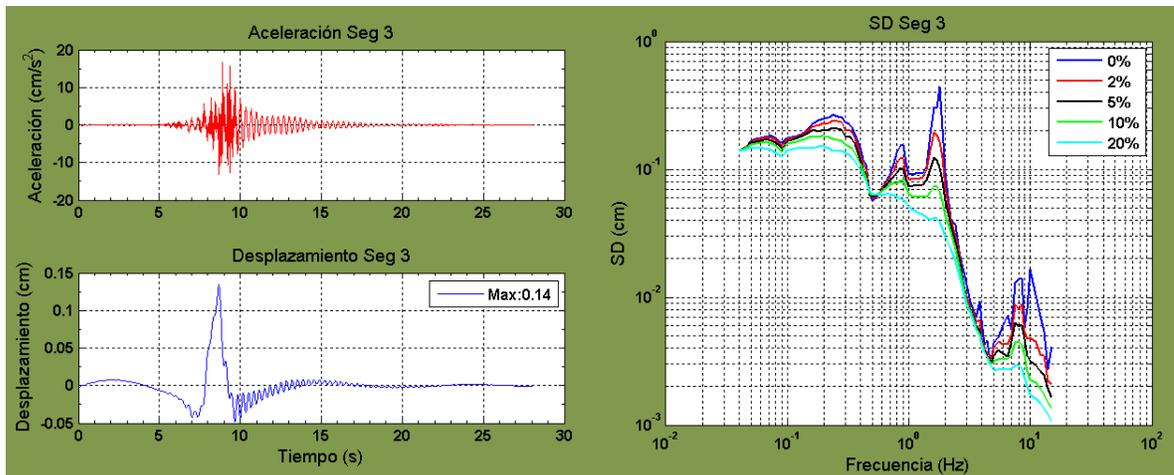


Figura 69. Serie de tiempo de aceleración, desplazamiento y espectro de desplazamiento de segmento 3 de arreglo 1, medición 1, claro 2. La primera columna corresponde al registro de aceleración (línea roja) y al registro de desplazamiento (línea azul). La segunda columna muestra el espectro de desplazamiento para valores de amortiguamiento de 0%, 2%, 5%, 10% y 20%.

El segundo ejemplo corresponde al segmento 6 obtenido al centro del claro 2, en la medición 1 del arreglo 1. En la figura 70 se presenta la serie de tiempo en aceleración, en desplazamiento y el espectro de desplazamiento para cinco valores de amortiguamiento.

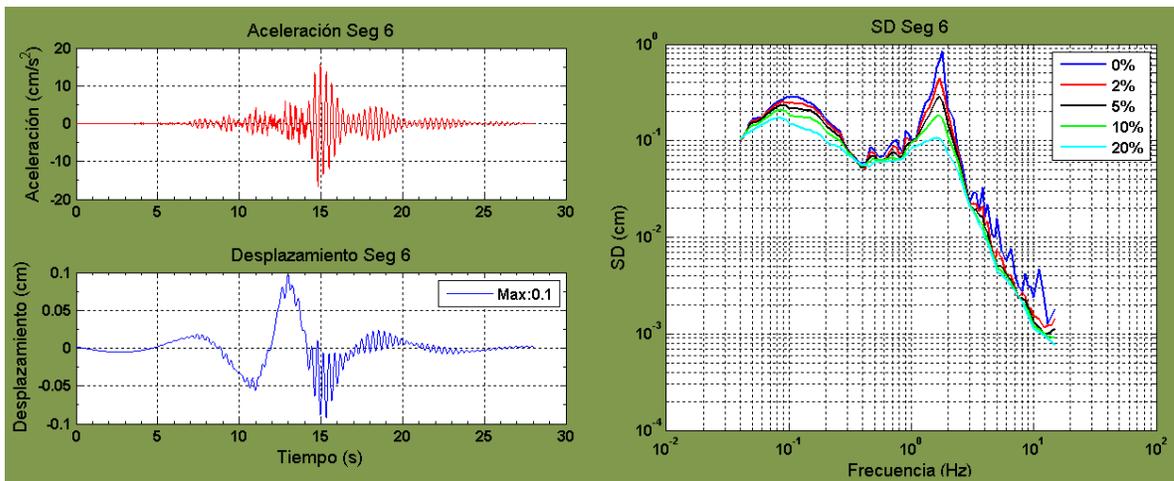


Figura 70. Serie de tiempo de aceleración, desplazamiento y espectro de desplazamiento de segmento 6 de arreglo 1, medición 1, claro 2. La primera columna corresponde al registro de aceleración (línea roja) y al registro de desplazamiento (línea azul). La segunda columna muestra el espectro de desplazamiento para valores de amortiguamiento de 0%, 2%, 5%, 10% y 20%.

El tercer ejemplo es del segmento 3 generado al centro del claro 3, en la medición 1 del arreglo 1. En la figura 71 se presenta la serie de tiempo en aceleración, en desplazamiento y el espectro de desplazamiento para diferentes valores de amortiguamiento.

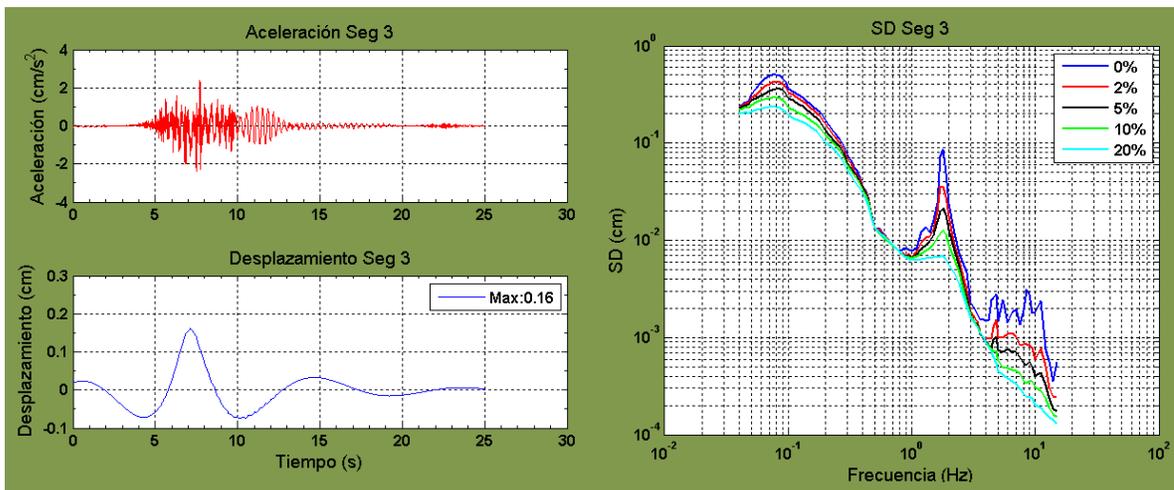


Figura 71. Serie de tiempo de aceleración, desplazamiento y espectro de desplazamiento de segmento 3 de arreglo 1, medición 1, claro 3. La primera columna corresponde al registro de aceleración (línea roja) y al registro de desplazamiento (línea azul). La segunda columna muestra el espectro de desplazamiento para valores de amortiguamiento de 0%, 2%, 5%, 10% y 20%.

El cuarto ejemplo es del segmento 9 generado al centro del claro 3, en la medición 1 del arreglo 1. En la figura 72 se muestra la serie de tiempo en aceleración, en desplazamiento y el espectro de desplazamiento para diferentes valores de amortiguamiento.

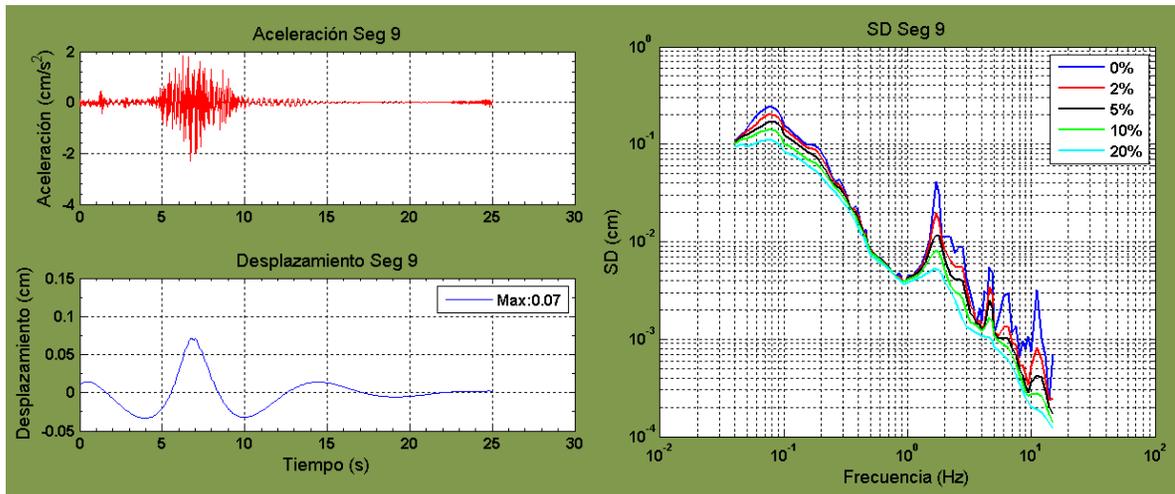


Figura 72. Serie de tiempo de aceleración, desplazamiento y espectro de desplazamiento de segmento 9 de arreglo 1, medición 1, claro 3. La primera columna corresponde al registro de aceleración (línea roja) y al registro de desplazamiento (línea azul). La segunda columna muestra el espectro de desplazamiento para valores de amortiguamiento de 0%, 2%, 5%, 10% y 20%.

En la figura 73 se muestran las deflexiones máximas estimadas por doble integración (color azul) y en el espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento (color rojo), para el claro 2 y claro 3. El peso indicado en el eje de las abscisas, corresponde al peso máximo de cada vehículo, según la norma NOM-012-SCT-2-2008.

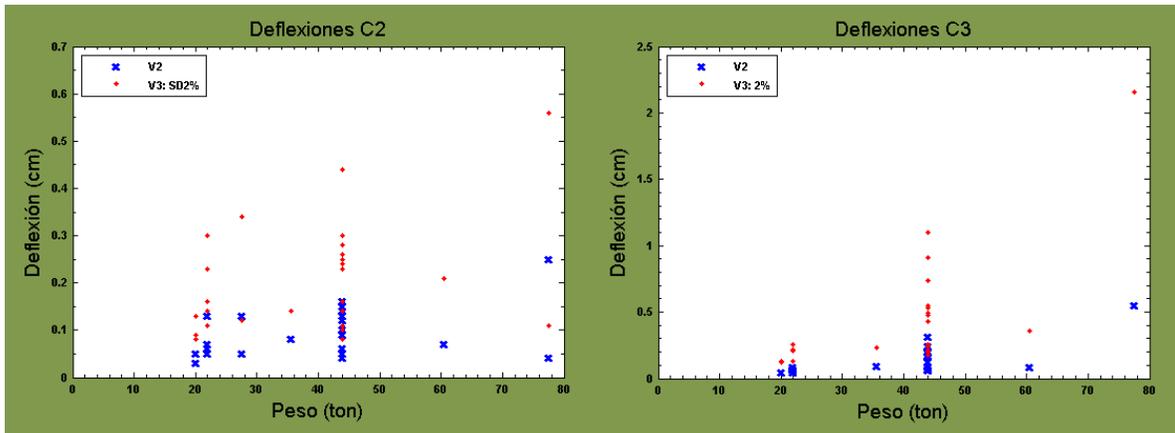


Figura 73. Deflexiones de claro 2 y claro 3. El color azul representa a las deflexiones máximas obtenidas por doble integración. El color rojo corresponde a las deflexiones máximas estimadas en el espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento.

En la tablas 23 y 24 se muestran las deflexiones estimadas para cada tipo de vehículo que transitó por el centro de los claros C2 y C3 respectivamente. Como información adicional, se anexan las deflexiones máximas generadas en los espectros de desplazamiento, para un amortiguamiento del 2%, tipo de vehículo y su peso máximo según la clasificación de la norma NOM-012-SCT-2-2008, el arreglo y medición correspondiente a cada segmento.

Tabla 23. Deflexiones generadas por vehículos que transitaron sobre claro 2

Segmento	Desp max (cm)	SD 2% max (cm)	Tipo camión	Peso máximo (ton)	Arreglo, medición/ Claro
1	0.05	0.09	H20-44	20	A12/C2
6	0.05	0.09	H20-44	20	A12/C2
1	0.05	0.13	H20-44	20	A13/C2
10	0.03	0.08	H20-44/H20-44	20	A13/C2
8	0.05	0.11	B2	22	A11/C2
2	0.06	0.14	B2	22	A12/C2
10	0.13	0.30	B2	22	A12/C2
13	0.07	0.16	B2	22	A12/C2
7	0.07	0.23	B2/H20-44	22	A13/C2
4	0.13	0.34	T2-S1	27.5	A11/C2
6	0.05	0.12	T2-S1	27.5	A13/C2
2	0.08	0.14	T2-S2	35.5	A11/C2
8	0.04	0.11	T3-S2	44	A13/C2
1	0.05	0.10	T3-S2	44	A11/C2
3	0.14	0.24	T3-S2	44	A11/C2
5	0.13	0.30	T3-S2	44	A11/C2
6	0.10	0.44	T3-S2	44	A11/C2
7	0.05	0.10	T3-S2	44	A11/C2
10	0.06	0.14	T3-S2	44	A11/C2
3	0.04	0.08	T3-S2	44	A12/C2
4	0.06	0.24	T3-S2	44	A12/C2
7	0.16	0.30	T3-S2	44	A12/C2
9	0.10	0.24	T3-S2	44	A12/C2
11	0.12	0.23	T3-S2	44	A12/C2
2	0.12	0.25	T3-S2	44	A13/C2
3	0.13	0.24	T3-S2	44	A13/C2
4	0.15	0.30	T3-S2	44	A13/C2
5	0.13	0.28	T3-S2	44	A13/C2
9	0.06	0.16	T3-S2/T3-S2	44	A11/C2
5	0.09	0.26	T3-S2/T3-S2	44	A12/C2
12	0.07	0.21	T3-S2-R2/T3-S2	60.5	A12/C2
9	0.04	0.11	T3-S2-R4/T3-S2	77.5	A13/C2
8	0.25	0.56	T3-S2/T3-S2-R4	77.5	A12/C2

Desp (max): desplazamiento máximo obtenido por doble integración (cm), SD2% (max): desplazamiento máximo obtenido en el espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento, Tipo de camión: según la NOM-012-SCT-2-2008.

Tabla 24. Deflexiones generadas por vehículos que transitaron sobre claro 3

Segmento	Desp (max)	SD 2% (max)	Tipo camión	Peso máximo (ton)	Arreglo/ Claro
1	0.04	0.13	H20-44	20	A12/C3
6	0.04	0.12	H20-44	20	A12/C3
7	0.07	0.21	B2	22	A11/C3
2	0.08	0.22	B2	22	A12/C3
10	0.06	0.26	B2	22	A12/C3
13	0.04	0.13	B2	22	A12/C3
2	0.09	0.23	T2-S2	35.5	A11/C3
1	0.08	0.21	T3-S2	44	A11/C3
3	0.16	0.43	T3-S2	44	A11/C3
5	0.31	1.10	T3-S2	44	A11/C3
6	0.07	0.21	T3-S2	44	A11/C3
8	0.12	0.49	T3-S2	44	A11/C3
9	0.07	0.20	T3-S2	44	A11/C3
10	0.09	0.26	T3-S2	44	A11/C3
3	0.07	0.18	T3-S2	44	A12/C3
4	0.06	0.24	T3-S2	44	A12/C3
7	0.19	0.53	T3-S2	44	A12/C3
9	0.20	0.55	T3-S2	44	A12/C3
11	0.17	0.48	T3-S2	44	A12/C3
4	0.24	0.91	T2-S1/T3-S2	44	A11/C3
5	0.20	0.74	T3-S2/T3-S2	44	A12/C3
12	0.08	0.36	T3-S2-R2/T3-S2	60.5	A12/C3
8	0.55	2.16	T3-S2/T3-S2-R4	77.5	A12/C3

Desp (max): desplazamiento máximo obtenido por doble integración (cm), SD2% (max): desplazamiento máximo obtenido en el espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento, Tipo de camión: según la NOM-012-SCT-2-2008.

5.4.2 Patrón de comportamiento de deflexiones

Con el fin estimar el patrón de comportamiento de deflexiones experimentales del claro 2 y 3, se promediaron los desplazamientos verticales generados por cada tipo de vehículo, se normalizaron los promedios con respecto al valor máximo y se hizo un ajuste con un polinomio de primer grado (figura 74).

Para realizar una comparación entre el comportamiento de las deflexiones experimentales y las obtenidas teóricamente (tablas 6, 23 y 24), también se normalizaron los desplazamientos verticales teóricos con respecto al valor máximo y se ajustó un polinomio de primer grado. En la figura 74 se presentan los resultados obtenidos para el claro 2 y claro 3 por separado, y en la figura 75 se muestran los resultados obtenidos para ambos claros.

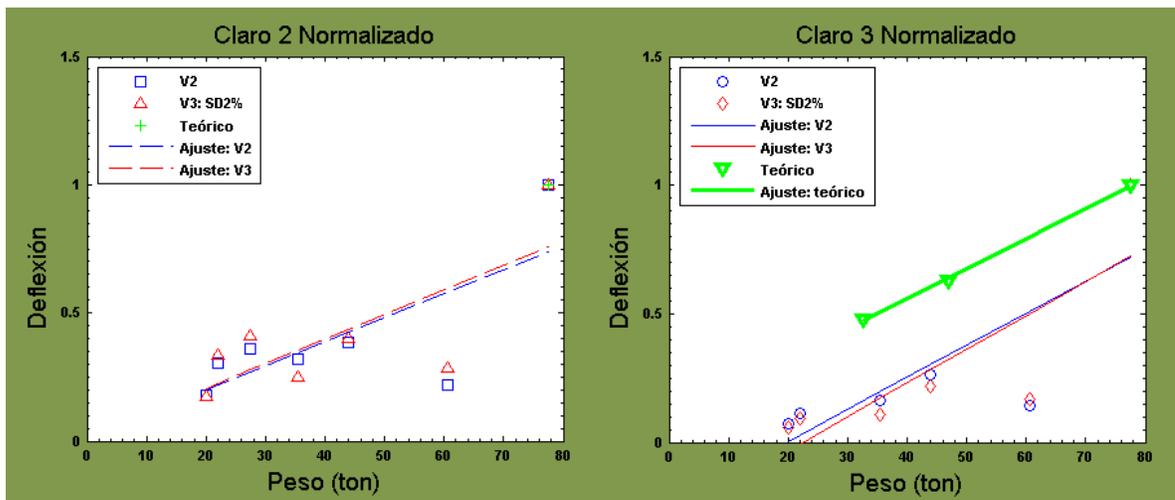


Figura 74. Promedio de deflexiones experimentales normalizadas y deflexiones teóricas normalizadas de claro 2 y claro 3. La primera columna muestra los resultados del claro 2: (i) cuadro azul: deflexiones generadas por doble integración, (ii) línea discontinua azul: ajuste lineal de deflexiones estimadas por doble integración, (iii) triángulo rojo: deflexiones obtenidas del espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento, (iv) línea discontinua roja: ajuste lineal de deflexiones del espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento, (v) cruz verde: deflexiones teóricas. La segunda columna muestra los resultados del claro 3: (i) círculo azul: deflexiones generadas por doble integración, (ii) línea continua azul: ajuste lineal de deflexiones estimadas por doble integración, (iii) rombo rojo: deflexiones obtenidas del espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento, (iv) línea continua roja: ajuste lineal de deflexiones del espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento, (v) triángulo invertido verde: deflexiones teóricas y (vi) línea continua verde: ajuste lineal de deflexiones teóricas.

