



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:
**OPTIMACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN DE
PUENTES PARA MEDICIONES DE VIBRACIÓN
AMBIENTAL**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
**RODRIGO RENDÓN GARCÍA
INGENIERO CIVIL**

ASESOR:
**JOSÉ MANUEL JARA GUERRERO
DOCTOR EN INGENIERÍA**

MORELIA, MICH.

AGOSTO 2016



Agradecimientos

Debo agradecer en primer lugar a mi madre, por ser la persona que siempre me apoya en todo, por estar ahí cuando más la necesito, por la buena educación que me ha dado y por su cariño.

Es importante agradecer a mi asesor por la infinita paciencia ante mis interminables retrasos y constantes fallas, además de su siempre buena disponibilidad para resolver dudas.

A mis compañeros y amigos con los que compartimos tres años de tareas, exámenes y largas jornadas de estudio, pero también de aventuras y buenos momentos.

A mi familia en general, por mantenerme cuerdo todo este tiempo, por su cariño y su compañía.

A Dios por permitirme ser lo que soy.

Contenido

Resumen	VII
Abstract	VII
Introducción	VIII
Capítulo I	1
Estado del arte	1
Capítulo II	3
Descripción y análisis de puentes	3
2.1. Puente La Central	4
2.1.1. Plano general del puente	4
2.1.2. Subestructura	6
2.1.3. Superestructura	8
2.1.4. Apoyos de neopreno	9
2.2. Puente El Pedregal	9
2.2.1. Plano general del puente	10
2.2.2. Subestructura	11
2.2.3. Superestructura	12
2.2.4. Cimentación	13
2.3. Puente El Lago	14
2.3.1. Plano general del puente	14
2.3.2. Subestructura	16
2.3.3. Superestructura	17
2.3.4. Apoyos de neopreno	18
2.4. Modelos numéricos	19
2.4.1. Modelo del puente La Central	19
2.4.2. Modelo del puente el Pedregal	20
2.4.3. Modelo del puente el lago	20
2.4.4. Diseño de apoyos de neopreno	20
2.5. Análisis modal	22

2.5.1.	Análisis modal del puente La Central	22
2.5.2.	Análisis modal del puente El Pedregal	24
2.5.3.	Análisis modal del puente El Lago	25
Capítulo III	27	
Vibración ambiental en puentes	27	
3.1.	Vibración ambiental y equipos	28
3.1.1.	Acelerómetros.....	28
3.1.2.	Medición de vibración ambiental.....	29
3.2.	Análisis modal operacional.....	35
3.2.1.	Identificación de picos (PP)	36
3.2.2.	Descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD)	37
3.2.3.	Análisis del puente La Central.....	38
Capítulo IV	44	
Optimación de la instrumentación	44	
4.1.	Método MAC (Modal Assurance Criterion)	45
4.1.1.	Método MAC para modelos numéricos	45
4.1.2.	Método MAC para mediciones de vibración ambiental.....	49
Conclusiones	53	
Referencias	54	

Lista de tablas

Tabla @ Encamisado de torones en trabe AASHTO tipo IV	8
Tabla @ Longitud de pilas de cimentación del puente El Pedregal	13
Tabla @ Encamisado de torones en trabe AASHTO tipo IV	18
Tabla @ Geometría de los puentes en estudio.....	18
Tabla @ Rigidez vertical y lateral de los apoyos de neopreno	22
Tabla @ Propiedades del neopreno convencional [#referencia]	22
Tabla @ Histórico de mediciones	30

Lista de figuras

2.1. Mapa de localización del puente La Central.	4
2.2. Corte en elevación y planta.	5
2.3. Corte en elevación, lateral y planta del caballete número uno.	6
2.4. Corte en elevación, lateral y planta de la pila número dos.....	7
2.5. Corte transversal de la superestructura y distribución de torones	8
2.6. Detalle de apoyo de neopreno.	9
2.7. Mapa de localización del puente El Pedregal.	9
2.8. Corte longitudinal y planta del puente.	10
2.9. Corte longitudinal y planta del caballete número uno.	11
2.10. Corte en elevación, lateral y planta de la pila número dos.....	12
2.11. Corte transversal de la superestructura	12
2.12. Ubicación y distribución de las pilas de cimentación.	13
2.13. Detalle de refuerzo de pilas de cimentación.	14
2.14. Mapa de localización del puente El Lago.	14
2.15. Corte longitudinal y planta del puente.	15
2.16. Corte longitudinal y planta del caballete número uno.	16
2.17. Corte en elevación y lateral de la pila número dos.....	16
2.18. Planta de la pila número dos.....	17
2.19. Corte transversal de la superestructura	17
2.20. Distribución de torones en traves.	17
2.21. Apoyos de neopreno	18