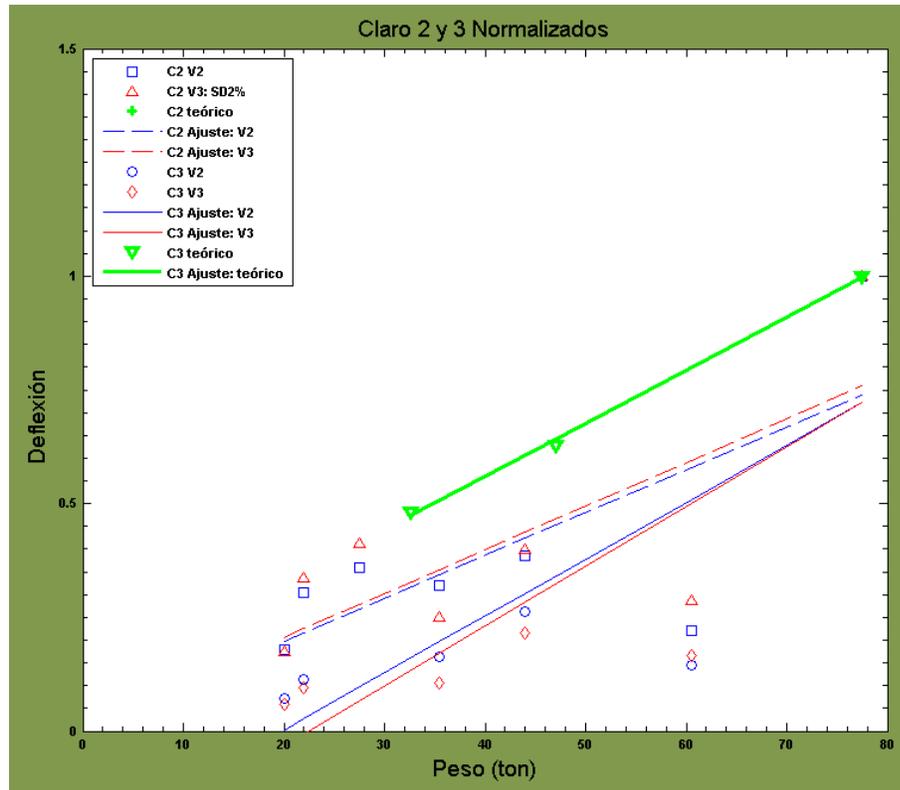


Figura 75. Promedio de deflexiones experimentales normalizadas y deflexiones teóricas normalizadas de claro 2 y claro 3. La simbología del claro 2 es la siguiente: (i) cuadro azul: deflexiones generadas por doble integración, (ii) línea discontinua azul: ajuste lineal de deflexiones estimadas por doble integración, (iii) triángulo rojo: deflexiones obtenidas del espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento, (iv) línea discontinua roja: ajuste lineal de deflexiones del espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento (v) cruz verde: deflexiones teóricas. La simbología del claro 3 es la siguiente: (i) círculo azul: deflexiones generadas por doble integración, (ii) línea continua azul: ajuste lineal de deflexiones estimadas por doble integración, (iii) rombo rojo: deflexiones obtenidas del espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento, (iv) línea continua roja: ajuste lineal de deflexiones del espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento, (v) triángulo invertido verde: deflexiones teóricas y (vi) línea continua verde: ajuste lineal de deflexiones teóricas.

5.5 Modelado numérico del puente Manantiales

En esta sección se presentan los resultados del modelado numérico del puente Manantiales realizado en el programa SAP2000. El modelo tridimensional de la estructura en estudio se muestra en la figura 76.

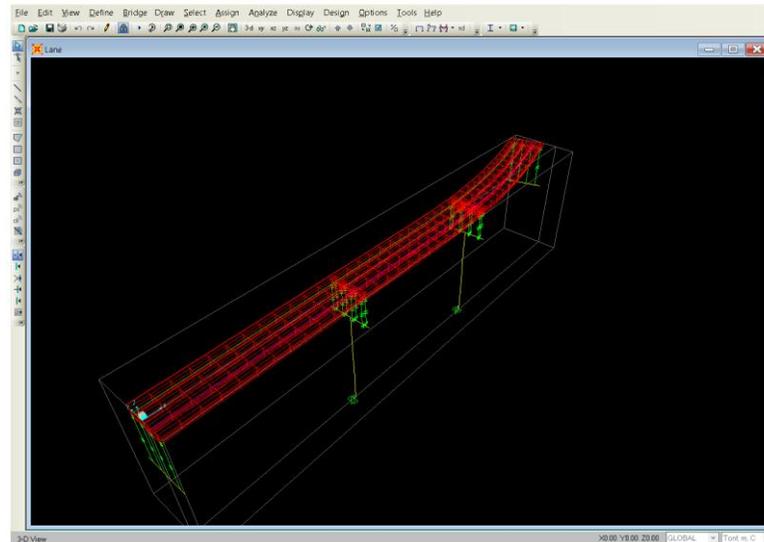


Figura 76. Modelo del puente Manantiales.

Mediante el comando “Display” y “Show deformed shape” se obtiene la representación la geometría deformada de la estructura, para cualquier caso de carga (muerta, móvil o modal). En las figuras 77, 78 y 79 se muestra de manera gráfica, la deformación de la estructura para los modos de vibración 1, 2 y 3 respectivamente.

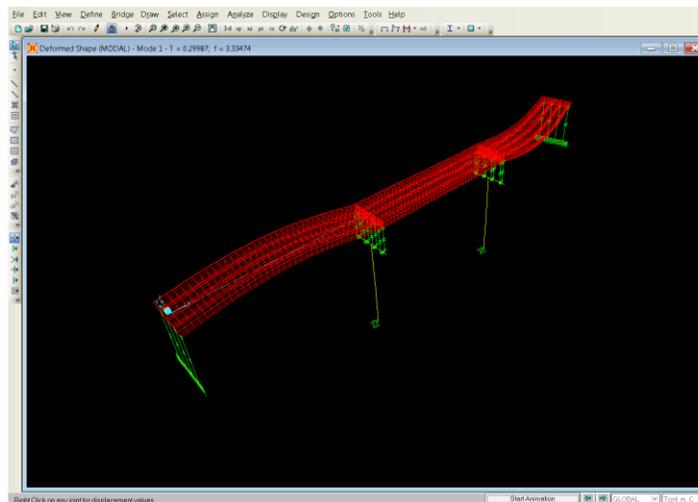


Figura 77. Primer modo de vibración.

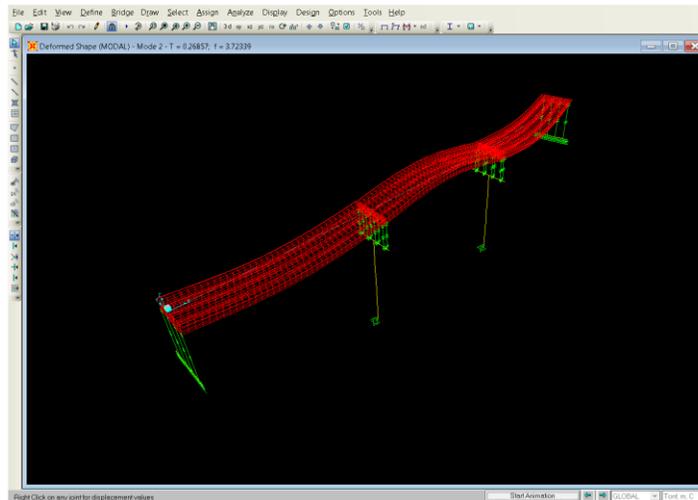


Figura 78. Segundo modo de vibración.

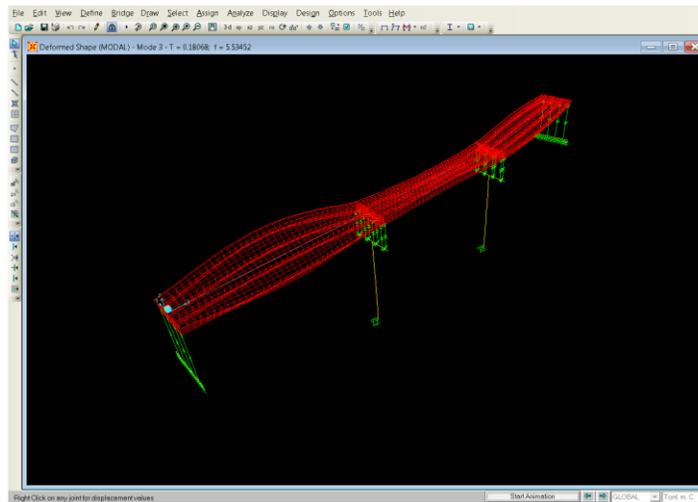


Figura 79. Tercer modo de vibración.

Se determinó una frecuencia de vibración (sin amortiguamiento) para el primer modo de 3.335Hz, 3.723Hz para el segundo modo y 5.535Hz en el tercer modo. La tabla 25 contiene el periodo, frecuencia y eigenvalor para cada uno de los primeros modos del puente.

Tabla 25. Periodos y frecuencias modales

Modo	Periodo (s)	Frecuencia (Hz)	Eigenvalor (rad^2/s^2)
1	0.300	3.335	439.02
2	0.269	3.723	547.31
3	0.181	5.535	1209.30

La deformación gráfica del puente Manantiales bajo carga móvil, se presenta en la figura 80. La deformación mostrada en la figura 80 está aumentada por un factor de 2000 y el punto indicado al centro del claro intermedio, presentó una deformación vertical de -0.0012m.

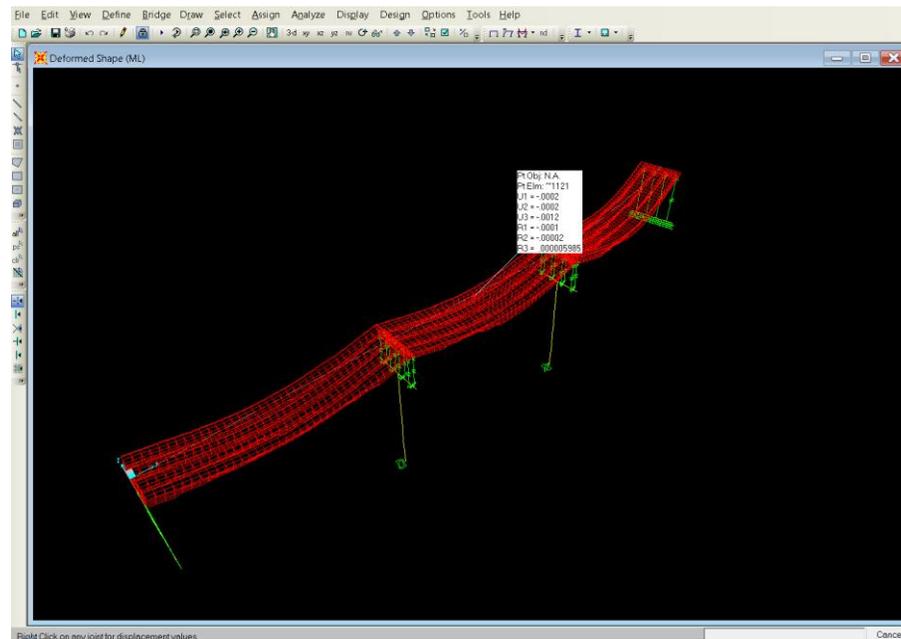


Figura 80. Deformación por carga móvil.

5.6 Modelado numérico del suelo

En esta sección se describen los resultados del modelado numérico del suelo que rodea el puente Manantiales. Se modelaron cuatro puntos del suelo, en lo que se realizaron las mediciones de vibración ambiental. A continuación se muestran los resultados para cada uno de los puntos analizados.

5.6.1 Punto 1

En el modelado del punto 1 se propusieron tres capas, la primera con un espesor de 8.00m, la segunda de 6.00m y la tercera de 5.00m, descansando sobre el semiespacio. En la figura 81 se muestra de manera gráfica las diferentes capas propuestas, las características de las primeras dos capas fueron extraídas del estudio de mecánica de suelos de la tabla 2 de sección 2.4.

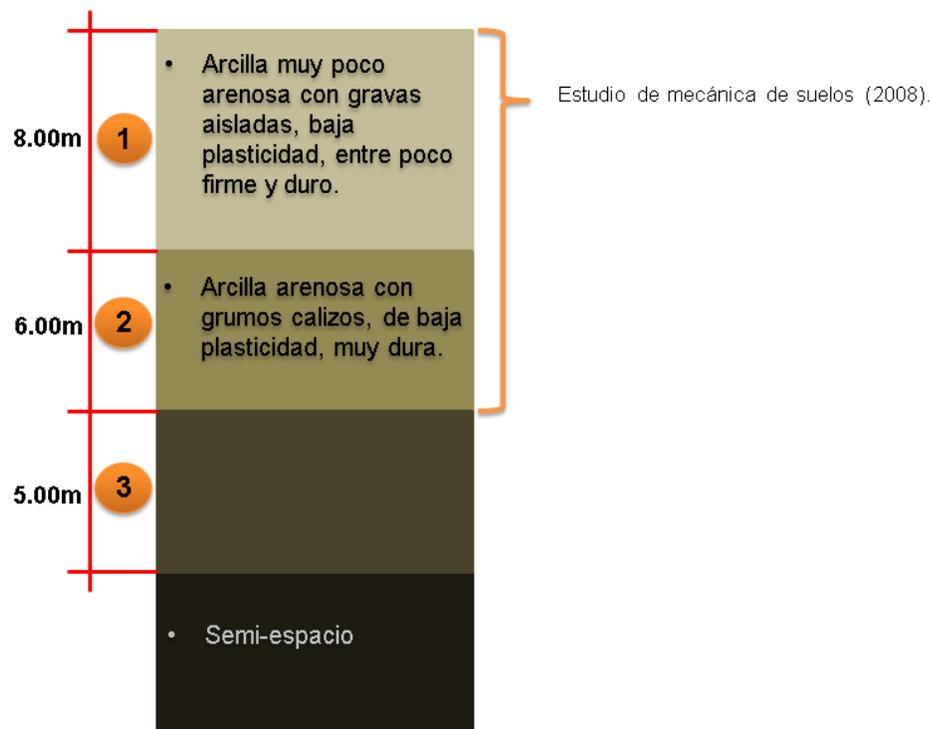


Figura 81. Capas del suelo propuestas para el punto 1.

La función de transferencia teórica generada se presenta en la figura 82. En el cociente SH/P se obtuvo una frecuencia fundamental de 8.76Hz y 8.90Hz en el cociente SV/P. En la tabla 26 se indican las características de cada una de las capas del suelo.

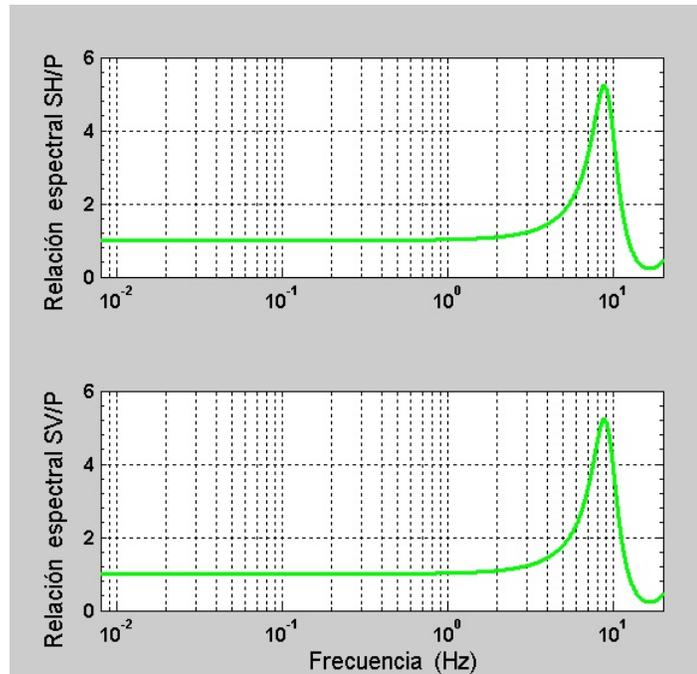


Figura 82. Funciones de transferencia teóricas del punto 1. El primer renglón corresponde al cociente SH/P y el segundo renglón al cociente SV/P.

Tabla 26. Modelo numérico del punto 1

Capa	Espesor (m)	Vs (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Relación de Poisson	Amortiguamiento (ξ)	Vs/Vp
1	8.00	347	1250	0.25	0.05	0.577
2	6.00	715	1350	0.3	0.04	0.535
3	5.00	810	1650	0.35	0.03	0.480
4	-	1100	2100	0.25	0.00	0.577

5.6.2 Punto 2

Se propusieron tres capas para el modelado del punto 2, la primera con un espesor de 6.80m, la segunda de 3.85m y la tercera de 6.00m, descansando sobre el semiespacio. La figura 83 se muestra de manera gráfica las tres capas propuestas, las características de las primeras dos capas fueron extraídas del estudio de mecánica de suelos de la tabla 2 de sección 2.4.

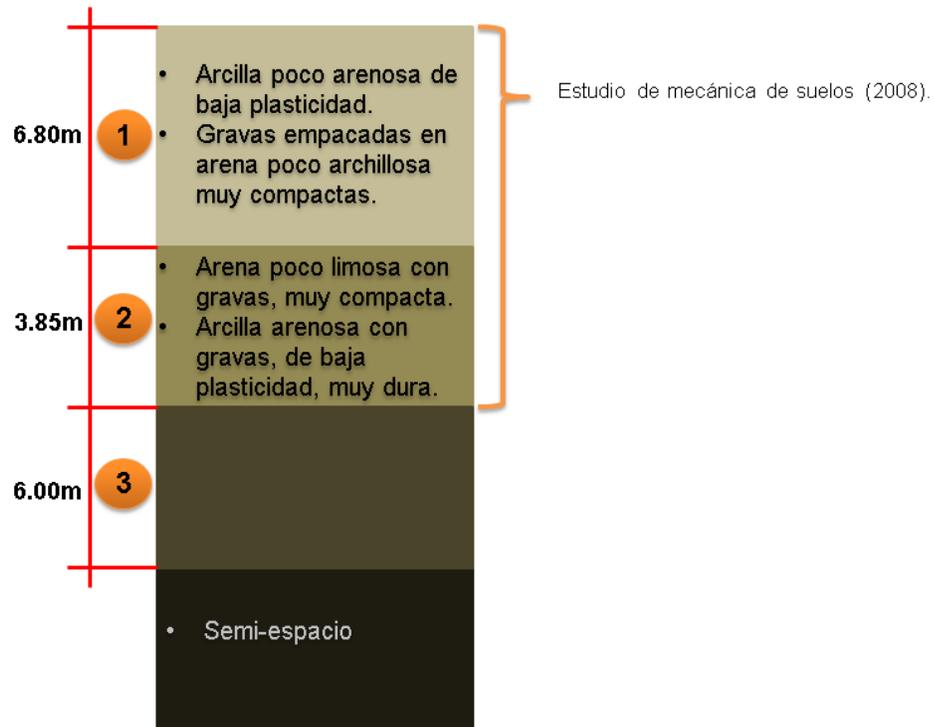


Figura 83. Capas del suelo propuestas para el punto 2.

La función de transferencia teórica se presenta en la figura 84. La frecuencia fundamental obtenida en el cociente SH/P fue de 6.82Hz y 6.76Hz en el cociente SV/P. En la tabla 27 se especifican las características de cada una de las capas propuestas para este punto.

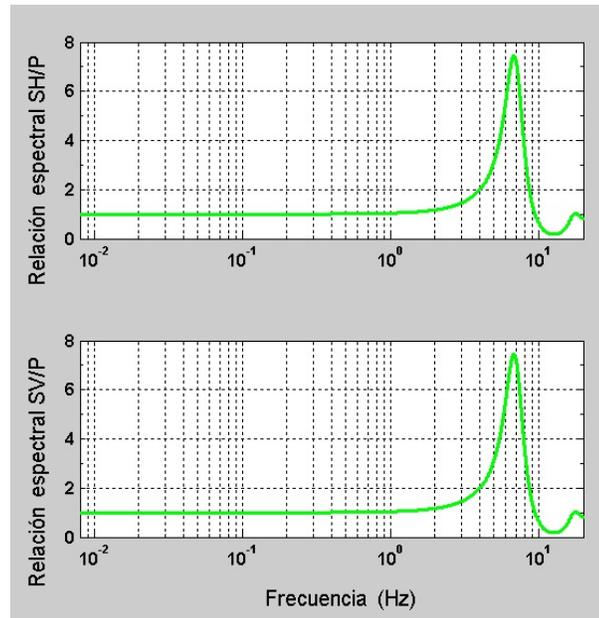


Figura 84. Funciones de transferencia teóricas del punto 2. El primer renglón corresponde al cociente SH/P y el segundo renglón al cociente SV/P.

Tabla 27. Modelo numérico del punto 2

Capa	Espesor (m)	Vs (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Relación de Poisson	Amortiguamiento (ξ)	Vs/Vp
1	6.80	284	1100	0.25	0.05	0.577
2	3.85	400	1200	0.30	0.04	0.535
3	6.00	550	1400	0.35	0.03	0.480
4	-	1000	2000	0.25	0.00	0.577

5.6.3 Punto 3

De manera similar al punto 2, en el modelado teórico del tercer punto se propusieron tres capas, la primera con un espesor de 6.80m, la segunda de 3.85m y la tercera de 6.00m, descansando sobre el semiespacio. La figura 85 se presenta de manera gráfica las diferentes capas propuestas, las características de las primeras dos capas fueron extraídas del estudio de mecánica de suelos de la tabla 2 de sección 2.4.

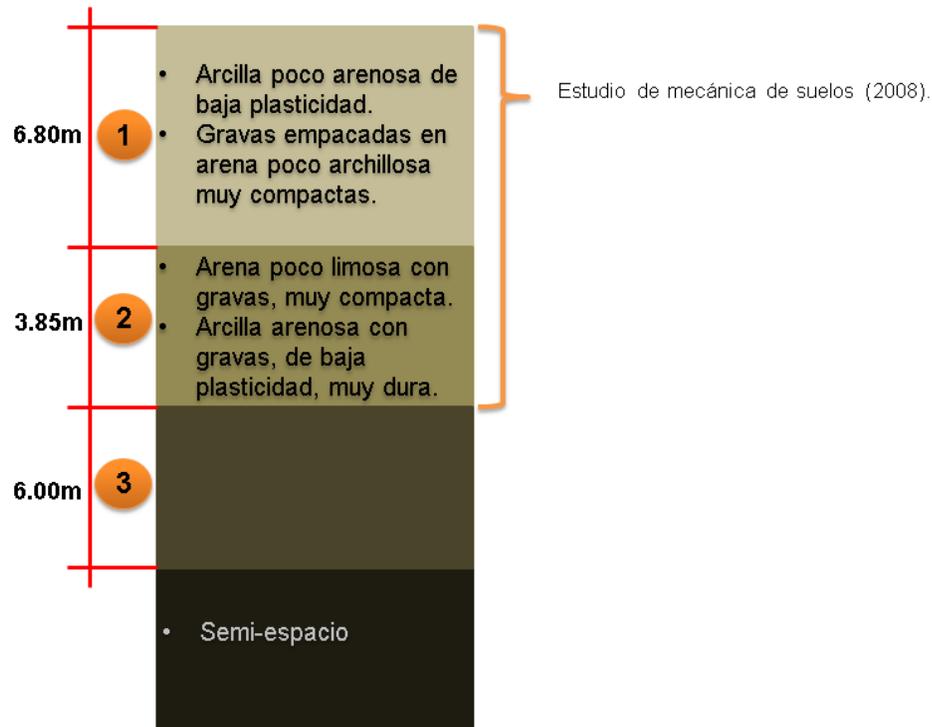


Figura 85. Capas del suelo propuestas para el punto 3.

La función de transferencia teórica se muestra en la figura 86. La frecuencia fundamental obtenida en el cociente SH/P y SV/P fue de 8.60Hz En la tabla 28 se especifican las características de cada una de las capas propuestas para este punto.

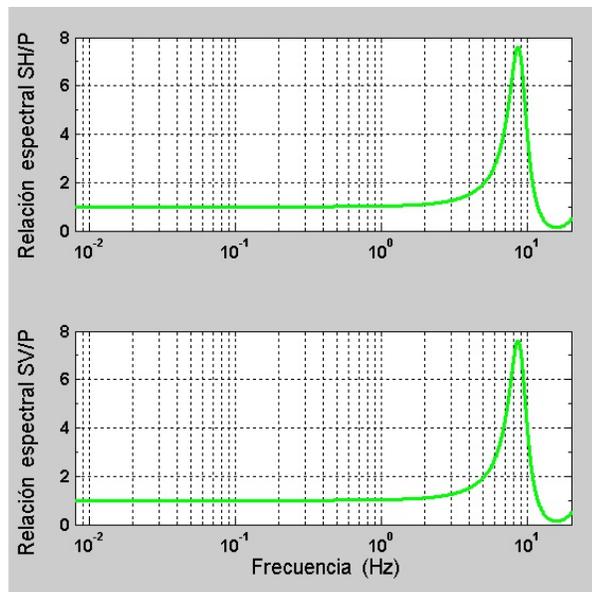


Figura 86. Funciones de transferencia teóricas del punto 3. El primer renglón corresponde al cociente SH/P y el segundo renglón al cociente SV/P.

Tabla 28. Modelo numérico del punto 3

Capa	Espesor (m)	Vs (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Relación de Poisson	Amortiguamiento (ξ)	Vs/Vp
1	6.80	285	1200	0.25	0.05	0.577
2	3.85	645	1300	0.30	0.04	0.535
3	6.00	800	1600	0.35	0.03	0.480
4	-	1100	2100	0.25	0.00	0.577

5.6.4 Punto 4

De manera similar al punto 1, se propusieron tres capas para el modelado del punto 4, la primera con un espesor de 8.00m, la segunda de 6.00m y la tercera de 5.00m, descansando sobre el semiespacio. La figura 87 se exhibe de manera gráfica las tres capas propuestas, las características de las primeras dos capas fueron extraídas del estudio de mecánica de suelos de la tabla 2 de sección 2.4.

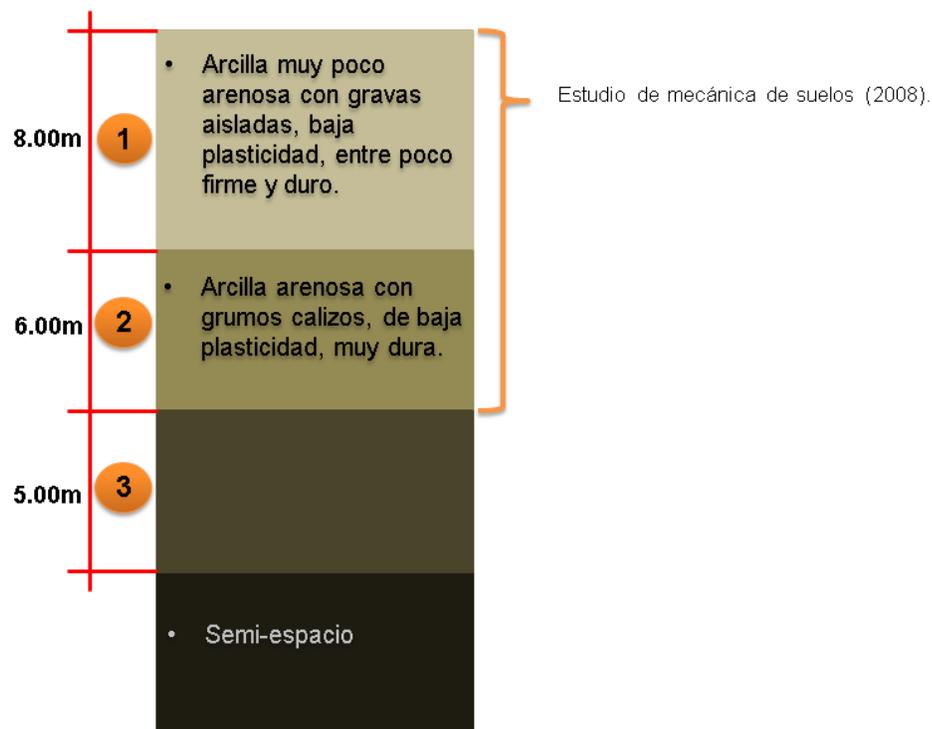


Figura 87. Capas del suelo propuestas para el punto 4.

La función de transferencia estimada teóricamente se muestra en la figura 88. La frecuencia fundamental obtenida en el cociente SH/P fue de 7.23Hz y 7.10Hz en el cociente SV/P. En la tabla 29 se describen las características de cada una de las capas propuestas en este punto.

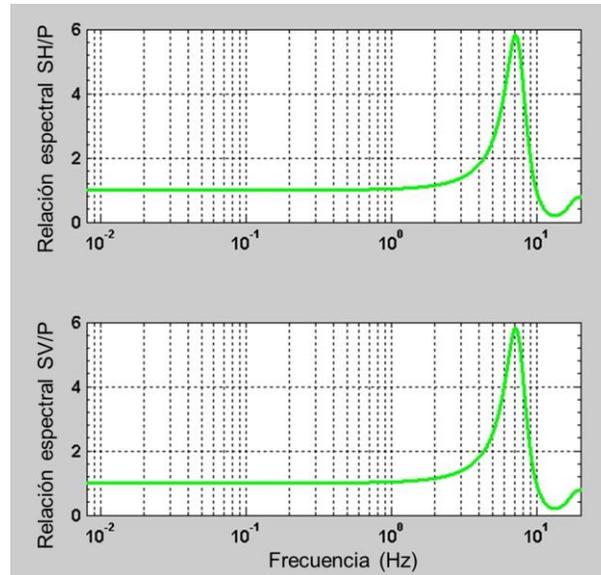


Figura 88. Funciones de transferencia teóricas del punto 4. El primer renglón corresponde al cociente SH/P y el segundo renglón al cociente SV/P.

Tabla 29. Modelo numérico del punto 4

Capa	Espesor (m)	Vs (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Relación de Poisson	Amortiguamiento (ξ)	Vs/Vp
1	8	300	1200	0.25	0.05	0.577
2	6	600	1300	0.30	0.04	0.535
3	5	700	1600	0.35	0.03	0.480
4	-	1000	2000	0.25	0.00	0.577

5.6.5 Resumen del modelado numérico del suelo

En la tabla 30 se resume el modelado numérico de los puntos registrados en campo libre, describe el número de capas, espesores, velocidades de ondas S, densidades,

relaciones de Poisson, amortiguamiento y la relación de velocidad de ondas S y ondas P.

Tabla 30. Modelo numérico del suelo

Punto	Capa	Espesor (m)	Vs (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Relación de Poisson	Amortiguamiento (ξ)	Vs/Vp
1	1	8.00	347	1250	0.25	0.05	0.577
	2	6.00	715	1350	0.3	0.04	0.535
	3	5.00	810	1650	0.35	0.03	0.480
	4	-	1100	2100	0.25	0.00	0.577
2	1	6.80	284	1100	0.25	0.05	0.577
	2	3.85	400	1200	0.30	0.04	0.535
	3	6.00	550	1400	0.35	0.03	0.480
	4	-	1000	2000	0.25	0.00	0.577
3	1	6.80	285	1200	0.25	0.05	0.577
	2	3.85	645	1300	0.30	0.04	0.535
	3	6.00	800	1600	0.35	0.03	0.480
	4	-	1100	2100	0.25	0.00	0.577
4	1	8	300	1200	0.25	0.05	0.577
	2	6	600	1300	0.30	0.04	0.535
	3	5	700	1600	0.35	0.03	0.480
	4	-	1000	2000	0.25	0.00	0.577

Vs: velocidad de ondas S y Vp: velocidad de ondas P.

Capítulo 6

Análisis e interpretación de resultados

En el presente capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos en el desarrollo de esta tesis y se hace una interpretación de ellos. Esta sección se divide en dos partes, en la primera se hace una comparación de los resultados obtenidos experimental y teóricamente del puente Manantiales, y en la segunda parte, se hace un análisis de los resultados teóricos y experimentales derivados del estudio realizado del terreno en la vecindad de la estructura en estudio.

6.1 Comparación de resultados teóricos y experimentales del puente

Los parámetros que se comparan en esta primera parte son la frecuencia fundamental, el amortiguamiento y las deflexiones. Como ya fue descrito en el capítulo anterior, la frecuencia fundamental fue obtenida de manera experimental mediante espectros de densidad de potencia, espectros de amplitud de Fourier (usando la media y la mediana), la técnica del decremento aleatorio y teóricamente mediante el uso del programa SAP2000, por lo que resulta importante comparar los resultados obtenidos con cada uno de estos métodos (ver sección 5.1.1). El amortiguamiento fue estimado mediante la técnica del decremento aleatorio en tres diferentes puntos del puente, en este caso se realiza una comparación entre los resultados obtenidos en cada punto (ver sección 6.1.1).

El patrón de comportamiento de las deflexiones generadas al centro de cada claro del puente fue estimado experimentalmente mediante doble integración numérica, esto con el uso del programa SMA y normalizando los resultados. Este comportamiento es comparado con el obtenido teóricamente (ver sección 1.1.2).

6.1.1 Frecuencia fundamental y amortiguamiento

Se estimó la frecuencia fundamental en cinco puntos de la estructura: al centro del C1, al centro del C2, al centro del C3, en la intersección del C1 y C2 y en la intersección del C2 y C3.

Promediando los valores estimados en los PSD y los espectros de Fourier (usando la media y la mediana), se estimó una frecuencia fundamental de 2.92Hz para el claro C1. La frecuencia fundamental determinada en el eje longitudinal fue de 2.97Hz mientras que en el eje transversal fue de 2.87Hz, por lo que se puede inferir que el eje longitudinal presenta ligeramente mayor rigidez que el eje transversal. En este punto no se aplicó la TDA ya que no se tuvieron registros de la componente vertical.

Para el centro del claro C2, mediante el promedio de los valores estimados en los PSD y los espectros de Fourier se estimó una frecuencia fundamental de 2.82Hz. En el eje transversal se obtuvo una frecuencia fundamental promedio de 2.74Hz, mientras que en el eje longitudinal y vertical fue de 2.87Hz, lo cual sugiere que el eje transversal presenta ligeramente menor rigidez que el longitudinal y vertical. El promedio de los valores obtenidos en la componente longitudinal y vertical mediante la TDA fue de 2.86Hz, mostrando gran similitud con el estimado en el dominio de la frecuencia, indicando consistencia en los resultados obtenidos en los diferentes métodos.

Promediando los valores obtenidos en los PSD y espectros de amplitud de Fourier para en claro C3 se estimó una frecuencia fundamental de 2.97Hz. En el eje longitudinal se estimó una frecuencia fundamental promedio de 2.79Hz, mientras que en la componente vertical fue de 3.13Hz, por lo que se puede inferir que el eje vertical presenta mayor rigidez que el eje longitudinal. El promedio de las frecuencias fundamentales estimadas con la TDA para este mismo punto fue de 3.00Hz, mostrando gran similitud con los resultados generados en el dominio de la frecuencia, observándose consistencia en los diferentes métodos usados.

En la intersección de los claros C1 y C2, el promedio de las frecuencias fundamentales obtenidas en los PSD y espectros de Fourier fue de 3.03Hz. La componente longitudinal presentó una frecuencia fundamental de 2.85Hz y la componente vertical de 3.21Hz. En este punto se infiere que el eje vertical presenta mayor rigidez que el eje longitudinal.

Para la intersección de los claros C2 y C3 se estimó el promedio de las frecuencias fundamentales obtenidas en los PSD y espectros de Fourier, el cual fue de 3.05Hz, mostrando similitud con el resultado generado en la intersección de los claros C1 y C2. En el eje transversal la frecuencia fundamental fue de 3.27Hz, 2.85Hz en el eje longitudinal, mientras que en el eje vertical fue de 3.02Hz. En este punto se puede inferir que el eje transversal presenta la mayor rigidez de las tres direcciones, mientras que el eje longitudinal presentó la menor de ellas.

En la sección 5.1.3 se menciona que las frecuencias fundamentales obtenidas en las componentes transversales del claro C3 fueron eliminadas de la base de datos, ya que los valores estimados fueron de aproximadamente 10Hz y podrían tener mayor relación con la frecuencia predominante del suelo que de la estructura.

En la tabla 31 se resumen los promedios de las frecuencias fundamentales obtenidas en los diferentes métodos usados y se incluye el amortiguamiento estimado para determinados puntos del puente.

Promediando los valores obtenidos en los diferentes puntos y cada una de sus componentes registradas, se estimó una frecuencia fundamental del puente Manantiales de 2.96Hz mediante los espectros de densidad de potencia, 2.94Hz usando la media de los espectros de amplitud de Fourier, 2.95Hz con la mediana de los espectros de Fourier y 2.93Hz aplicando la técnica del decremento aleatorio. En la parte teórica, utilizando el programa SAP2000 se estimó una frecuencia fundamental de 3.34Hz.

Tabla 31. Frecuencias naturales obtenidas por PSD, espectros de Fourier y TDA, y amortiguamiento

Ubicación	Eje	Análisis de Fourier					Técnica del Decremento Aleatorio		
		Frecuencia (Hz)				Frecuencia promedio (Hz)	Frecuencia (Hz)	Frecuencia promedio (Hz)	Amortiguamiento
		PSD	Espectros de Fourier		Frecuencia promedio (Hz)				
			Media	Mediana					
C1	X	2.881	2.884	2.829	2.865	2.917	No se aplicó la TDA		
	Y	3.010	2.887	3.009	2.969				
C2	X	2.722	2.774	2.725	2.740	2.823	No se aplicó la TDA		
	Y	2.885	2.860	2.859	2.865				
	Z	2.824	2.828	2.818	2.865		2.931	0.054	
C3	Y	2.771	2.793	2.796	2.786	2.969	2.885	2.997	0.022
	Z	3.174	3.092	3.190	3.152		3.108		0.032
Inter C1-C2	Y	2.856	2.863	2.844	2.854	3.030	No se aplicó la TDA		
	Z	3.210	3.217	3.192	3.206				
Inter C2-C3	X	3.259	3.241	3.302	3.267	3.046	No se aplicó la TDA		
	Y	2.856	2.838	2.850	2.848				
	Z	3.027	3.009	3.033	3.023				

En la parte experimental, los métodos usados tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo, presentan valores de la frecuencia fundamental muy similares, con esto se observa consistencia en los resultados obtenidos y la confiabilidad en los diferentes métodos (figura 89).

En la parte teórica, la frecuencia fundamental del puente fue mayor que la obtenida experimentalmente (figura 89), esto podría ser el resultado de las suposiciones que se hicieron en el modelado numérico del puente debido a la poca información que se tiene

de la construcción de la estructura, ya que no se cuenta con la memoria de cálculo ni de planos estructurales.

En la tabla 32 y figura 89 se presentan la comparación de los promedios de las frecuencias fundamentales estimadas en los diferentes métodos usados, tanto teórica como experimentalmente.

Tabla 32. Comparación frecuencia fundamental teórica y experimental

	Método	Frecuencia fundamental (Hz)
Experimental	PSD	2.956
	Espectros Fourier (media)	2.940
	Espectros Fourier (mediana)	2.954
	TDA	2.926
Teórica	SAP2000	3.335

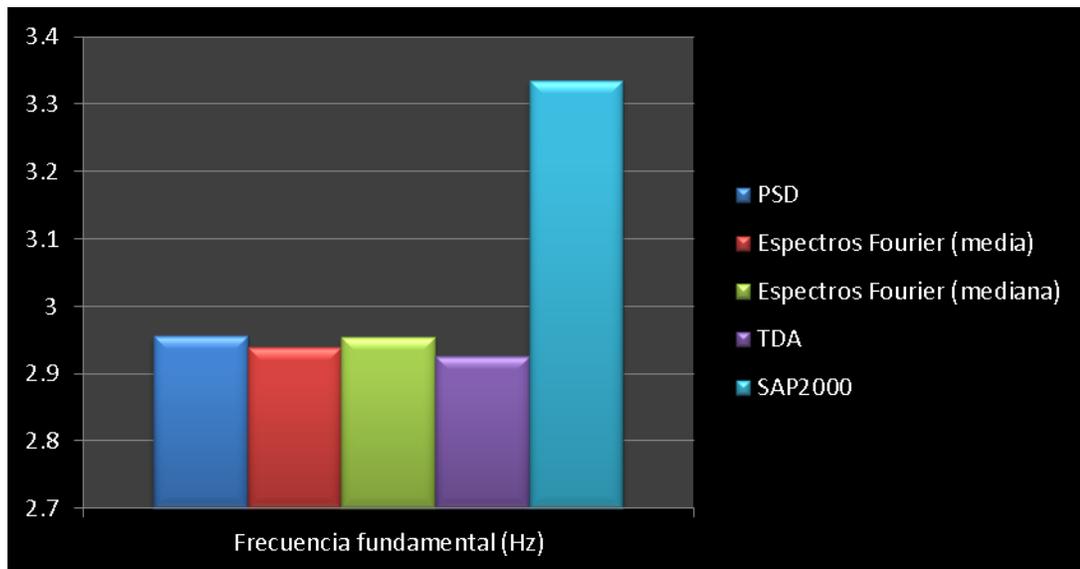


Figura 89. Comparación de frecuencias fundamentales estimadas en los diferentes métodos.