2.22. Vista 3D y perspectiva transversal.....	19
2.23. Vista 3D y perspectiva transversal.....	20
2.24. Vista 3D y perspectiva transversal.....	21
2.25. Modos transversales, puente La Central. T = 0.696 y 0.559 seg. respectivamente.....	23
2.26. Modos verticales, puente La Central. T = 0.352, 0.348 y 0.096 seg. respectivamente.....	23
2.27. Modos transversales, puente El Pedregal. T = 0.636 y 0.549 seg. respectivamente.....	24
2.28. Modos verticales, puente El Pedregal. T = 0.331, 0.320 y 0.095 seg. respectivamente.....	25
2.29. Modos transversales, puente El Lago. T = 0.987, 0.916, 0.604 y 0.569 seg. respectivamente.....	26
2.30. Modos verticales, puente El Lago. T = 0.401 y 0.399 seg. respectivamente. ..	26
3.1. Acelerómetro triaxial y uniaxial, modelos EpiSensor ES-T y ES-U2.	28
3.2. Vista real de los sensores empleados en las mediciones.....	29
3.3. Croquis de mediciones del puente La Central.	31
3.4. Mediciones en el puente La Central el día 15/11/2014.	31
3.5. Mediciones en el puente La Central el día 12/12/2014.	31
3.6. Mediciones en el puente La Central el día 30/11/2015.	32
3.7. Croquis de mediciones del puente El Pedregal.	32
3.8. Mediciones en el puente El Pedregal el día 12/01/2015.	33
3.9. Mediciones en el puente El Pedregal el día 24/02/2015.	33
3.10. Mediciones en el puente El Pedregal el día 30/11/2015.	33
3.11. Croquis de mediciones del puente El Lago.	34
3.12. Medición sobre el puente El Lago el día 10/01/2015.	34
3.13. Medición sobre el puente El Lago el día 20/02/2015.	35
3.14. Medición sobre el puente El Lago el día 30/11/2015.	35
3.15. Función de densidad espectral de potencia. Tomada de.....	36
3.16. Valores singulares de la matriz de densidades espectrales. Tomada de	37
3.17. Vista 3D del modelo en ARTeMIS con posición y dirección de sensores. Medición 11/2014.....	38
3.18. Formas modales (OMA) del puente La Central (nov/2014).....	39
3.19. Vista 3D del modelo en ARTeMIS con posición y dirección de sensores. Medición 12/2014.....	40
3.20. Formas modales (OMA) del puente La Central (dic/2014).....	41
3.21. Vista 3D del modelo en ARTeMIS con posición y dirección de sensores. Medición 11/2015.....	42
3.22. Formas modales (OMA) del puente La Central (nov/2015).....	43
4.1. Nodos considerados para método MAC.	46
4.2. Matriz MAC para el puente La Central (S3).	46

4.3. Comparación modelo simplificado 3 vs. Completo.	47
4.4. Matriz MAC para el puente El Pedregal (S3).	47
4.5. Formas modales 1 y 2 del modelo numérico del puente El Pedregal.....	48
4.6. Matriz MAC para el puente El Lago (S4).	48
4.7. Comparación modelo simplificado 4 vs. Completo.	49
4.8. Ubicación de sensores vs forma modal vertical.....	50
4.9. Croquis de sensores para modelo simplificado del puente La Central (noviembre 2014).	51
4.10. Formas modales (OMA) del puente La Central simplificado (nov/2014).	52
4.11. Matriz MAC para el puente La Central (OMA – nov/2014).....	52

Resumen

En el presente trabajo se realiza la optimización de la posición de sensores (acelerómetros) para mediciones de vibración ambiental. Las estructuras que se eligió instrumentar fueron puentes, en específico un conjunto de puentes nuevos que se construyeron en la ciudad de Morelia, Michoacán. Estos puentes son de concreto reforzado con traveses AASHTO pretensados. El objetivo del trabajo es encontrar una configuración óptima en cantidad y posición de sensores con la cual pueda realizarse una buena identificación modal. Como resultado del trabajo se propone una configuración óptima para la instrumentación de puentes.

Palabras clave: vibración ambiental, puentes, optimización, MAC, análisis modal operacional.

Abstract

In this study the sensor (accelerometer) positioning optimization for ambient vibration testing is conducted. The structures chosen for the measurements were bridges, specifically a set of three new bridges built in the city of Morelia, Michoacán. These bridges are built with reinforced concrete and prestressed AASHTO girders. The objective of this study is finding an optimum set, in quantity and position, of sensors with which a good modal identification can be made. As a result of this study an optimum set of sensors for the testing of bridges is proposed.

Introducción

El objetivo principal del trabajo es buscar una posición y cantidad óptima de sensores (acelerómetros) para llevar a cabo mediciones de vibración ambiental en puentes.