El amortiguamiento promedio estimado al centro del claro C2 fue del 5.1%, el promedio del eje longitudinal fue de 4.7% y 5.4% en el eje vertical. Al centro del claro C3, el amortiguamiento promedio fue del 2.7%, el promedio del eje longitudinal fue del 2.2% y 3.2% en el eje vertical. Con estos resultados se infiere que el centro del claro C2 tiene

mayor capacidad de disipar energía, al presentar un amortiguamiento mayor que el claro C3.

Esta diferencia en los valores de amortiguamiento puede estar relacionada con los resultados obtenidos en las frecuencias fundamentales de ambos claros, ya que en la tabla 30 se puede observar que el claro C3 presentó una frecuencia fundamental mayor que la del claro C2.

6.1.2 Deflexiones

La comparación del patrón de comportamiento de las deflexiones teóricas y deflexiones experimentales de los claros C2 y C3 se presenta en la figura 90.

Las líneas discontinuas representan los ajustes normalizados de las deflexiones experimentales obtenidas al centro del claro C2. La línea en color azul corresponde a las deflexiones estimadas por doble integración la cual presenta una pendiente de 0.0094, la línea roja representa las deflexiones obtenidas en el espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento y presenta una pendiente de 0.0096. El patrón de comportamiento en este caso muestra gran similitud, aunque el ajuste con la línea discontinua azul está ligeramente por debajo del ajuste en línea discontinua roja.

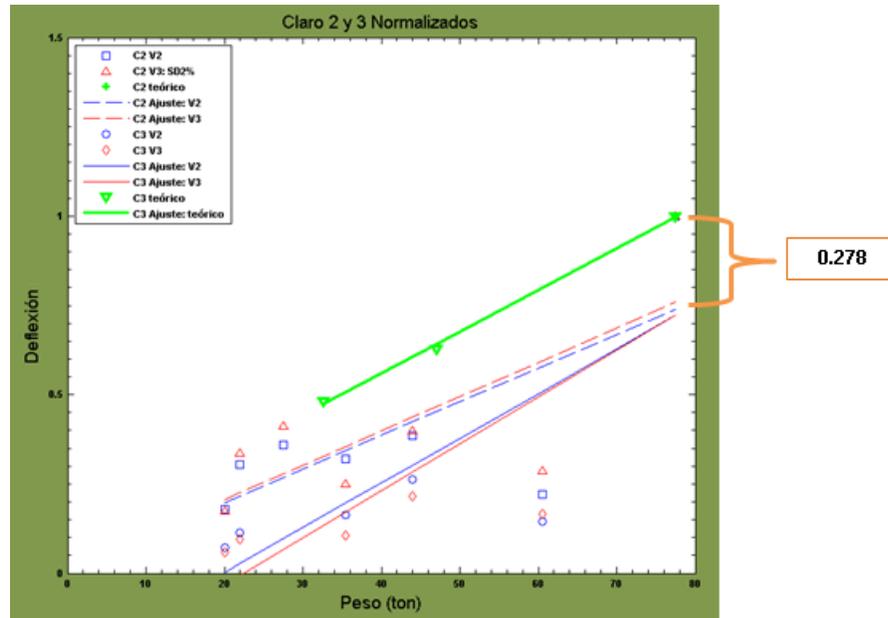


Figura 90. Promedio de deflexiones experimentales normalizadas y deflexiones teóricas normalizadas de claro 2 y claro 3. La simbología del claro 2 es la siguiente: (i) cuadro azul: deflexiones generadas por doble integración, (ii) línea discontinua azul: ajuste lineal de deflexiones estimadas por doble integración, (iii) triángulo rojo: deflexiones obtenidas del espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento, (iv) línea discontinua roja: ajuste lineal de deflexiones del espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento (v) cruz verde: deflexiones teóricas. La simbología del claro 3 es la siguiente: (i) círculo azul: deflexiones generadas por doble integración, (ii) línea continua azul: ajuste lineal de deflexiones estimadas por doble integración, (iii) rombo rojo: deflexiones obtenidas del espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento, (iv) línea continua roja: ajuste lineal de deflexiones del espectro de desplazamiento con el 2% de amortiguamiento, (v) triángulo invertido verde: deflexiones teóricas y (vi) línea continua verde: ajuste lineal de deflexiones teóricas.

Para el claro C3, los ajustes normalizados están mostrados en línea continua. El comportamiento de las deflexiones obtenidas por doble integración es representada por la línea de color azul, la cual tiene una pendiente de 0.0125, mientras que la línea de color rojo que representa a las deflexiones obtenidas en el espectro de desplazamiento del 2% de amortiguamiento tiene una pendiente de 0.0131. A diferencia del claro C2, el ajuste que representa la línea en color azul está ligeramente por arriba del ajuste en línea roja, y las pendientes de ambos comportamientos muestran gran similitud.

El patrón del comportamiento de las deflexiones teóricas para el claro C3, está representado con la línea continua verde y presenta una pendiente de 0.0117. Para el

claro C2 solo se tiene un dato, por lo que no fue posible realizar un ajuste para obtener el comportamiento de las deflexiones teóricas.

Una vez descrito lo anterior y haciendo referencia a la figura 90, se observa claramente que las pendientes de los ajustes para los claros C2 y C3, tanto en las deflexiones teóricas como experimentales tienen una pendiente similar, esto es, muestran un patrón de comportamiento semejante. Una diferencia que se observa es que, aunque las pendientes de los ajustes son similares, el comportamiento de las deflexiones experimentales de los claros C2 y C3, está aproximadamente 0.278 por debajo del ajuste de las deflexiones teóricas. Esto puede deberse principalmente a dos razones:

- 1) No fue posible tener el dato exacto o al menos aproximado del peso real de cada vehículo que se registró, por lo que se usó el peso máximo permitido que enuncia la NOM-012-SCT-2-2008. Los vehículos pudieron transitar mucho menor o mayor que el considerado en esta tesis.
- 2) Por seguridad del personal que acudió a realizar las mediciones de vibración ambiental y del equipo de medición, los sensores se colocaron al centro del eje transversal del carril contiguo al que pasaban los vehículos, por lo que las deflexiones estimadas fueron las que se registraron en el carril cerrado y no al centro del carril donde fluía el tráfico.

6.2 Modelado numérico del suelo

El modelo numérico de los cuatro puntos registrados en campo libre se dividió en tres capas descansando sobre el semiespacio. El estrato competente se ubicó a 14.00m de profundidad para el punto P1 y P4, y a 10.65m para los puntos P2 y P3, según los resultados obtenidos en el estudio de mecánica de suelos realizado en el año 2008 (ver tabla 2 de la sección 2.4).

El promedio de la frecuencia preferencial de vibración resultante de cocientes espectrales usando espectros de Fourier y espectros de densidad de potencia del punto

P1 fue de 8.39Hz. Para este punto, la frecuencia fundamental teórica promedio fue de 8.36Hz, con una velocidad de ondas de corte promedio de $V_s=624\text{m/s}$ y un amortiguamiento promedio de $\xi=0.037$.

Para el punto P2, el promedio de la frecuencia fundamental estimada mediante cocientes espectrales usando espectros de densidad de potencia y espectros de Fourier fue de 6.83Hz. En este punto, la frecuencia preferencial de vibración teórica promedio estimada fue de 6.79Hz, con una velocidad de ondas de corte promedio $V_s=411\text{m/s}$ y un amortiguamiento promedio de $\xi=0.037$.

El promedio de la frecuencia fundamental estimada mediante cocientes espectrales usando espectros de Fourier y espectros de densidad de potencia del punto P3 fue de 8.63Hz. La frecuencia fundamental teórica promedio para este mismo punto fue de 8.63Hz, con una velocidad de ondas de corte promedio de $V_s=577\text{m/s}$ y un amortiguamiento promedio de $\xi=0.037$.

Para el punto P4, el promedio de la frecuencia fundamental estimada mediante cocientes espectrales usando espectros de densidad de potencia y espectros de Fourier fue de 7.13Hz. En este punto, la frecuencia preferencial de vibración teórica promedio estimada fue de 7.16Hz, con una velocidad de ondas de corte promedio $V_s=533\text{m/s}$ y un amortiguamiento promedio de $\xi=0.037$.

Con lo descrito anteriormente, se observa que el punto P2 es el que presenta la menor frecuencia fundamental de los cuatro puntos analizados, mientras que el punto P3 presenta la mayor. La comparación de los valores teóricos y experimentales de las frecuencias fundamentales de cada punto muestra valores semejantes. Las velocidades de ondas de corte promedio oscilan entre valores de 411 y 624 m/s, y el punto P1 presentó la mayor de ellas.

En la tabla 33 se presenta un resumen de las características obtenidas en el modelado numérico de cada punto registrado en campo libre, y una comparación de las frecuencias preferenciales de vibración teóricas y experimentales.

Tabla 33. Modelo numérico del suelo y comparación de frecuencias fundamentales teóricas y experimentales

Punto	Capa	Espesor (m)	Vs (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Relación de Poisson	Amortiguamiento (ξ)	Vs/Vp	fo teórica promedio (Hz)	fo experimental promedio (Hz)
1	1	8.00	347	1250	0.25	0.05	0.577	8.365	8.394
	2	6.00	715	1350	0.30	0.04	0.535		
	3	5.00	810	1650	0.35	0.03	0.480		
	4	-	1100	2100	0.25	0.00	0.577		
2	1	6.80	284	1100	0.25	0.05	0.577	6.792	6.834
	2	3.85	400	1200	0.30	0.04	0.535		
	3	6.00	550	1400	0.35	0.03	0.480		
	4	-	1000	2000	0.25	0.00	0.577		
3	1	6.80	285	1200	0.25	0.05	0.577	8.633	8.634
	2	3.85	645	1300	0.30	0.04	0.535		
	3	6.00	800	1600	0.35	0.03	0.480		
	4	-	1100	2100	0.25	0.00	0.577		
4	1	8	300	1200	0.25	0.05	0.577	7.163	7.133
	2	6	600	1300	0.30	0.04	0.535		
	3	5	700	1600	0.35	0.03	0.480		
	4	-	1000	2000	0.25	0.00	0.577		

Vs: velocidad de ondas S, Vp: velocidad de ondas P y fo=frecuencia fundamental.

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

Este último capítulo se divide en dos partes, en la primera se presentan las conclusiones a las que se llegó en el desarrollo de esta tesis, y en la segunda se enuncia una serie de recomendaciones para complementar la información obtenida en el presente estudio.

7.1 Conclusiones

Las conclusiones más importantes que se encontraron en el desarrollo de esta tesis, se dividen en tres partes en relación a: (i) la estructura, (ii) el suelo que rodea el puente y (iii) los métodos utilizados, cada una de ellas se describen a continuación.

7.1.1 Estructura

Los parámetros estimados para caracterizar el comportamiento del puente Manantiales fueron la frecuencia fundamental, el amortiguamiento y el patrón de comportamiento de las deflexiones ante cargas vivas.

7.1.1.1 Frecuencia fundamental

Las frecuencias fundamentales promedio obtenidas de manera experimental al centro de los claros C1, C2, y C3 fueron: 2.92Hz, 2.84Hz y 2.99Hz respectivamente. El claro C2 muestra ligeramente un valor menor de su frecuencia fundamental en comparación con los otros dos claros, aunque este valor pudiera considerarse similar a los obtenidos en los claros C1 y C3, puede ser indicador de condiciones estructurales de menor rigidez con respecto a los estimados en los claros C1 y C3.

Como era de esperarse, en los apoyos de las pilas se estimó una frecuencia fundamental mayor a la encontrada en el centro de los tres claros. La frecuencia

fundamental estimada en la intersección de los claros C1 y C2 fue de 3.03Hz, mientras que en la intersección de los claros C2 y C3 fue de 3.05Hz.

El promedio general de la frecuencia fundamental del puente Manantiales estimada experimentalmente fue de 2.94Hz, mientras que la frecuencia del primer modo de vibración estimada teóricamente utilizando el programa SAP2000 fue de 3.34Hz. La frecuencia fundamental obtenida teóricamente fue mayor que la experimental (figura 89 de la sección 6.1.1), esto podría ser causado por las suposiciones que se hicieron en el modelado numérico de la estructura debido a la poca información que se tuvo de la construcción del puente.

7.1.1.2 Amortiguamiento

El amortiguamiento promedio estimado al centro del claro C2 fue de 5.1% y de 2.7% al centro del claro C3, lo cual indica que el claro C2 disipa mayor cantidad de energía que el claro C3. Este resultado es consistente con los valores de las frecuencias fundamentales estimadas en los claros C1, C2 y C3, siendo en el C2 donde se presenta la menor de ellas, infiriéndose que tenga una menor rigidez comparada con los claros contiguos.

7.1.1.3 Patrón de comportamiento de las deflexiones

Las deflexiones estimadas experimentalmente no coincidieron con las estimadas teóricamente, ya que en los cálculos de las estimaciones teóricas se obtienen los valores de las deflexiones máximas esperadas en los casos más desfavorables.

En la figura 90 de la sección 6.1.2 se observa que el ajuste de las deflexiones teóricas y las experimentales tienen una pendiente similar, esto es, muestran un patrón de comportamiento semejante. La diferencia más importante es que la recta obtenida al ajustar el comportamiento de las deflexiones experimentales de los claros C2 y C3, está aproximadamente 0.278 por debajo del ajuste de las deflexiones teóricas (figura 90). Lo

anterior se explica con lo enunciado en el primer párrafo de esta sección y con la contribución de las siguientes razones:

- 1) No fue posible tener el valor exacto del peso real de cada vehículo que se registró, por lo que se usó el peso máximo permitido que establece la NOM-012-SCT-2-2008. Los vehículos pudieron transitar con un peso mucho menor o mayor que el considerado.
- 2) Los sensores se colocaron al centro del eje transversal del carril contiguo al que transitaban los vehículos, por lo que las deflexiones estimadas fueron las que se registraron en el carril cerrado y no al centro del carril donde fluía el tráfico.

7.1.2 Suelo

De los cuatro puntos registrados en campo libre, el punto P3 fue el que presentó la mayor frecuencia fundamental obtenida experimentalmente con un valor de 8.63Hz. Por otra parte, en el punto P2 se estimó una frecuencia preferencial de vibración de 6.83Hz siendo ésta la menor de todas, de 7.13Hz en el punto P4 y de 8.39Hz en el punto P1.

El modelo numérico de los cuatro puntos se dividió en tres capas descansando sobre el semiespacio. Los valores teóricos y experimentales de las frecuencias fundamentales de cada punto muestran gran semejanza (tabla 33 de la sección 6.2). Las velocidades de ondas de corte promedio estimadas, oscilan entre valores de 411 y 624 m/s. El punto P1 presentó el valor mayor de velocidad de ondas de corte de 624m/s, el punto P2 de 411m/s siendo éste el menor, el punto P3 de 577m/s y el punto P4 de 533m/s. El amortiguamiento promedio se mantuvo constante en los cuatro puntos con un valor del 3.7%.

Se identificó que la frecuencia preferencial de vibración del puente y del terreno que lo rodea difieren por al menos un factor de dos, por lo que no se espera que se presente el fenómeno de resonancia.

7.1.3 Métodos utilizados

En el dominio de la frecuencia, los valores de las frecuencias fundamentales de la estructura mediante espectros de Fourier y espectros de densidad de potencia fueron similares. En el dominio del tiempo, con la aplicación de la técnica del decremento aleatorio se obtuvieron frecuencias fundamentales del puente semejantes a las obtenidas en el dominio de la frecuencia, mostrando con esto confiabilidad en los resultados obtenidos en los diferentes métodos (tabla 31 de la sección 6.1.1).

Un dato importante por mencionar de la técnica del decremento aleatorio es que, al aplicarse en las componentes transversales registradas al centro del puente, no se rescataron las frecuencias fundamentales. Los mejores resultados estimados se obtuvieron de las componentes verticales y longitudinales.

7.2 Recomendaciones

Debido a la importancia de una estructura como lo es el puente Manantiales, y a su ubicación dentro del contexto geológico y sísmico, se hacen las siguientes recomendaciones:

- i. Estudiar la respuesta no lineal del puente Manantiales, realizando una simulación de la ocurrencia de un movimiento fuerte con el uso del programa SAP2000 y analizar su comportamiento.
- ii. Realizar mediciones de vibración ambiental en la estructura periódicamente, para estudiar el comportamiento del puente y poder identificar cambios en las propiedades dinámicas de la estructura que resulten de la posible pérdida de rigidez de sus elementos estructurales.
- iii. Realizar mediciones de vibración ambiental teniendo control del peso real de los camiones pesados que pasen por el puente y comparar el patrón del comportamiento de las deflexiones obtenidas en el presente estudio.

- iv. Realizar un estudio sobre las propiedades dinámicas del cuerpo A del puente Manantiales y comparar los resultados con los estimados en el cuerpo B.
- v. Realizar el análisis de los registros de vibración ambiental con ondículas o wavelets y comparar los resultados con los estimados en esta tesis.

Referencias bibliográficas

Bañon Blazquez, Luis (2010). Clasificación de suelos. Recuperado 3 de agosto de 2012 de: http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010103.pdf

Bejarano Carrillo, A. (2006). Estudio de la Técnica del Decremento Aleatorio para la estimación in-situ de propiedades de suelos. (Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California). Recuperado de: <http://biblioteca.cicese.mx/catalogo/tesis/ficha.php?id=17322>

Caminos y Puentes Federales. (2009). Reporte de inspección visual. Archivo de circulación restringida.

Chang, C. (1975). Study of Dynamics Characteristics of Aeroelastic Systems Utilizing Randomdec Signatures. NASA CR-132563.

Chatelain J., Guillier, B., Duval, A., Bard, K. & The WP02 SESAME team. (2008). Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings. Bull Earthquake Eng. 6(1), 33-74. doi 10.1007/s10518-007-9040-7

Cole, H. (1973). On-line failure detection and damping measurements of aerospace structures by Random Decrement Signature. Nielsen Engineering & Research, Inc. Mountain View, California for Ames Research Center National Aeronautics and Space Administration: Nasa Contractor Report-2205.

Contreras Porras, R. (2010). Caracterización de suelos y respuesta del terreno en ambientes marinos y continentales. (Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California). Recuperado de: <http://biblioteca.cicese.mx/catalogo/tesis/ficha.php?id=18478>

Cruz, M. (2002). Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California. GEOS, 22(1), 37-42.

Cruz, M., Delgado, L. (2000). Los deslizamientos de la carretera de cuota Tijuana-Ensenada, Baja California. GEOS, 20(4), 418-432.

Dunand, F., Rodgers, J., Acosta, A., Salsman, M., & Bard, P. and Mehmet Celebi. (2004). Ambient Vibration and Earthquake Strong-Motion Data Sets for Selected USGS Extensively Instrumented Buildings. Open-File Report 1375, 31.

Espinoza Barreras, F. (2002). Determinación de características dinámicas de estructuras. (Tesis de doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya, España). Recuperado de: <http://www.tdx.cat/handle/10803/6221>

Fajardo, J. (2011). Apuntes de análisis de estructuras. Recuperado 3 de agosto de 2013 de:
<http://portales.puj.edu.co/wjfajardo/AN%C3%81LISIS%20DE%20ESTRUCTURAS%20/NOTAS%20AN%C3%81LISIS%20ESTRUCTURAS%20/ANALISIS%20ESTRUCTURAL%20PARTE%20III.pdf>

Fernández, A., Huerta, C., y Castro, R. (2009). El uso de la Técnica del Decremento Aleatorio (TDA) para determinar in-situ el amortiguamiento y la frecuencia natural de los suelos. GEOS, 29(1), 107.

García Reyes, L. (1988). Dinámica Estructural aplicada al diseño sísmico. Bogotá, Colombia, Universidad de los Andes.

Haddara M., Wishahy, M., & Wu, X. (1994). Assessment of ship's transverse stability at sea. Ocean Engineering, 21(8), 781-800.

Hoon Song (2010). Respuesta dinámica de una estructura y caracterización del terreno ante cargas sísmicas, caso de estudio: puente La Misión, B. C., México. (Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California). 102 pp. Recuperado de:
<http://biblioteca.cicese.mx/catalogo/tesis/ficha.php?id=18474>

Huerta López, C. (2002). Determination of soil properties from earthquakes data. (Tesis de doctorado, University of Texas, Austin). Recuperado de:
<http://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/11064>

Huerta, C., Lomelí, D., Esparza, M., Espinoza, F., Contreras, R., y Baltazar, Y. (2007). Frecuencias de vibraciones teóricas y experimentales de un edificio de nueve niveles localizado en la vecindad de la Zona Rio de Tijuana, B. C. México (2007). Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. 9(1-2), 97.

Kausel E., Roësset J. (1981). Stiffness matrices for layered soils. Bull. Seism. Soc. Am., 71(6), 1743-1761.

Kinematics Inc., 2005. User guide, EpiSensor Force Balance Accelerometer. Recuperada 6 de agosto de 2013 de:
<http://nees.org/data/get/facility/sensorModels/174/Documentation/EpiEST.pdf>

Kohler, M., Davis, P., & Safak, E. (2005). Earthquake and Ambient Vibration Monitoring of the Steel-Frame UCLA Factor Building. *Earthquake Spectra*, 21(3), 715-736.

Ley de Edificaciones del estado de Baja California. (1994). Recuperado 16 de Agosto de: <http://docs.mexico.justia.com/estatales/baja-california/ley-de-edificaciones-del-estado-de-baja-california.pdf>

Mikael, A., Gueguen, P., Bard, P., Roux, P., & Langlais, M. (2013). The Analysis of Long-Term Frequency and Damping Wandering in buildings using the random decrement technique. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(1), 236–246. doi: 10.1785/0120120048

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 30(1), 25-33.

Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008. Recuperado 16 de Agosto de: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/_migrated/content_uploads/48_NOM-003-SCT-2008.pdf

Ortiz, O., Patrón A., Reyes, E., Robles, V., Ruiz, M., & Cremona, C. (2012). Evaluación de la capacidad de carga del puente Antonio Dovalí Jaime, mediante el uso de pruebas de carga estáticas y dinámicas. *Concreto y cement*, 2(1), 31-43.

Press, H., Teukolsky, S., Vetterling, W., & Flannery, B. (1986). *Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press. 818 p.

QUID, S. A. de C. V. (2008). Estudio de mecánica de suelos del puente Manantiales. Archivo de circulación restringida.

Red Sismológica del Noroeste de México. Catálogo de sismos. Recuperado 3 de agosto de 2013 de: <http://resnom.cicese.mx/indexx.php?idCatPadre=6&op=9>

Sánchez, A., Gómez, R., Rodríguez, G., Mendoza, M., Escobar, J., Blanco, J., Huerta, C., y Mendoza, R. (2005). Pruebas experimentales en el distribuidor vial de San Antonio. *Construcción y Tecnología*, 202, 30-43.

SAP2000. (1998). *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*. Computers and structures, Inc.

SESAME. (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibration: measurements processing and interpretation. Recuperada 6 de agosto de 2013 de: <ftp://ftp.geo.uib.no/pub/seismo/SOFTWARE/SESAME/USER-GUIDELINES/SESAME-HV-User-Guidelines.pdf>

Shakal, A., Ragsdale J. (1984). Acceleration, Velocity and Displacement Noise Analysis for the CSMIP Accelerogram Digitization System. Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, 2, 111–118.

Tapia Herrera, R. (2009). Estudio comparativo de los métodos SASW, SPAC y HV-SPR para la estimación in-situ de propiedades del terreno. (Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada). Recuperado de: <http://biblioteca.cicese.mx/catalogo/tesis/ficha.php?id=18292>

Torres MonTes de Oca, C. (2009). Pruebas de vibración ambiental para determinar las propiedades dinámicas de un edificio de 23 niveles y los efectos interacción suelo-estructura. (Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, D. F). Recuperada 6 de agosto de 2013 de: <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/5764/CARLOS%20ALBERTO%20TORRES%20MONTES%20DE%20OCA.pdf?sequence=1>

Trifunac, M., Lee, V. (1973). Routine computer processing of strong-motion accelerograms. California Institute of Technology. Report EERL 73-03.

Wilson, E., Tetsuji, I. (1983). An eigensolution strategy for large systems. Computers & Structures, 16 (1-4), 259–265.

Apéndice A. Clasificación de suelos SUCS

La clasificación de suelos del Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS), se vale de símbolos de grupo, consistentes en un prefijo que designa la composición del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades. En la siguiente tabla se presentan dichos símbolos y su significación:

Tabla A1. Símbolos de grupo (SUCS) (Bañon, 2010)

Tipo de suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien graduado	W
Arena	S	Pobrementemente graduado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido alto (>50)	L
Turba	Pt	Límite líquido bajo (<50)	H

En función de estos símbolos, pueden establecerse diferentes combinaciones que definen uno y otro tipo de suelo:

Tabla A2. Tipología de suelos (SUCS) (Bañon, 2010)

Símbolo	Características generales		
GW	Gravas (>50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos<5%)	Bien graduadas
GP			Pobrementemente graduadas
GM		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
GC			Componente arcilloso
SW	Arenas (<50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos<5%)	Bien graduadas
SP			Pobrementemente graduadas
SM		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
SC			Componente arcilloso
ML	Limos	Baja plasticidad (LL<50)	
MH		Alta plasticidad (LL>50)	
CL	Arcillas	Baja plasticidad (LL<50)	
CH		Alta plasticidad (LL>50)	
OL	Suelos orgánicos	Baja plasticidad (LL<50)	
OH		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	Turba	Suelos altamente orgánicos	

Apéndice B. Recomendaciones de SESAME para la duración de registros

Tabla B1. Duración recomendada de registros (SESAME, 2004)

fo (Hz) mínima esperada	Duración mínima de registros (min)
0.2	30
0.5	20
1	10
2	5
5	3
10	2

Apéndice C. Figuras de la interfaz del programa TDA

The screenshot shows a dialog box titled "TECNICA DEL DECREMENTO ALEATO...". It contains several input fields with labels and red arrows pointing to them:

- Número de valores de amplitud → TECLEA EL VALOR DE INTYS (value: 0.1)
- Número de valores de longitud de segmento → TECLEA EL VALOR DE INTTAU (value: 5)
- Valor mínimo de longitud de segmento → TECLEA EL VALOR DE FACT LENGTH (value: 1)
- Valor mínimo de longitud de segmento → TECLEA EL VALOR DE FACT PEAK (value: .01)
- TECLEA EL VALOR PARA DEJAR ENTRAR MAS / MENOS RIZOS (RIZO) (value: .0001)
- MODIFICAR EL UMBRAL? 1 = Huerta 4 = FACTORES(std) 3=FINITO (value: 4)
- Umbral de inicio → TECLEA EL UMBRAL DE INICIO (value: 0.3)
- Umbral final → TECLEA EL UMBRAL FINAL (value: 0.6)
- DESEAS MODIFICAR EL TAO? 1 = SI 2 = NO (value: 1)
- Valor máximo de longitud de segmento → TECLEA EL NUEVO VALOR DE TAUMX (value: 2)
- NUMERO DE DIVISIONES EN QUE SE DIVIDIRA EL NUEVO TAO (TAUMX) (value: 5)
- VER EVOLUCION DE FIRMAS EN CINE NO = 0 SI = 1 (value: 1)

Buttons for "OK" and "Cancel" are located at the bottom right of the dialog box.

Figura C1. Ejemplo de interfaz del programa TDA.

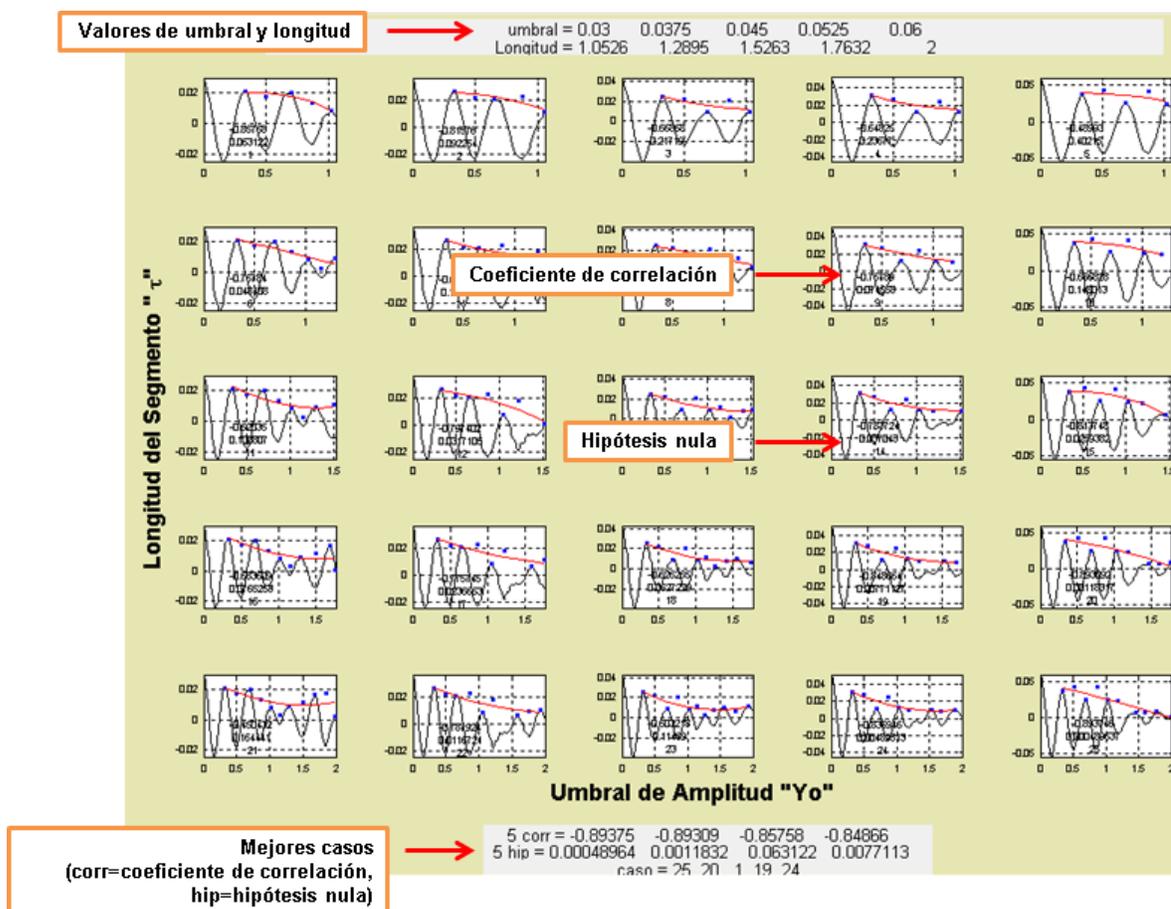


Figura C2. Ejemplo de matriz de gráficas de firmas del decremento aleatorio.

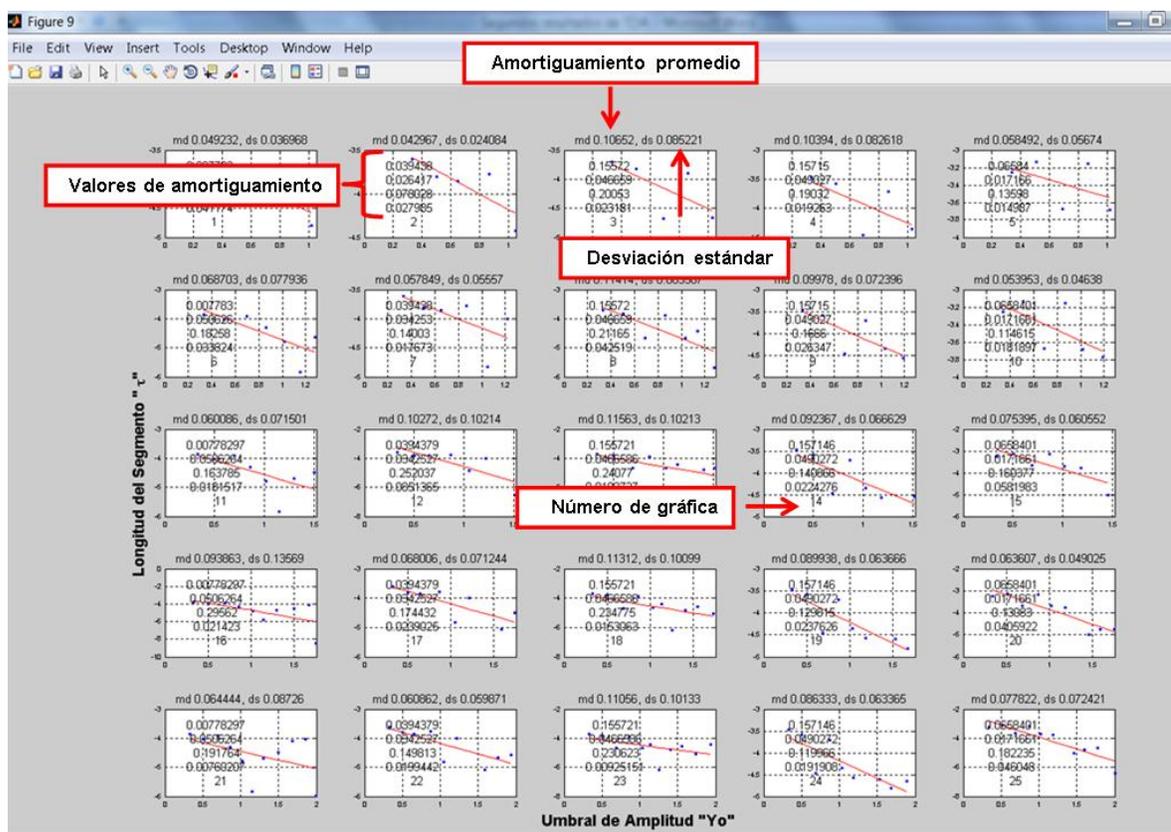


Figura C3. Ejemplo de matriz de gráficas de amortiguamientos obtenidos del decremento aleatorio.

Apéndice D. NOM-012-SCT-2-2008

En las siguientes tablas se presenta la clasificación de vehículos, atendiendo a su clase, nomenclatura, número de ejes y llantas, según la NOM-012-SCT-2-2008.

Tabla D1. Clasificación de autobuses

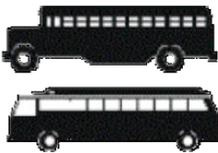
AUTOBUS (B)			
NOMENCLATURA	NUMERO DE EJES	NUMERO DE LLANTAS	CONFIGURACION DEL VEHICULO
B2	2	6	
B3	3	8 o 10	
B4	4	10	

Tabla D2. Clasificación de tractocamiones articulados

TRACTOCAMION ARTICULADO			
NOMENCLATURA	NUMERO DE EJES	NUMERO DE LLANTAS	CONFIGURACION DEL VEHICULO
T2-S1	3	10	
T2-S2	4	14	
T2-S3	5	18	
T3-S1	4	14	
T3-S2	5	18	
T3-S3	6	22	

Tabla D3. Clasificación de tractocamiones semirremolque-remolque (T-S-R)

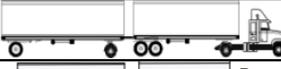
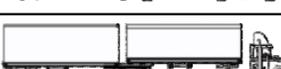
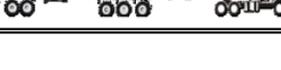
TRACTOCAMION SEMIRREMOLQUE-REMOLQUE (T-S-R)			
NOMENCLATURA	NUMERO DE EJES	NUMERO DE LLANTAS	CONFIGURACION DEL VEHICULO
T2-S1-R2	5	18	
T2-S2-R2	6	22	
T2-S1-R3	6	22	
T3-S1-R2	6	22	
T3-S1-R3	7	26	
T3-S2-R2(1)	7	26	
T3-S2-R3	8	30	
T3-S2-R4(1)	9	34	
T2-S2-S2	6	22	
T3-S2-S2	7	26	
T3-S3-S2	8	30	

Tabla D4. Peso bruto vehicular máximo autorizado por clase de vehículo y camino

VEHICULO O CONFIGURACION VEHICULAR	NUM. EJES	NUM. LLANTAS	PESO BRUTO VEHICULAR (t)			
			ET y A	B	C	D
B2	2	6	17,5	16,5	14,5	13,0
B3	3	8	21,5	19,0	17,0	16,0
B3	3	10	24,5	23,0	20,0	18,5
B4	4	10	27,0	25,0	22,5	21,0
C2	2	6	17,5	16,5	14,5	13,0
C3	3	8	21,5	19,0	17,0	16,0
C3	3	10	24,5	23,0	20,0	18,5
C2-R2	4	14	37,5	35,5	NA	NA
C3-R2	5	18	44,5	42,0	NA	NA
C3-R3	6	22	51,5	47,5	NA	NA
C2-R3	5	18	44,5	41,0	NA	NA
T2-S1	3	10	27,5	26,0	22,5	NA
T2-S2	4	14	34,5	31,5	28,0	NA
T3-S2	5	18	41,5	38,0	33,5	NA
T3-S3	6	22	48,0	45,5	40,0	NA
T2-S3	5	18	41,0	39,0	34,5	NA
T3-S1	4	14	34,5	32,5	28,0	NA
T2-S1-R2	5	18	47,5	45,0	NA	NA
T2-S1-R3	6	22	54,5	50,5	NA	NA
T2-S2-R2	6	22	54,5	50,5	NA	NA
T3-S1-R2	6	22	54,5	51,5	NA	NA
T3-S1-R3	7	26	60,5	57,5	NA	NA
T3-S2-R2	7	26	60,5	57,5	NA	NA
T3-S2-R4	9	34	66,5	66,0	NA	NA
T3-S2-R3	8	30	63,0	62,5	NA	NA
T3-S3-S2	8	30	60,0	60,0	NA	NA
T2-S2-S2	6	22	51,5	46,5	NA	NA
T3-S2-S2	7	26	58,5	53,0	NA	NA

NA- No Autorizado

Apéndice E. Análisis de eigenvectores en SAP2000

El análisis de eigenvectores determina las formas modales para vibración libre no amortiguada y frecuencias del sistema. Estos modos naturales proporcionan una visión excelente en el comportamiento de la estructura. El análisis de eigenvectores involucra la solución de la ecuación de eigenvalores generalizado dado por la siguiente ecuación:

$$([K] - \Omega^2 [M])\{\Phi\} = 0$$

donde:

K = es la matriz de rigidez

M = es la matriz diagonal de masa

Ω = es la matriz diagonal de eigenvalores

Φ = matriz de los correspondientes eigenvectores (formas modales)

Cada par de eigenvalor-eigenvector es llamado modo de vibración natural de la estructura. Los modos se identifican por los números del 1 al n, en el orden en que los modos son encontrados por el programa.

El eigenvalor es el cuadrado de la frecuencia circular, ω , para ese modo, (a menos de que se utilice un cambio de frecuencia). La frecuencia cíclica, f , y periodo, T , del modo se relaciona con ω por medio de las siguientes expresiones:

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{y} \quad f = \frac{\omega}{2\pi}$$

Se puede especificar el número de modos a ser encontrado, una tolerancia de la convergencia y el rango de frecuencia de interés. Estos parámetros se describen a continuación:

a) Numero de Modos

Se puede especificar el número de modos, n , a ser hallado. El programa busca los n modos de frecuencias bajas (periodos largos). Si un cambio de frecuencia diferente de cero ha sido especificado, el programa buscará los n modos más cercanos al cambio de frecuencia. El número de modos hallados está limitado por:

- El número de modos requerido para un adecuado análisis dinámico.
- El número de modos presentes en el rango de frecuencias especificado.
- El número de grados de masa de libertad en el modelo.

Un grado de masa de libertad es cualquier grado activo de libertad que posee masa traslacional o el momento de masa rotacional de inercia. La masa puede asignarse directamente a un nudo o puede venir de los elementos conectados.

b) Rango de frecuencia

Se puede especificar un rango de frecuencia restringido, en el que se buscarán los modos de vibración usando los parámetros:

- Shift: centro del rango de frecuencias cíclico, conocido como la frecuencia de cambio.
- Cut: radio del rango de frecuencia cíclico.