Un estudio de vibración ambiental consiste en medir los movimientos de una estructura en sus condiciones normales de operación, y para esto requiere de un equipo de medición adecuado, como lo son los sensores (acelerómetros) fabricados por la empresa Kinometrics. Estos sensores están especialmente diseñados para utilizarse en la práctica de la ingeniería y pueden monitorear vibraciones a frecuencias de hasta 200 Hz. Las estructuras a analizar son tres puentes nuevos que se construyeron en el libramiento norte de la ciudad de Morelia Michoacán. Este proyecto de modernización del libramiento incluyó la construcción de cinco puentes de concreto reforzado con trabes presforzadas tipo AASHTO. De estos cinco puentes se eligieron tres, La Central, El pedregal y El Lago. Tomando en cuenta el equipo disponible y las estructuras a analizar, se debe hacer una planeación adecuada de la ubicación de los sensores sobre la estructura. Este posicionamiento debe hacerse pensando en las formas modales que se busca encontrar, en otras palabras, qué tanto espera obtenerse de un análisis modal. Una vez se tienen los registros de las mediciones se puede llevar a cabo un análisis modal operacional. Para cumplir con este propósito se debe emplear software especializado, en este caso, el software disponible viene de la empresa Structural Vibration Solutions y su programa tiene por nombre ARTeMIS Modal Pro. Lo que este software ofrece es el análisis modal operacional con distintas técnicas de identificación que se dividen en dos tipos las técnicas que se desarrollan en el dominio de la frecuencia y las que son en el dominio del tiempo. Para este estudio se utilizó la técnica de descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD por sus siglas en inglés), que permite obtener las frecuencias naturales a partir de la identificación de los picos de la gráfica de densidades espectrales de potencia. Este proceso arroja finalmente tanto las frecuencias naturales de la estructura como las formas modales. Para llevar a cabo la optimización, lo que se hace es seleccionar un menor número de nodos de las mediciones existentes y realizar con esta información un nuevo análisis modal operacional. Este nuevo análisis mostrará las formas modales que se logren identificar y que deberá contrastarse con el análisis anterior. Esta comparación se hace a través del criterio de correlación modal (MAC por sus siglas en inglés), cuyos resultados están en el intervalo de cero (para una nula correlación) y uno (para una perfecta correlación). Al obtener el valor MAC para cada modo se concluye si la nueva configuración de los sensores es lo suficientemente buena para representar el comportamiento modal de la estructura.

Finalmente, este estudio propone una configuración óptima para la instrumentación de puentes con características similares a los estudiados.



Capítulo I

Estado del arte

La optimización es una herramienta importante que tiene aplicaciones en todas las ramas del conocimiento; se utiliza siempre que se desea hacer más eficiente un cierto proceso o sistema. Su implementación depende de la selección de un objetivo medible cuantitativamente. Este objetivo puede entenderse como ganancia, tiempo, energía o cualquier otro concepto cuantificable.

El objetivo o función objetivo, depende de ciertas variables del sistema. Éstas suelen estar restringidas o limitadas por el sistema en sí mismo, por ejemplo, la distancia máxima o mínima entre dos sensores para medir vibraciones ambientales en un puente, está limitada a valores positivos y menores a la longitud total del puente.

Al proceso de definir el objetivo, variables y restricciones para un problema dado se le conoce como modelado. Este modelado puede llegar a ser el paso más importante en el proceso de optimización. Una vez se define el modelo, se utiliza algún algoritmo de optimización para encontrar la solución. Existe una gran cantidad de estos algoritmos, pero cada uno está adaptado para resolver un tipo particular de optimización. La selección del algoritmo es de suma importancia, pues de esto depende el encontrar la solución y el tiempo de cálculo que involucra.

Los algoritmos de optimización son procesos iterativos. Al utilizar un valor inicial para las variables del sistema, se genera un conjunto de mejores valores para las variables hasta llegar a la solución buscada. La mayoría de los algoritmos emplean las funciones objetivo, las primeras o segundas derivadas de estas mismas y/o las restricciones. Algunos algoritmos utilizan información de las iteraciones previas para el cálculo de una nueva y algunos otros utilizan solo la información acumulada en la iteración actual. Las propiedades que un buen algoritmo debe tener son:

Robustos. Que tengan un buen desempeño en una amplia variedad de problemas.

Eficiencia. En términos de computación no deben requerir mucho tiempo de cálculo ni demasiado espacio de almacenamiento.

Precisión. Deben ser capaces de identificar una solución con precisión. No deben ser tan sensibles a errores en los datos ni a errores de redondeo debidos a su implementación en una computadora.

Capítulo II

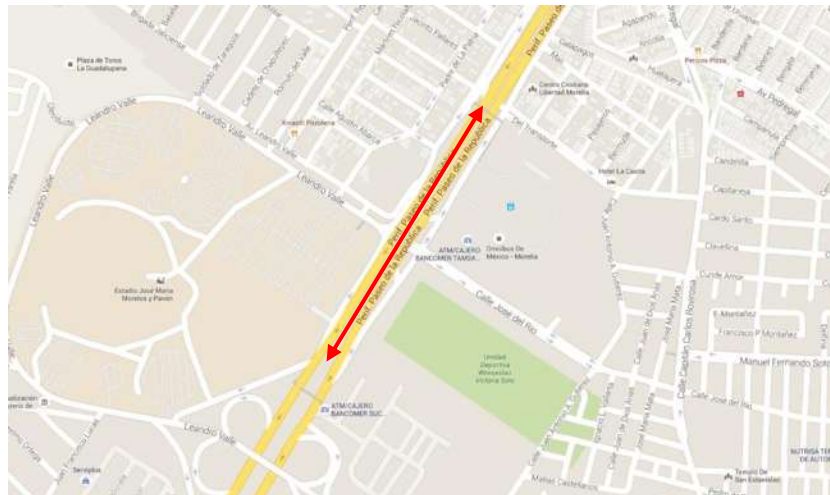
Descripción y análisis de puentes

Los puentes seleccionados para este estudio forman parte del proyecto de modernización del libramiento norte de Morelia, de donde se seleccionaron tres de los cinco puentes: la Central, el Pedregal y el Lago. Estos puentes tienen características representativas de un gran número de puentes construidos en México. Por tal motivo y considerando que se tuvo acceso para realizar mediciones durante su construcción, resultó muy atractivo y práctico llevar a cabo el estudio sobre estos tres puentes.

A continuación, se resumen las características de la superestructura y subestructura de cada uno de los puentes.

2.1. Puente La Central

El puente La Central es el primero de los puentes en sentido poniente oriente. Está ubicado sobre el libramiento norte en el kilómetro 21+300. En los alrededores se encuentra la central camionera y el estadio Morelos. Ubicación geográfica: latitud $19^{\circ}43'8.4''$ N y longitud $101^{\circ}13'40.8''$ W