El programa buscare sólo los modos con las frecuencias que satisfacen la siguiente expresión:

$$|f - shift| \leq cut$$

El valor por defecto de cut = 0 no restringe el rango de frecuencia de los modos.

Los modos son hallados en el orden creciente de distancia de la frecuencia de cambio (shift). Esto continúa hasta alcanzar el número definido de modos o el número de grados de masa de libertad (cut).

Una estructura estable tendrá todas las frecuencias naturales positivas. Al realizar un análisis sísmico y otros análisis dinámicos, los modos de bajas frecuencia son normalmente de mayor interés. En esos casos es apropiado usar un shift igual a cero, resultando en modos de frecuencias bajas de la estructura calculada.

Si el programa detecta modos de frecuencias negativas, éste detendrá el análisis debido a que los resultados no tienen sentido.

c) Tolerancia de convergencia

El SAP2000 resuelve para el par de eigenvalor-eigenvector usando un algoritmo de iteración. Durante la fase de solución, el programa proporciona un eigenvalor aproximado después de cada iteración. Para mayores detalles del algoritmo, ver Wilson y Tetsuji (1983).

Se puede especificar la tolerancia de la convergencia relativa (tol) para controlar la solución. El valor por defecto es $tol=10^{-5}$, que es un valor aceptable para obtener buenos resultados y relativa rapidez en la solución del modelo. Se pueden establecer valores más pequeños de tol, para obtener mejores aproximaciones en los resultados del par de eigenvalor-eigenvector a costa de mayor tiempo de computo.

Apéndice F. Transformación de unidades de salida de la grabadora a unidades físicas

La figura F1 representa de manera esquemática el sistema de captura de datos, sensor, grabadora y el proceso de conversión de unidades.

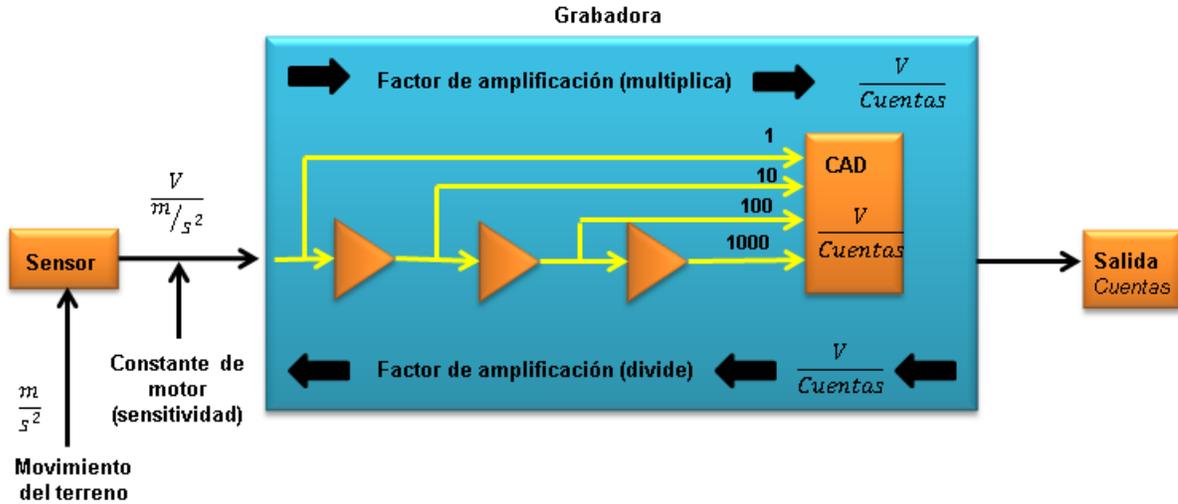


Figura F1. Representación esquemática del sistema de captura de datos, sensor, grabadora y el proceso de conversión de unidades.

$$\frac{\text{Volts/Cuentas}}{\text{Volts}/\left(\frac{m}{s^2}\right)} = \frac{\text{Volts}\left(\frac{m}{s^2}\right)}{\text{VoltsCuentas}} = \frac{m/s^2}{\text{Cuentas}}$$

Al multiplicar la expresión anterior por las cuentas de la grabadora, se obtienen las unidades físicas del terreno, en este caso en unidades de aceleración.

$$\frac{m/s^2}{\text{Cuentas}} \times \text{cuentas} = \frac{m}{s^2}$$

Ejemplo: obtención de unidades de aceleración considerando los siguientes parámetros.

- Parámetros de la grabadora: Ganancia=1
CAD de 16 bits
Salida del CAD = ±2.5 V

$$\frac{5}{2^{16}} = 7.6294 \times 10^{-5} \frac{V}{\text{Cuentas}}$$

- Parámetro del Sensor: Constante del motor $G=20V/g$

$$\frac{7.6254 \times 10^{-5}}{20} = 3.8147 \times 10^{-6} \frac{g(m/s^2)}{cuentas}$$

Apéndice G. Figuras del procedimiento realizado en el programa SMA

En las figuras G1, G2, G3 y G3 se muestra el procedimiento realizado en el programa SMA.

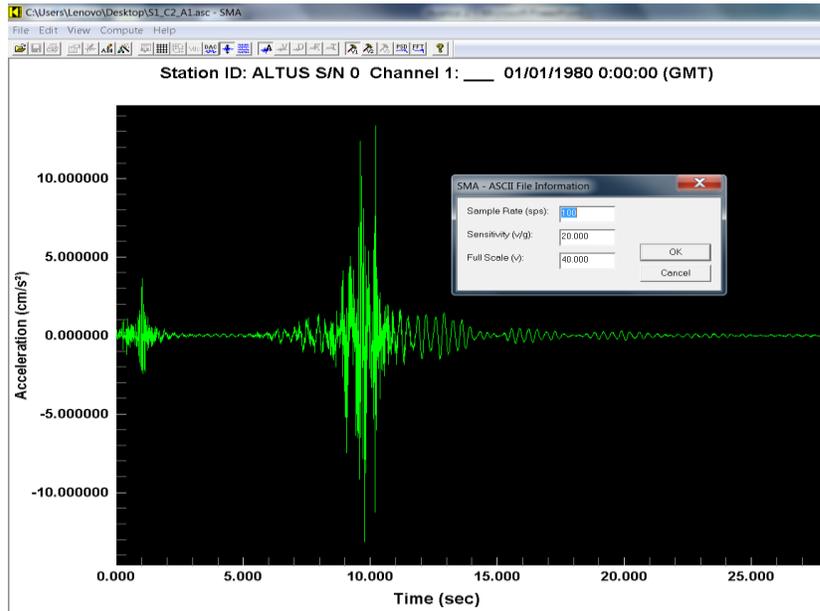


Figura G1. Paso (ii) del procedimiento realizado en el programa SMA.

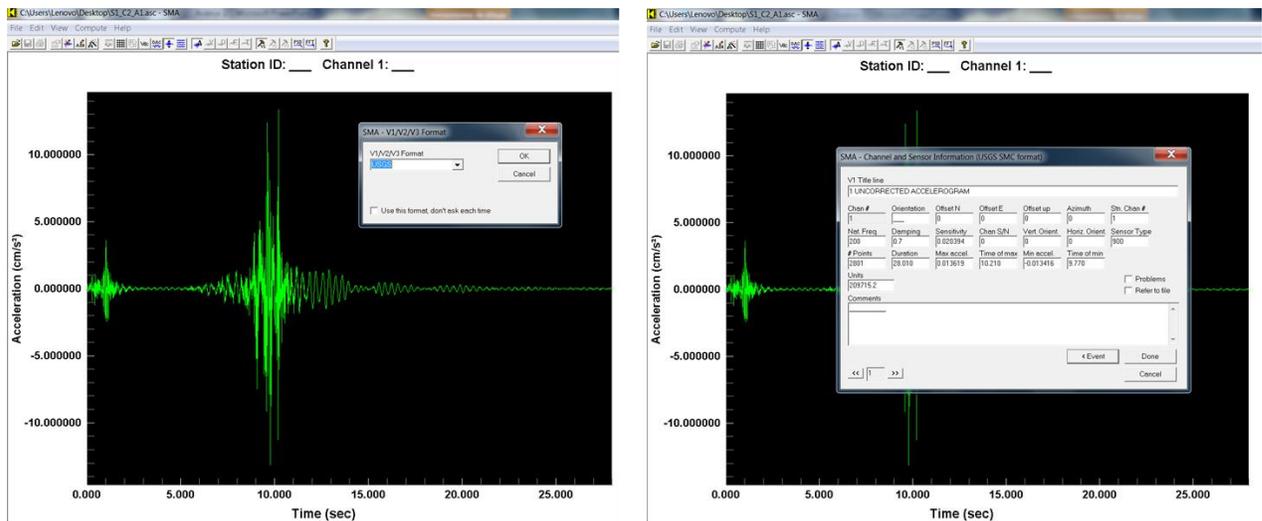


Figura G2. Paso (iii) del procedimiento realizado en el programa SMA.

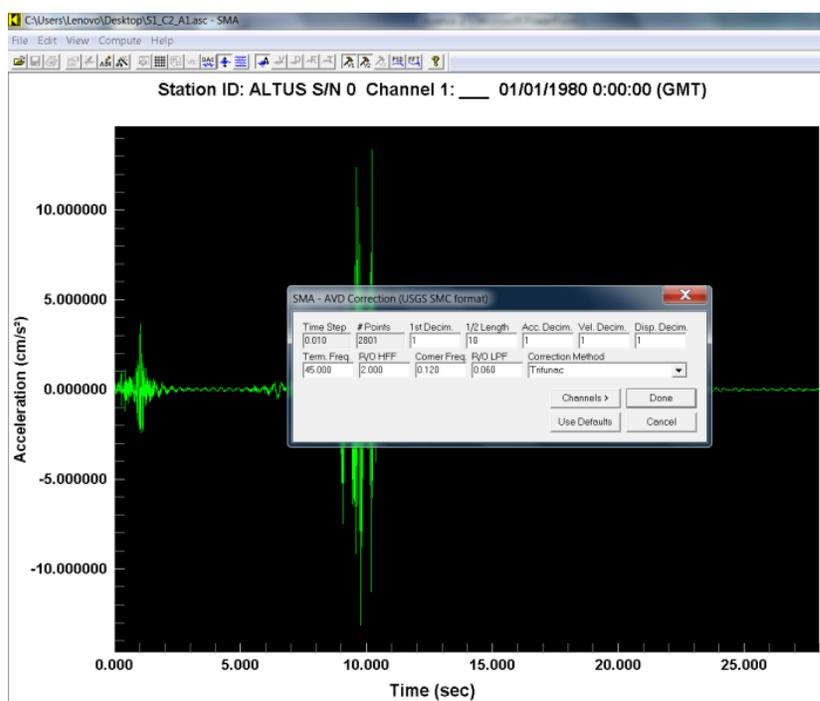


Figura G3. Paso (iv) del procedimiento realizado en el programa SMA.

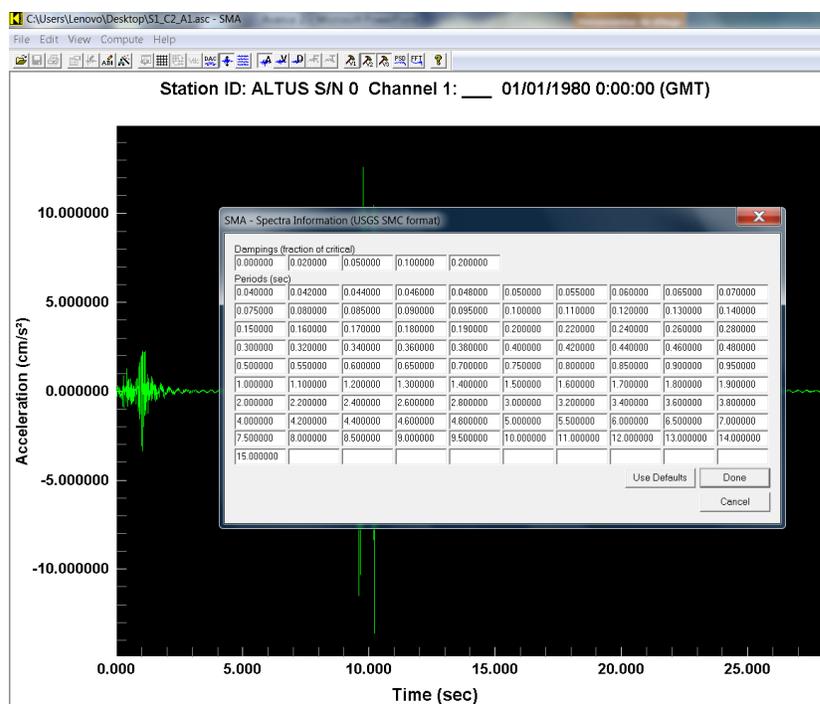


Figura G4. Paso (v) del procedimiento realizado en el programa SMA.

Apéndice H. Prueba de calibración del programa SMA

A continuación se describe la prueba de calibración del programa SMA para estimar desplazamientos a partir de registros de aceleración.

En el Laboratorio de Estructuras y de Geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil de University of Puerto Rico at Mayaguez (UPRM), se realizó un experimento controlado que consistió en realizar mediciones en una mesa vibradora (Quanse Shake Table II) desarrollada inicialmente por un consorcio universitario (University Consortium on Instructional Shake Tables, UCIST) para enseñanza y entrenamiento profesional del uso, alcances y aplicaciones en dinámica estructural, aislamiento de vibraciones y otros tópicos de ingeniería: (i) mecánica, (ii) aeroespacial, e (iii) ingeniería civil. Las facilidades y financiamiento para utilizar este instrumental en el experimento en referencia fueron proporcionadas por Puerto Rico Strong Motion Program de la UPRM.

En este experimento se utilizó esta facilidad para calibrar el algoritmo computacional de procesado de señales utilizado en esta tesis para el cálculo de deflexiones estimadas en el puente Manantiales a partir de registros de aceleración. Esto es, para estimar en forma confiable los desplazamientos dadas las inconsistencias numéricas implícitas que este proceso conlleva para estimar mediante doble integración los desplazamientos a partir de registros de aceleración.

Los registros de aceleración obtenidos en este experimento consistieron en registros de aceleración dada una señal de entrada al sistema con desplazamiento, frecuencia y amplitud controlados.

Instrumentación utilizada:

Se muestra a continuación la descripción del equipo utilizado en el experimento antes descrito.

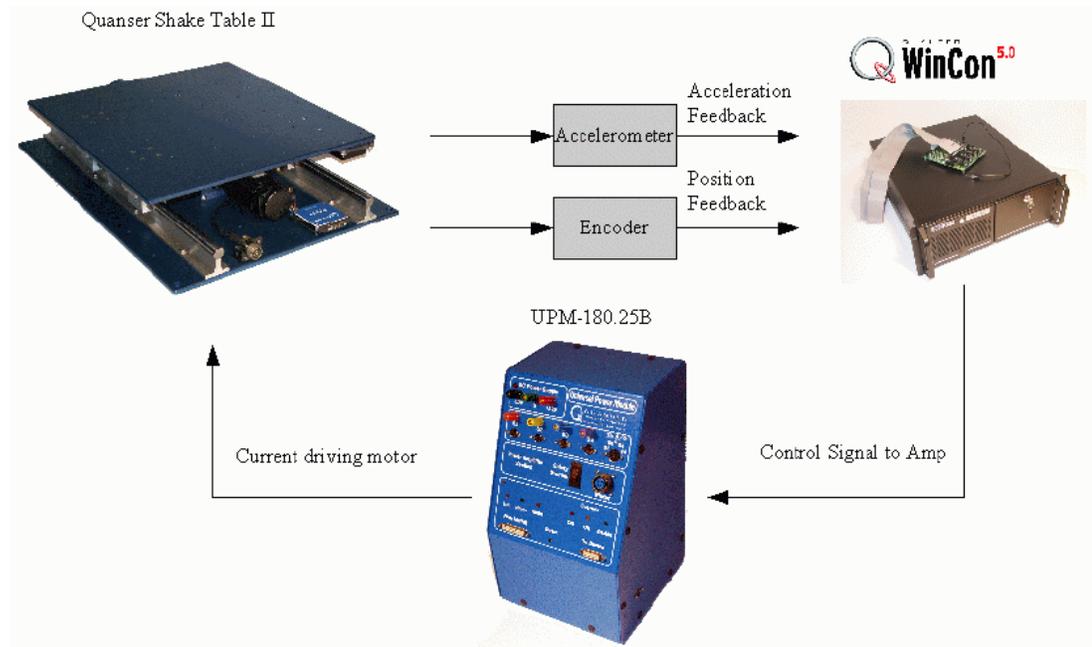


Figura H1. Esquema de la configuración genérica mesa vibradora-sistema de adquisición de datos.

Los detalles de las características de la mesa vibradora se presentan en las figuras H2 y H3 y en la tabla H1:

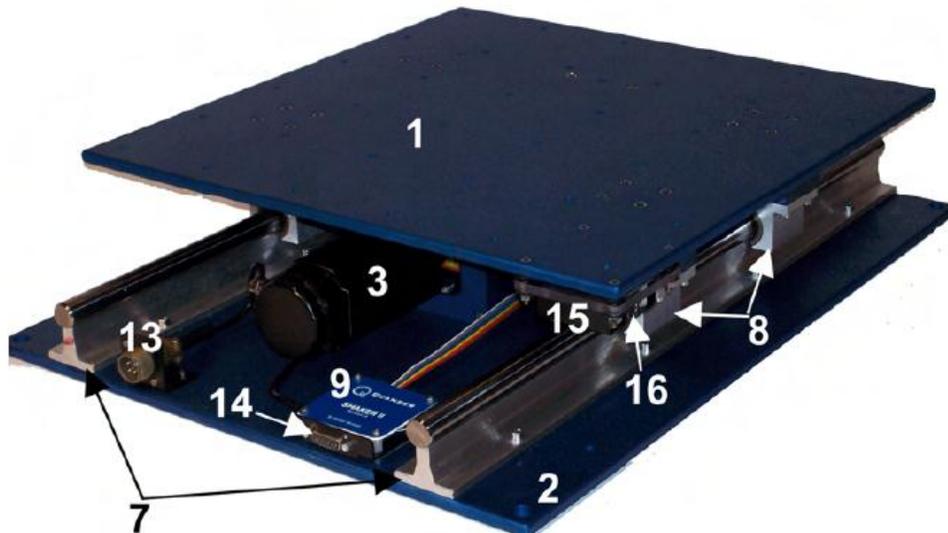


Figura H2. Vista superior de la mesa vibratoria.

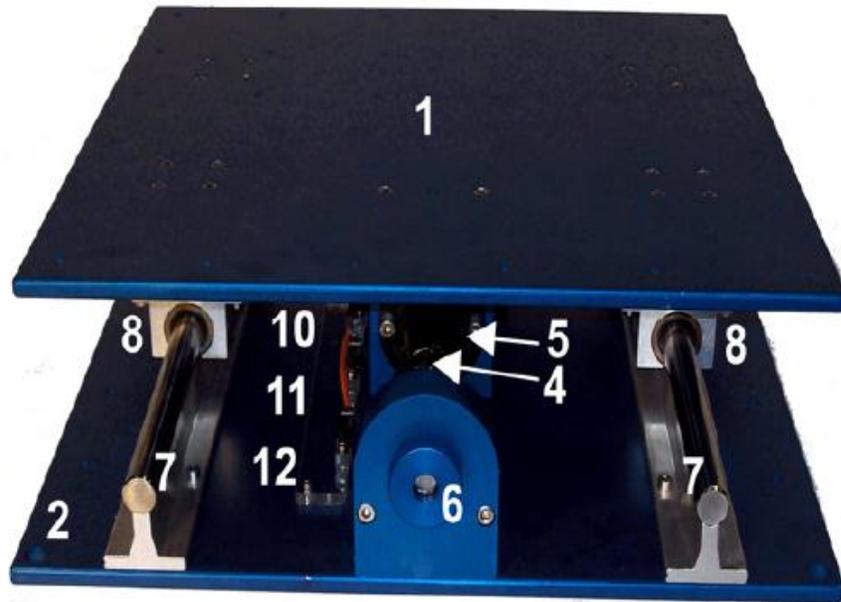


Figura H3. Vista frontal de mesa vibratoria.