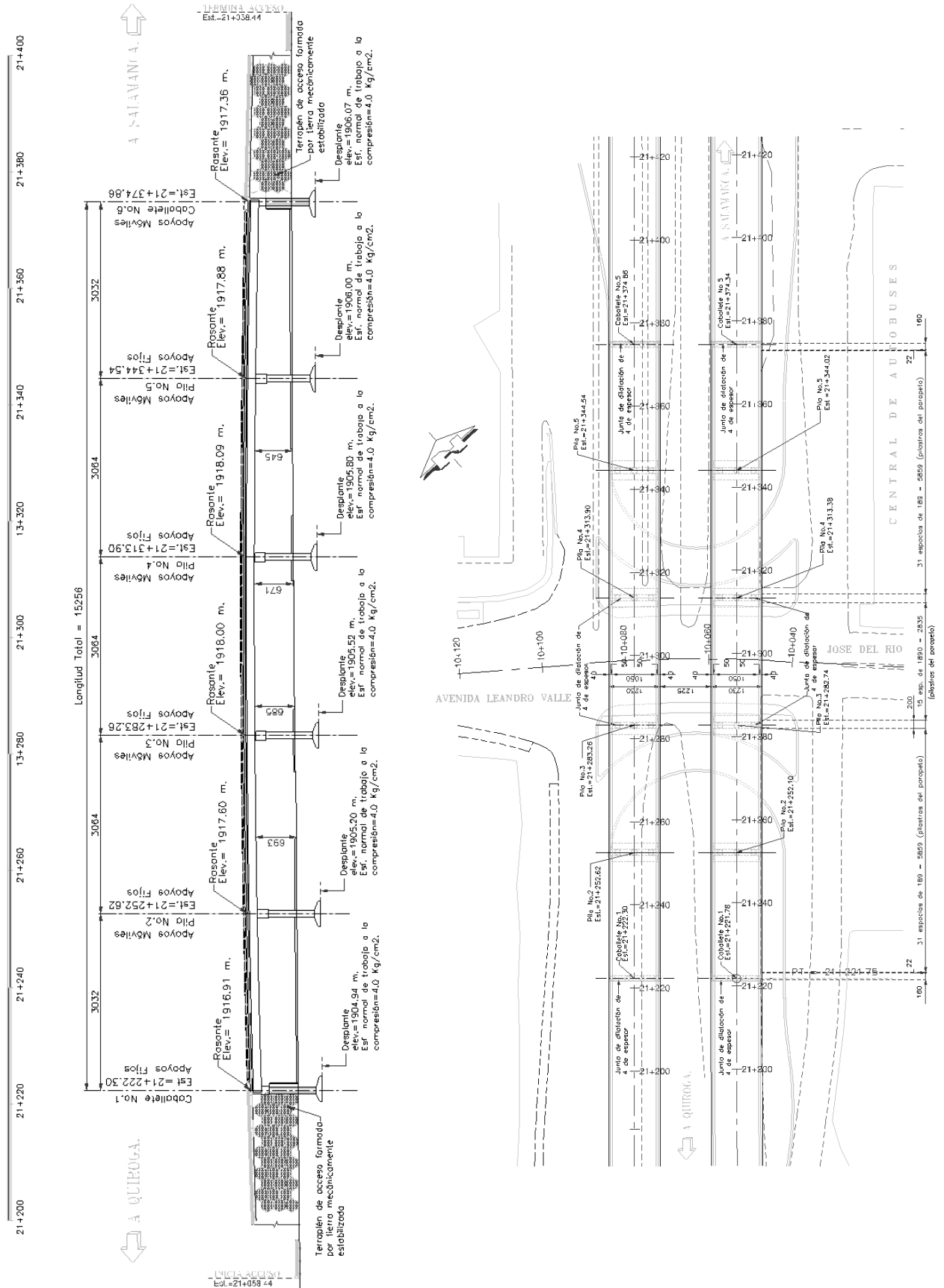


2.1. Mapa de localización del puente La Central.

2.1.1. Plano general del puente

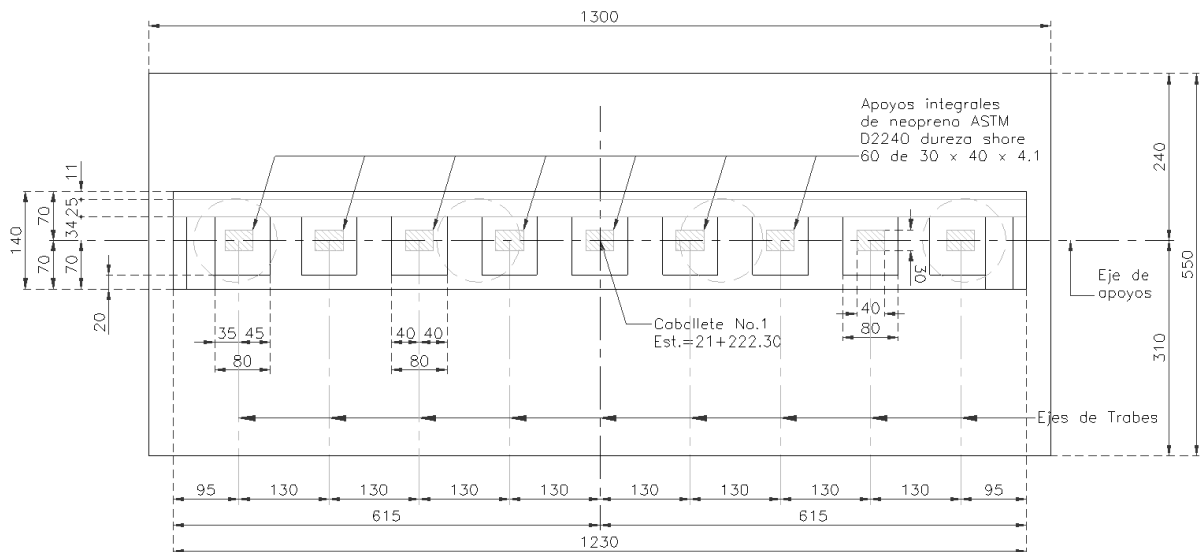
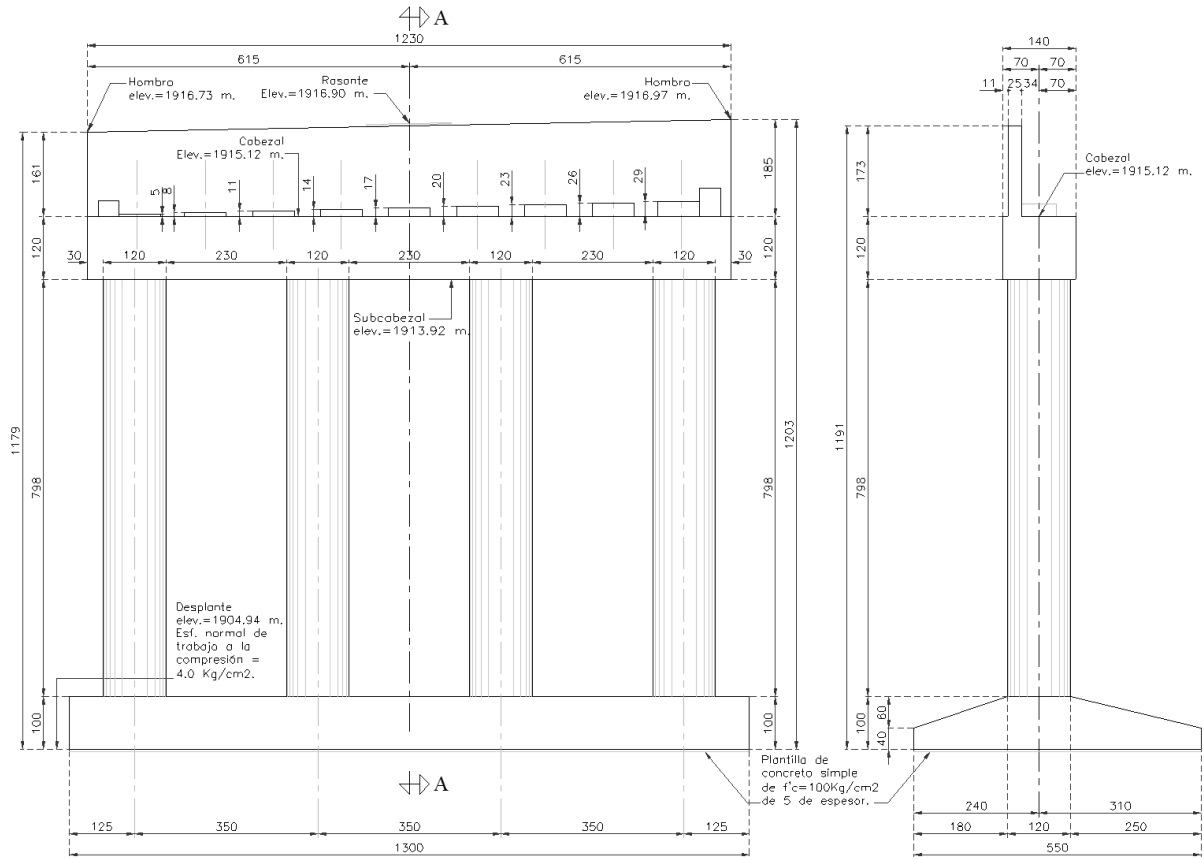
El puente cuenta con una longitud total de 152.56 metros divididos en cinco claros. Las losas son de concreto reforzado con $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ y soportadas por nueve traveses AASHTO tipo IV con $f'c = 400 \text{ kg/cm}^2$. El ancho total es de 12.30 metros donde se albergan 3 carriles. El vehículo de diseño utilizado de acuerdo a la SCT fue el T3-S2-R4.

La medición de vibración ambiental se realizó sobre el cuerpo derecho (dirección Salamanca) abarcando los primeros dos claros en el sentido del cadenamiento.

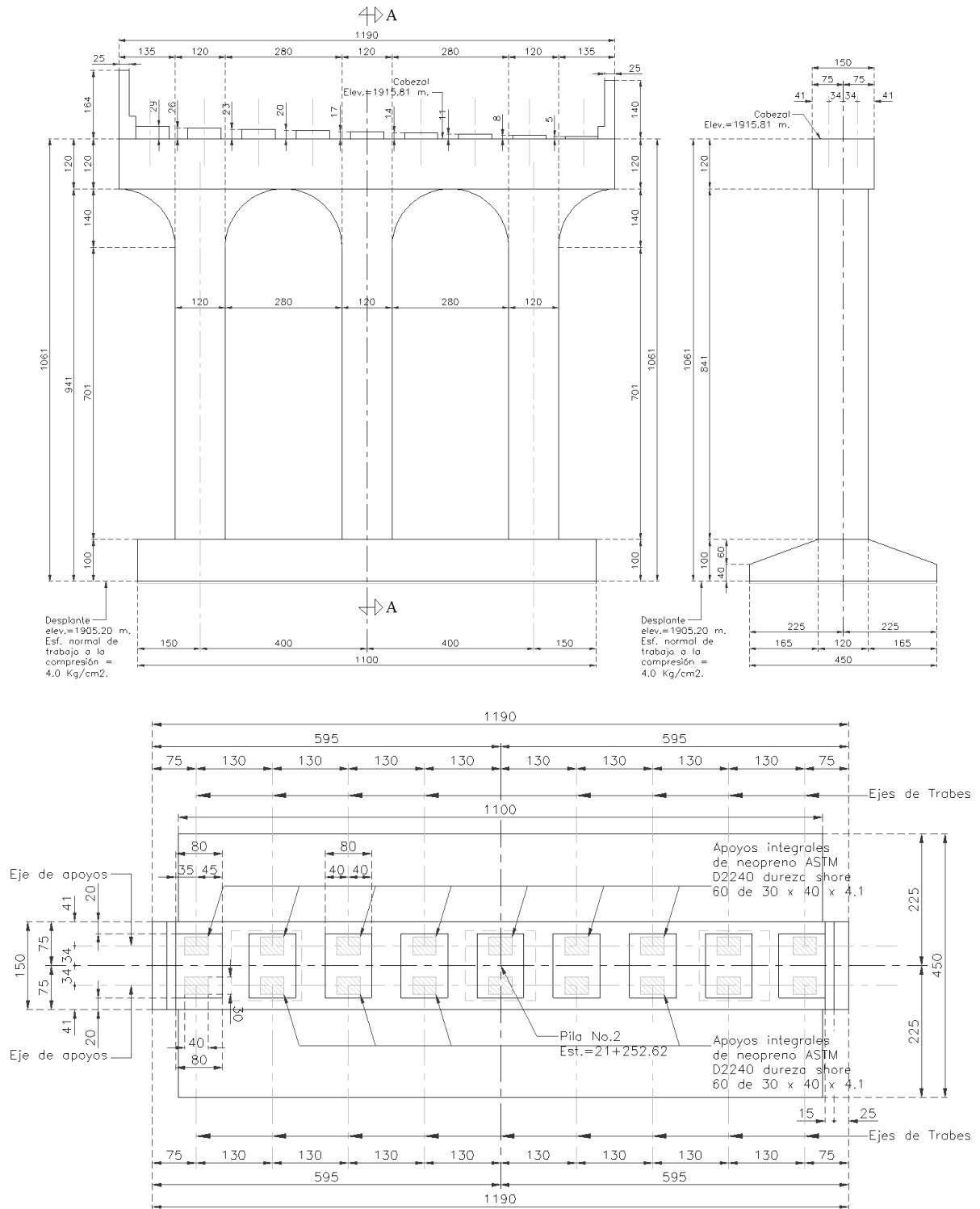


2.2. Corte en elevación y planta.

2.1.2. Subestructura



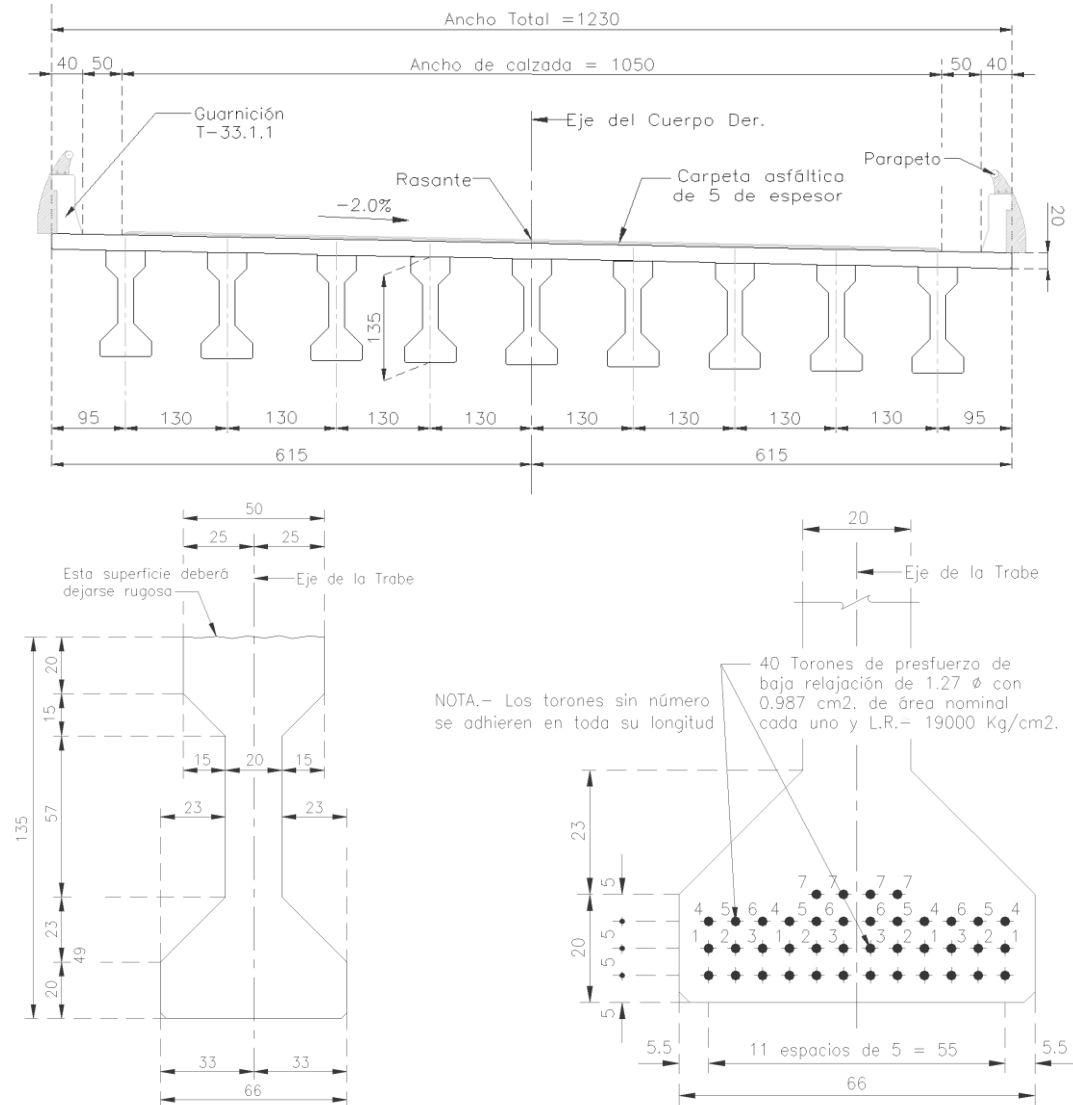
2.3. Corte en elevación, lateral y planta del caballete número uno.