Tabla H1. Descripción de las componentes de la mesa vibratoria.

<i>ID #</i>	<i>Description</i>	<i>ID #</i>	<i>Description</i>
1	Stage	9	Sensor Circuit Board
2	Base Plate	10	Left Limit Sensor
3	Brushless DC Motor	11	Home Position Sensor
4	Lead screw	12	Right Limit Sensor
5	Ball nut	13	Motor Leads Connector
6	Manual adjustment.	14	Motor Encoder & Hall Sensors Connector
7	Hardened Steel Guide Rail	15	Accelerometer
8	Linear bearing block	16	Accelerometer Connector

Mayores detalles e información completa del sistema adquisición de datos (mesa vibratoria) se pueden encontrar en:

http://www.quanser.com/english/html/products/fs_product_challenge.asp?lang_code=english&pcat_code=exp-spe&prod_code=S6-shake2&tmpl=1

En la figura H4, se muestra tanto la señal de entrada a la mesa vibratoria, así como el registro de aceleración obtenido, con el cual se realizó la estimación del desplazamiento.

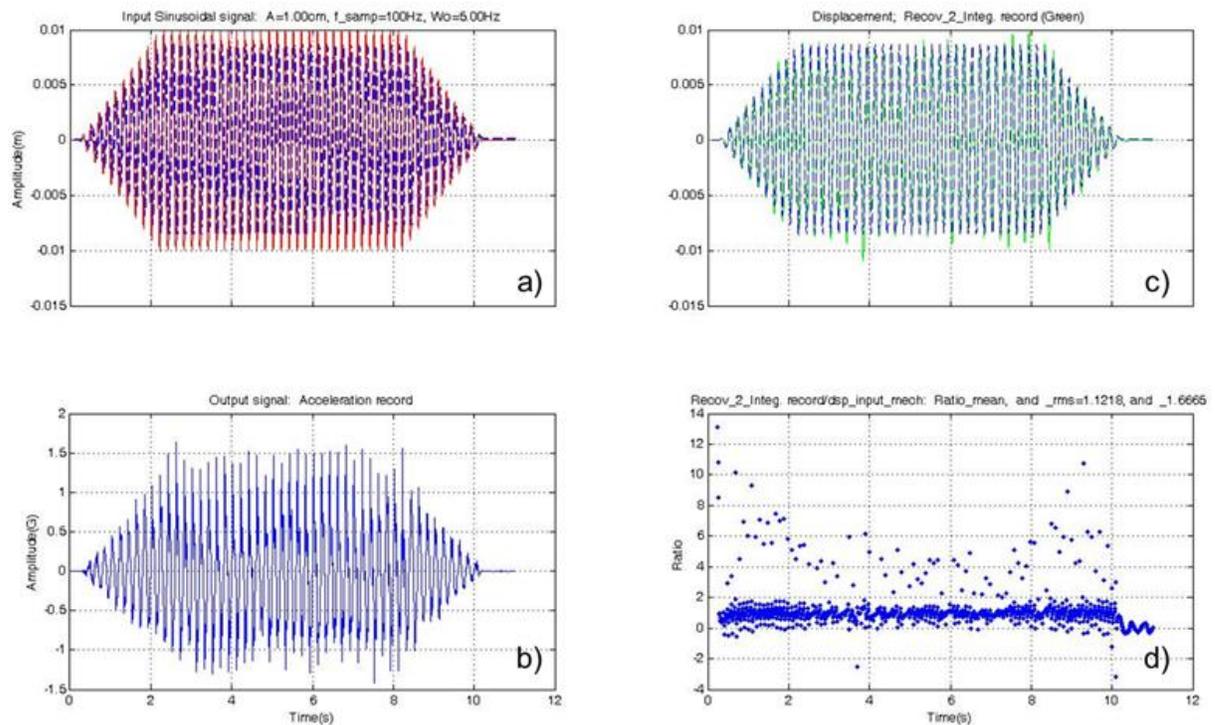


Figura H4. Señal de entrada y de salida en la mesa vibradora: (a) señal de entrada (en rojo la señal teórica generada por el generador de señales y en azul la señal del movimiento mecánico de la mesa vibradora), (b) señal registrada por el acelerómetro, (c) señal del movimiento mecánico de la mesa (azul), como la señal de los desplazamientos recuperados por doble integración en el registro de aceleración (verde) y (d) se muestra el cociente de los desplazamientos recuperados por doble integración y el de referencia.

Los datos mostrados en la figura H4, corresponden tanto a los datos reales medidos de la señal de entrada y de los valores nominales suministrados en el generador de señales y de la respuesta en aceleración, ambos de la respuesta mecánica del sistema. La figura antes descrita, también muestra el resultado de la estimación de los desplazamientos obtenidos partiendo del registro de aceleración obtenido en el experimento, mediante la aplicación de doble integración y la corrección de línea base. En este respecto, se utilizó el algoritmo y corrección que utiliza el programa de procesado estándar de acelerogramas Strong Motion Analyst (SMA) de Kinemetrics (descrito en la sección 4.1.7.1).

Del experimento realizado, junto con el procesado de los datos, específicamente en el proceso de doble integración y la corrección por línea base, se comprueba y demuestra

que el algoritmo utilizado en esta etapa del procesado de datos es altamente confiable y no conlleva a una sobreestimación o subestimación significativa de los desplazamientos provocado por alguna deficiencia en el algoritmo o en los criterios de corrección por línea base.

Apéndice I. Cálculos teóricos de las deflexiones máximas esperadas

Las figuras I1, I2, I3 y I4 muestran los cálculos de las deflexiones máximas esperadas generadas por diferentes tipos de vehículos para claros de 36.00m y 34.00m de longitud, realizados en el año 2012 por el Ing. Manuel Esparza Fuentes.

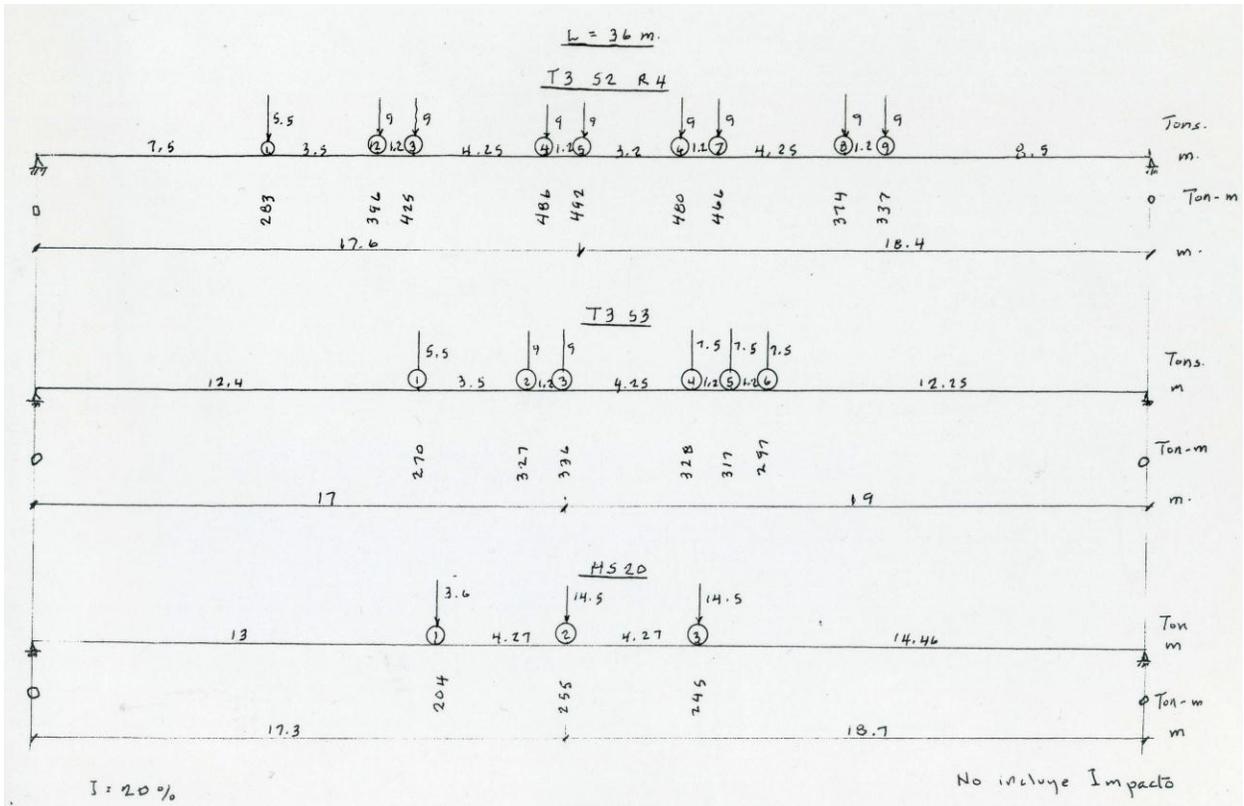


Figura I1. Condición más desfavorable en un claro de 36.00m de longitud. El primer renglón corresponde a un camión tipo T3S2R4, el segundo renglón a un camión tipo T3S3 y un HS20 en el tercer renglón.

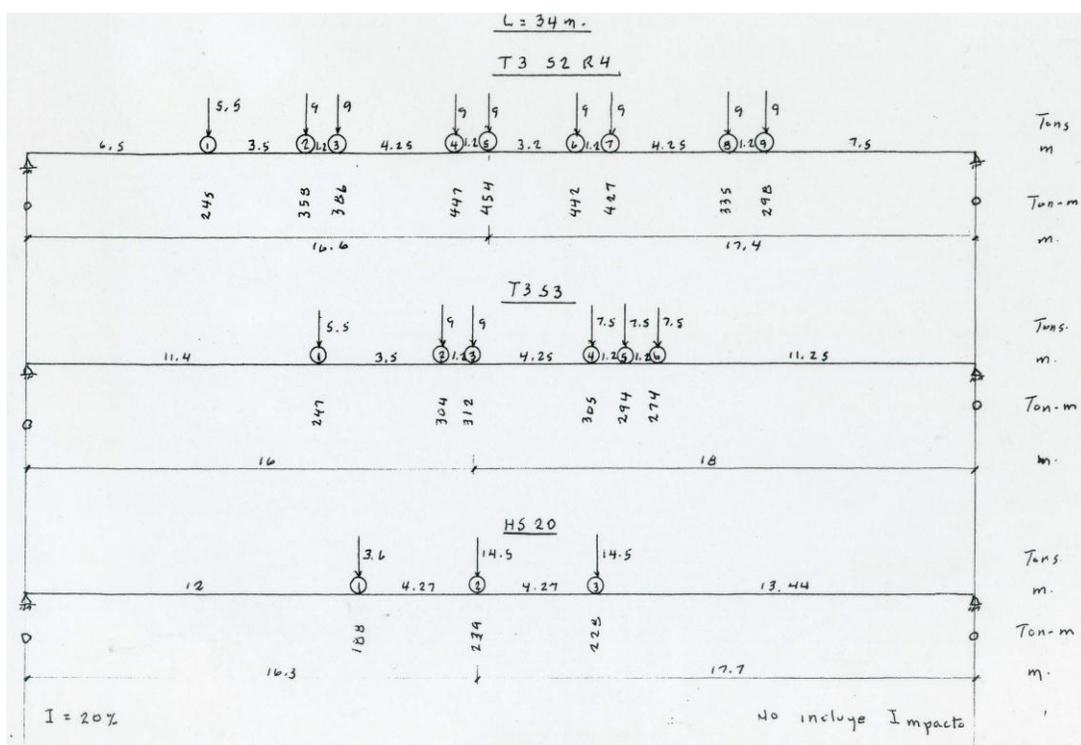


Figura I2. Condición más desfavorable en un claro de 34.00m de longitud. El primer renglón corresponde a un camión tipo T3S2R4, el segundo renglón a un camión tipo T3S3 y un HS20 en el tercer renglón.

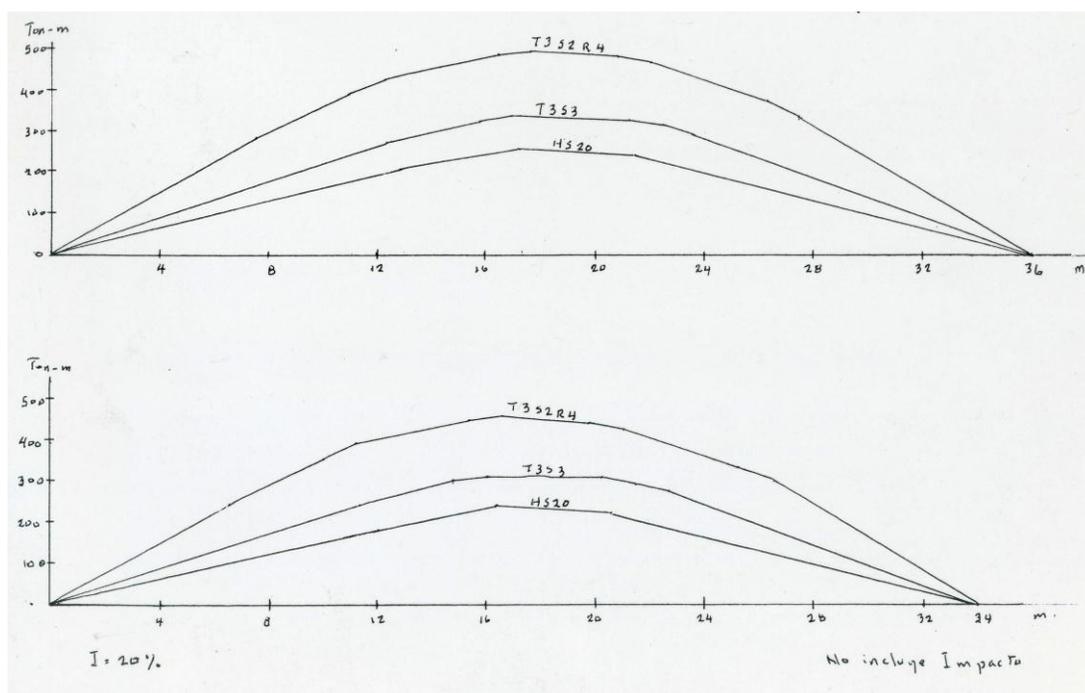


Figura I3. Gráficas del momento flexionante producido por camiones tipo T3S2R4, T3S3 y HS20 en claros de 36.00m (primer renglón) y 34.00m (segundo renglón) de longitud.

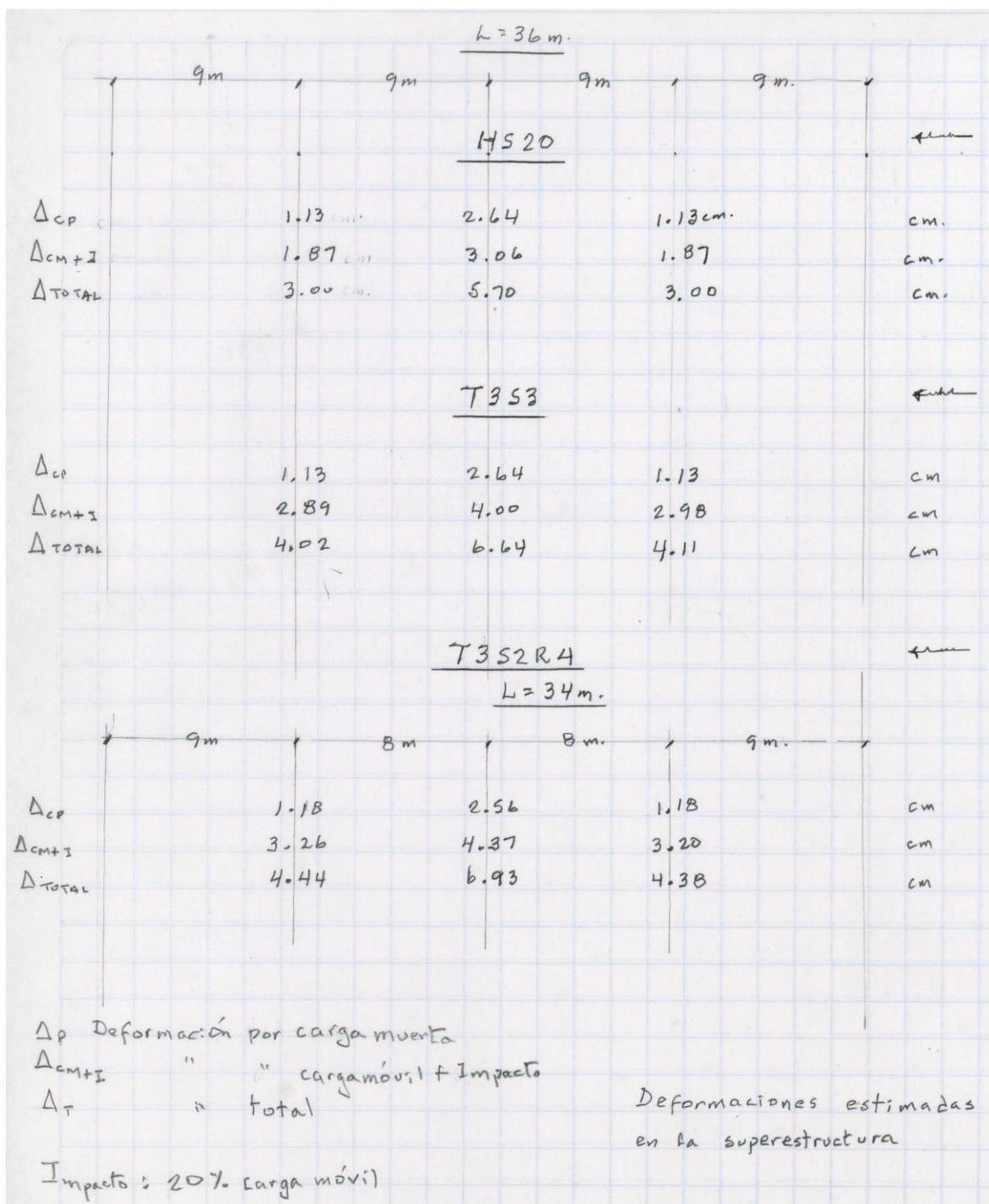


Figura I4. Deformaciones estimadas en la superestructura del puente Manantiales. El primer renglón representa las deformaciones generadas por un camión tipo HS20 en un claro de 36.00m, el segundo renglón corresponde a las deflexiones generadas por un camión tipo T3S3 en un claro de 36.00m y el tercer renglón a las deformaciones generadas por un camión tipo T3S2R4 en un claro de 34.00m de longitud.

Apéndice J. Figuras del procedimiento usado en SAP2000

Las figuras J1 a J6 muestran el procedimiento realizado en el programa de cálculo estructural SAP2000.

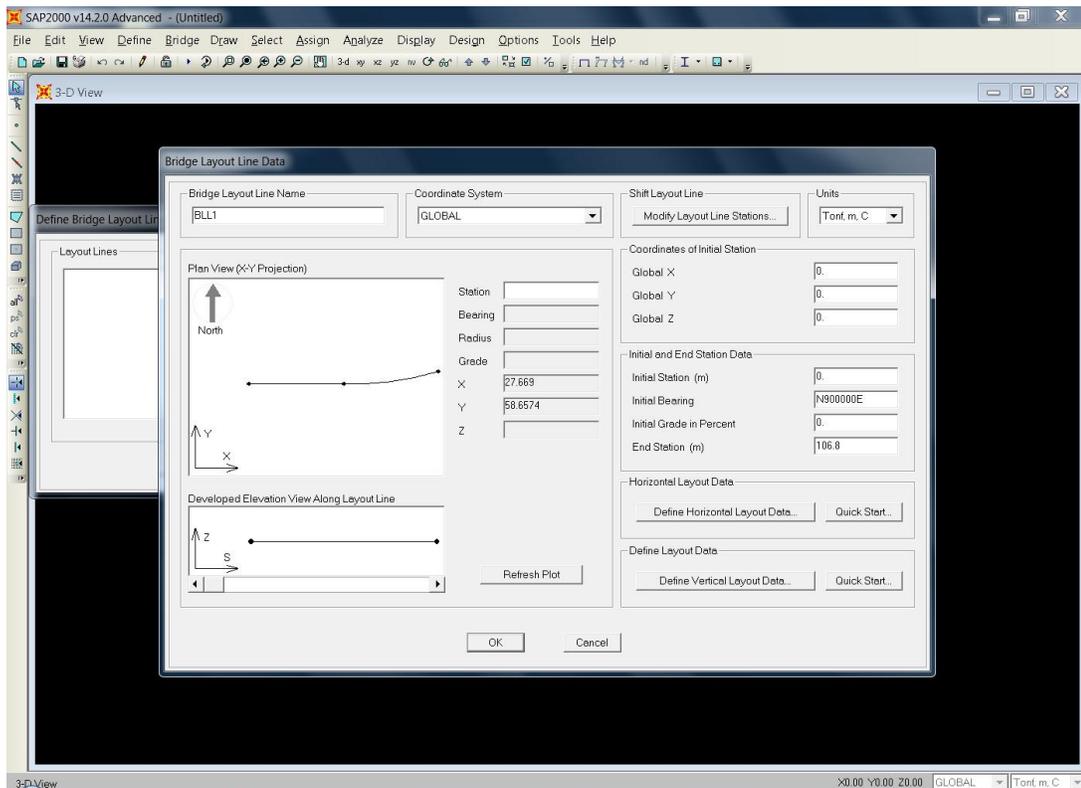


Figura J1. Definición de la línea de diseño usando módulo de puentes de SAP2000.

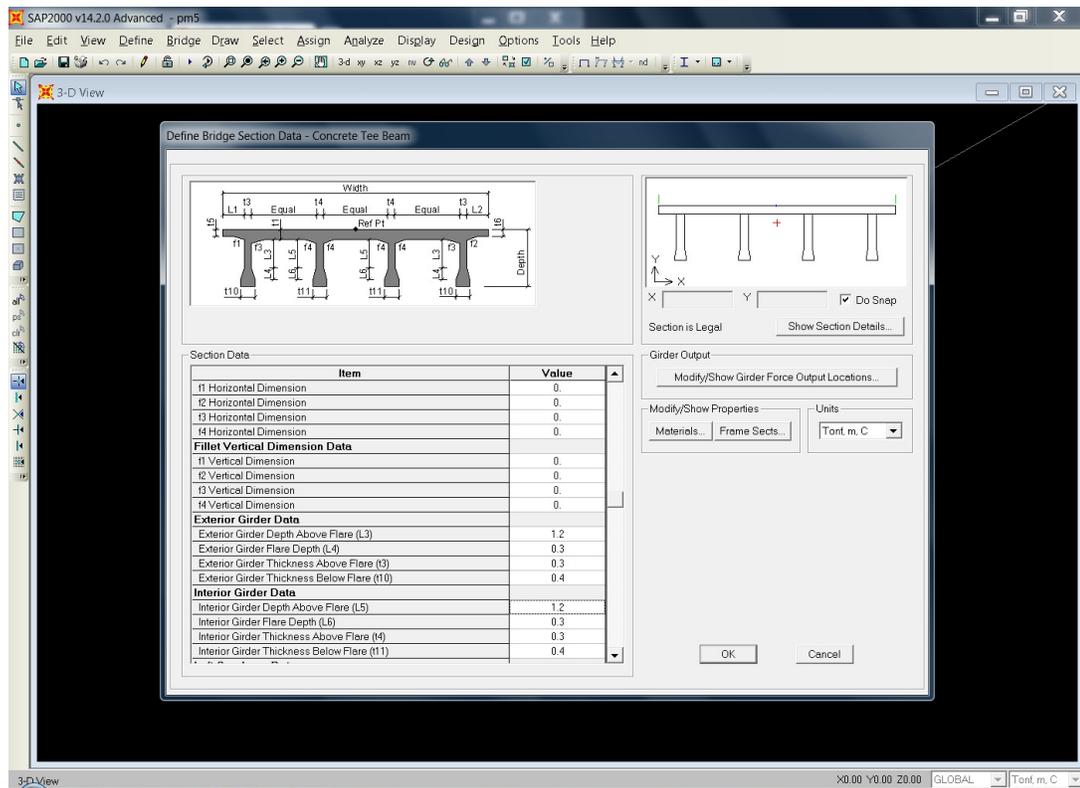


Figura J2. Definir el tipo de sección con la que se soporta la superficie de rodamiento.

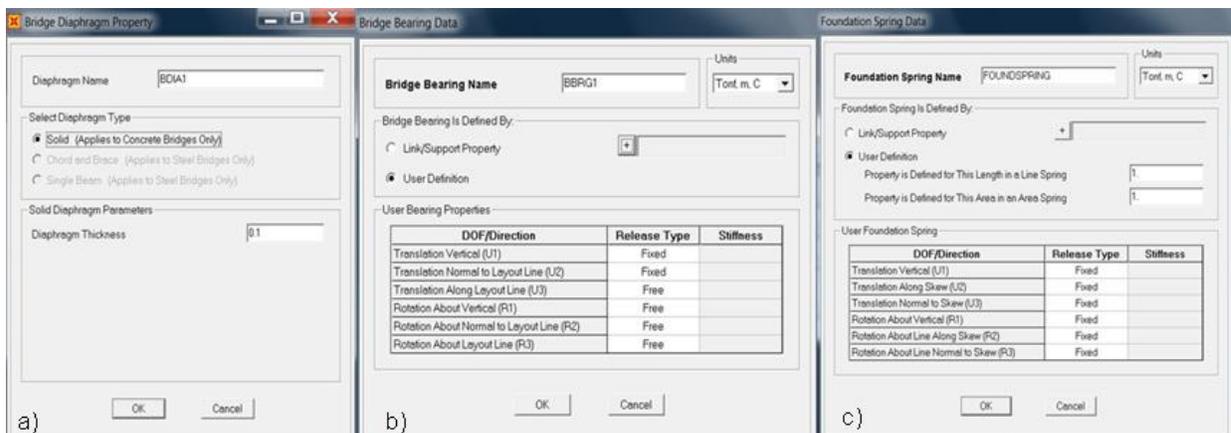


Figura J3: a) Definir diafragmas, b) Especificar grados de libertad en superestructura y c) Especificar grados de libertad en superestructura.

Bridge Abutment Data

Bridge Abutment Name: ABUTMENTS Units: Tonf, m, C

Girder Support Condition

Integral

Connect to Girder Bottom Only

Substructure Type

Foundation Spring

Continuous Beam (Continuously Supported)

Section Property: + ABUTMENT

Beam Length: 8.4

Foundation Spring

Foundation Spring Property: + FOUNDSPRING

Note: When substructure type is grade beam, foundation spring property represents a line spring.

OK Cancel

Figura J4. Definir apoyos.

Bridge Bent Data

Bridge Bent Name: BENT1 Units: Tonf, m, C

Girder Support Condition Before Bent

Integral

Connect to Girder Bottom Only

Location of Bearing Line Before Bent

Distance from Bent to Bearing Line: 0.4572

Girder Support Condition After Bent

Integral

Connect to Girder Bottom Only

Location of Bearing Line After Bent

Distance from Bent to Bearing Line: 0.4572

Bent Data

Cap Beam Length: 9

Number of Columns: 1

Cap Beam Section: + ABUTMENT

Modify/Show Column Data...

Bent Type

Single Bearing Line (Continuous Superstructure)

Double Bearing Line (Discontinuous Superstructure)

OK Cancel

Figura J5. Definir columnas.

Bridge Object Data

Bridge Object Name: [B06.1] Layout Line Name: [BLL1] Coordinate System: [GLOBAL] Units: [Tonf m, C]

Define Bridge Object Reference Line

Span Label	Station m	Span Type
Start Abutment	0	Start Abutment
Start Abutment	0	Start Abutment
Span1	36	Full Span to End Bent
Span2	73.6	Full Span to End Bent
Span To End Abutment	106.8	Full Span to End Abutment

Note: 1. Bridge object location is based on bridge section insertion point following specified layout line.

Bridge Object Plan View (X-Y Projection)

Show Enlarged Sketch...

OK Cancel

Standard Vehicle Data

Vehicle Name: [HSn-44-1]

Data Definition

Vehicle Type: [HSn-44]

Scale Factor: [20]

Dynamic Allowance: []

Conversion

Show As General Vehicle

Convert To General Vehicle

Vehicle Remains Fully In Lane (In Lane Longitudinal Direction)

b) OK Cancel

Figura J6: a) definir objetos del puente y b) especificar vehículos.

Apéndice K. Método de rigideces

A continuación se presenta el método de rigideces aplicado al suelo descrito en Song, 2010.

Considere de un sistema de capas de suelo, como se muestra en la figura K1. Las interfaces son establecidas por las discontinuidades en las propiedades del material en la dirección vertical, o por la presencia de cargas externas a una determinada elevación. Se define entonces el vector de estado:

$$Z = \{\bar{u}_x, \bar{u}_y, i\bar{u}_z, \bar{\tau}_{xz}, \bar{\tau}_{yz}, i\bar{\sigma}_z\}^T = \begin{Bmatrix} \bar{U} \\ \bar{S} \end{Bmatrix} \quad (K1)$$

en coordenadas cartesianas, o

$$Z = \{\bar{u}_\rho, \bar{u}_\theta, i\bar{u}_z, \bar{\tau}_{\rho z}, \bar{\tau}_{\theta z}, i\bar{\sigma}_z\}^T = \begin{Bmatrix} \bar{U} \\ \bar{S} \end{Bmatrix} \quad (K2)$$

en coordenadas cilíndricas.

En estas expresiones, u , τ , ρ denotan el desplazamiento, el esfuerzo tangencial y el esfuerzo normal, respectivamente de los componentes en una determinada elevación en la dirección que identifica en la figura K1, y T denota la transpuesta. El factor $i = -10.5$, se ha introducido para u_z , σ_z por razones de conveniencia del caso de las coordenadas cartesianas. Por otra parte, el vector del desplazamiento \mathbf{U} y el vector del esfuerzo \mathbf{S} son funciones únicamente de z , es decir, se supone que la variación de los desplazamientos y esfuerzos es armónico en el plano horizontal.

De coordenadas cartesianas, el desplazamiento real y esfuerzos en un punto se obtiene multiplicando \mathbf{U} , \mathbf{S} , por el factor $\exp i(\omega t - kx - ly)$, es decir,

$$\begin{Bmatrix} U \\ S \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{U} \\ \bar{S} \end{Bmatrix} \exp i(\omega t - kx - ly) \quad (K3)$$

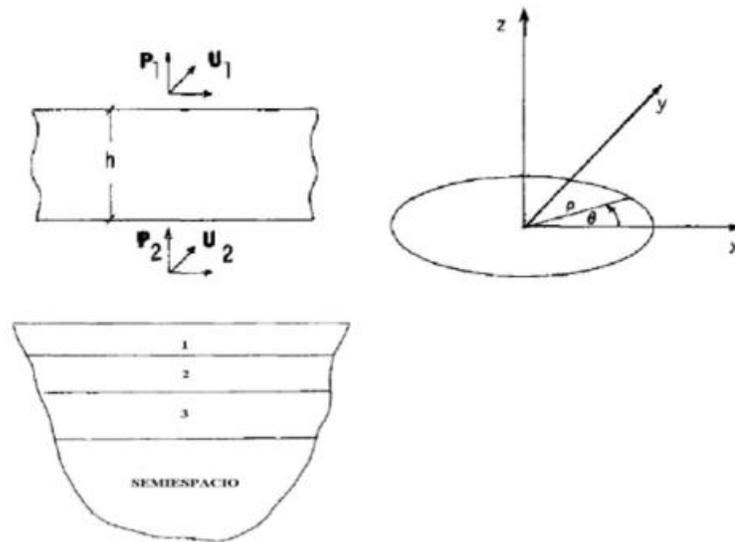


Figura K1. Un sistema de capa de suelos.

donde ω = frecuencia de excitación, y k y l son los números de onda. Si restringimos nuestra atención a un plano donde la condición es deformada (es decir, ondas planas), se deduce que $l = 0$ y el factor se convierte en simplemente $\exp i(\omega t - kx)$.

Por otra parte, para coordenadas cilíndricas, la variación de los desplazamientos y esfuerzos en la dirección azimutal se obtiene multiplicando por u_ρ , u_z , $\tau_{\rho z}$, σ_z por $\cos \mu\theta$ y u_θ , $\tau_{\theta z}$ por $-\sin \mu\theta$ (o por el $\sin \mu\theta$ y $\cos \mu\theta$, respectivamente) con $\mu = 0, 1, 2, \dots$ un numero entero. La variación en la dirección radial se obtiene multiplicando U , S por la matriz C (que es común a todas las capas)

$$\begin{Bmatrix} U \\ S \end{Bmatrix}_\mu = \begin{Bmatrix} C \bar{U} \\ C S \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C & \\ & C \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{U} \\ \bar{S} \end{Bmatrix} \quad (\text{K4})$$

$$C = \begin{Bmatrix} \frac{d}{d(k\rho)} C_\mu & \frac{\mu}{k\rho} C_\mu \\ \frac{\mu}{k\rho} C_\mu & \frac{d}{d(k\rho)} C_\mu \\ & & -C_\mu \end{Bmatrix} \quad (\text{K5})$$

donde $C_\mu = C_\mu(k\rho)$ son funciones cilíndricas de orden μ -enésimo y primero, segundo o tercer tipo (de Bessel, Neumann, o funciones de Hankel, respectivamente). El argumento k es el número de onda. Esto corresponde a la conocida descomposición de los desplazamientos y esfuerzos en una serie de Fourier en la dirección azimutal y funciones cilíndricas en la dirección radial. La variación con el tiempo se da una vez más por el factor $\exp i\omega t$.

Las Funciones de Hankel son frecuentemente utilizadas en los problemas de propagación de ondas, porque se comportan como asintóticamente complejos exponenciales. Por esta razón, pueden modelar [en relación con el término $\exp(i\omega t)$] ondas que viajan desde el infinito hacia el origen (primera función de Hankel) o de la región central hacia el campo lejano (segunda función de Hankel). Sin embargo, una singularidad de argumento cero no puede ser utilizado, en general, si el problema incluye el origen.

En el método de matriz de transferencia, el vector de estado en una interface determinada se tiene así (Haskell, 1953).

$$Z_{j+i} = H_j Z_j \quad (\text{K6})$$

donde H_j es la matriz de transferencia de j -enésima capa. Esta matriz es una función de la frecuencia de excitación ω , el número de onda k , l , las propiedades del suelo, y el espesor de la capa. Es interesante observar que la matriz de transferencia de coordenadas cilíndricas es idéntica en el caso del esfuerzo plano, y es independiente del índice de Fourier μ . Esto implica, entre otras cosas, que la solución para cargas puntuales se pueden derivar, en principio, desde la solución para los tres casos del esfuerzo plano.

Refiriéndose a la figura K1, se puede aislar una determinada capa y preservar el equilibrio mediante la aplicación de cargas externas $P_1 = S_1$ en la parte superior de la interface, y $P_2 = S_2$ en la parte inferior de la interface. A partir de la ecuación K6 tenemos

$$\begin{Bmatrix} \bar{U}_2 \\ -\bar{P}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{12} & H_{22} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{P}_1 \end{Bmatrix} \quad (\text{K7})$$

donde H_{ij} son submatrices de la matriz de transferencia H_j . Después de hacer algo de álgebra matricial, obtenemos

$$\begin{Bmatrix} \bar{P}_1 \\ \bar{P}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -H_{12}^{-1}H_{11} & H_{12}^{-1} \\ H_{22}H_{12}^{-1}H_{11} - H_{21} & -H_{22}H_{12}^{-1} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{K8})$$

$$\bar{P} = K\bar{U} \quad (\text{K9})$$

donde:

K = matriz de rigidez de la capa,

P = externa "vector de carga" y

U = vector de desplazamiento. Se puede demostrar también que K es simétrica.

En el caso de un suelo que consta de varias capas, la matriz de rigidez global es construida por la superposición de la contribución de la capa en las matrices de cada "nodo" (interface) del sistema. El vector de la carga global en este caso corresponde a los esfuerzos exteriores prescritos en las interfaces. Por lo tanto, el armado y la solución de las ecuaciones es formalmente análoga a la solución de problemas dinámica estructural en el dominio de la frecuencia. De ello se deduce entonces que los teoremas y las técnicas disponibles para estos problemas también pueden ser aplicados a los suelos estratificados.

Glosario

Amortiguamiento: proceso mediante el cual un sistema físico disipa y absorbe la energía impartida por una excitación externa (Bejarano, 2006).

Diafragma: son vigas transversales a las vigas principales y sirven para su arriostramiento. En algunos casos pasan a ser vigas secundarias cuando van destinadas a transmitir cargas de la losa a las vigas principales (Apuntes Ingeniería Civil, 2011).

Estribo: estructura que soporta el extremo de un tramo de puente y proporciona apoyo lateral para el material de relleno sobre cual descansa el camino inmediatamente adyacente al puente (Song, 2010). A diferencia de las pilas los estribos reciben además de la superestructura el empuje de las tierras de los terraplenes de acceso al puente, en consecuencia trabajan también como muros de contención (Apuntes Ingeniería Civil, 2011).

Losa: es la parte estructural que queda a nivel de subrasante y que transmite cargas como vigas principales. Su función principal es distribuir las cargas transversal y longitudinalmente en toda la longitud del puente (Apuntes Ingeniería Civil, 2011).

Parapeto: Sistema de protección para peatones u otros usuarios de las carreteras, situado en el borde de un puente, muro de contención o estructura similar y que no está concebido para actuar como un sistema de contención de vehículos (Song, 2010).

Pila: parte de la estructura de un puente que provee un apoyo intermedio para la superestructura (Song, 2010).

Resonancia: es un fenómeno que se produce cuando un cuerpo capaz de vibrar es sometido a la acción de una fuerza periódica, cuyo período de vibración coincide con el periodo de vibración característico de dicho cuerpo (Resonancia mecánica, 2012).

Semiespacio: Modelo matemático caracterizado por una capa plana e infinita en la cual sobreyacen suelos o sedimentos. Se asume que el semiespacio es homogéneo e isotrópico (Bejarano, 2006).

Subestructura: todo el conjunto de pilas (columnas intermedias) y estribos (muros de contención en los costados) que soportan a la superestructura (Apuntes Ingeniería Civil, 2011).

Subrasante: se define así al terreno de fundación de los pavimentos, pudiendo estar constituida por el suelo natural del corte o de la parte superior de un relleno debidamente compactado (Topografía, 2010).

Superestructura: consiste en la losa o parte que soporta directamente las cargas y las armaduras, constituidas por vigas, cables, o bóvedas y arcos que transmiten las cargas de la losa a las pilas y los estribos (Ingeniería Civil, 2009).

Superficie de rodamiento: sobre la cual circulan los vehículos. Puede ser de asfalto o de concreto (Song, 2006).

Transiente: es una señal o forma de onda que empieza en una amplitud cero. Un ejemplo es el sonido de un disparo de un rifle, o la vibración de un golpe de un martillo. Cuando se hace el análisis de espectro a transientes, generalmente no generan series de armónicos, pero generan un espectro continuo en el que la energía está distribuida sobre el rango de frecuencias (White, 2010).

Vigas: son los miembros principales del puente y se diseñan para resistir el trabajo a flexión (Song, 2006).

Referencias bibliográficas (glosario)

Apuntes Ingeniería Civil (2011). Recuperado 27 de agosto de: <http://apuntesingenierocivil.blogspot.mx/2011/05/partes-constructivas-puentes.html>.

Bejarano Carrillo, A. (2006). Estudio de la Técnica del Decremento Aleatorio para la estimación in-situ de propiedades de suelos. (Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California). Recuperado de: <http://biblioteca.cicese.mx/catalogo/tesis/ficha.php?id=17322>

Hoon Song (2010). Respuesta dinámica de una estructura y caracterización del terreno ante cargas sísmicas, caso de estudio: puente La Misión, B. C., México. (Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California). 102 pp. Recuperado de: <http://biblioteca.cicese.mx/catalogo/tesis/ficha.php?id=18474>

Ingeniería Civil. (2009). Recuperado 27 de agosto de: <http://ingenieriacivil-construcciones.blogspot.mx>

Resonancia mecánica (2012). Recuperado 27 de agosto de: <http://www.slideshare.net/death139/resonancia-mecanica>.

Topografía. (2010). Recuperado 27 de agosto de: http://html.rincondelvago.com/topografia_10.html

White, G. (2010). Recuperado 27 de agosto de: <http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/transiente1.htm>.