2.4. Corte en elevación, lateral y planta de la pila número dos.

No obstante que las traves son simplemente apoyadas, la losa tiene continuidad en los dos claros analizados. La losa del claro central está desligada de las otras. Esta configuración es simétrica, por lo tanto, los dos claros restantes del puente también son continuos.

2.1.3. Superestructura



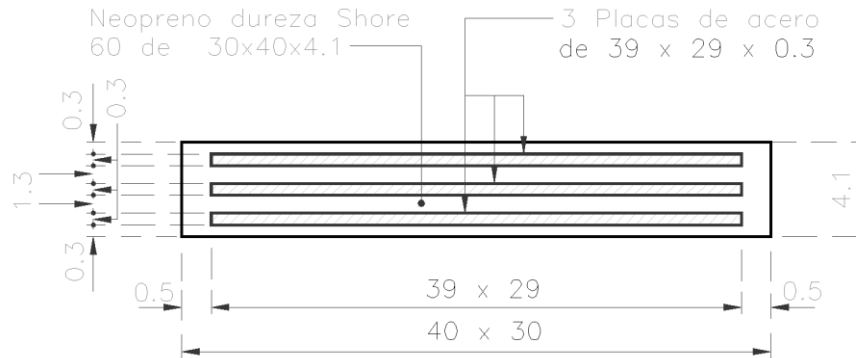
2.5. Corte transversal de la superestructura y distribución de torones

Los torones están encamisados con tubos de plástico en los extremos de las traves en distintas longitudes dependiendo la configuración mostrada en la figura anterior. El esfuerzo inicial de tensado es de 14250 kg/cm^2 . Este encamisado tiene como objetivo reducir esfuerzos en los extremos de la trabe mediante la desadherencia de los cables.

Tabla @ Encamisado de torones en trabe AASHTO tipo IV

No. de torón (ver imagen #)	1	2	3	4	5	6	7
Longitud encamisada (m)	2.30	2.90	3.75	4.20	4.85	5.55	6.25

2.1.4. Apoyos de neopreno

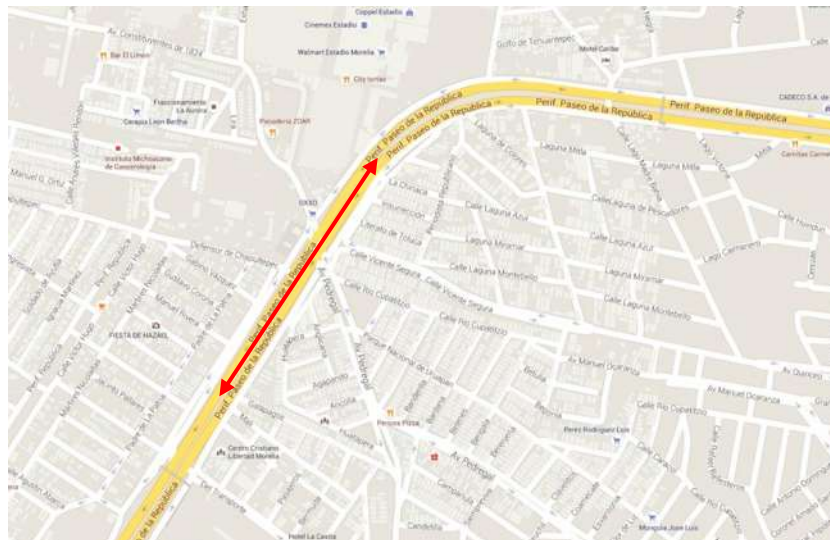


2.6. Detalle de apoyo de neopreno.

Los apoyos de neopreno utilizados tienen la configuración indicada en la figura # (típico en México). Las dimensiones de cada capa se indican en la figura anterior. El espesor total es de 4.1 centímetros. Para este puente la cimentación proyectada fueron zapatas corridas (cimentación superficial).

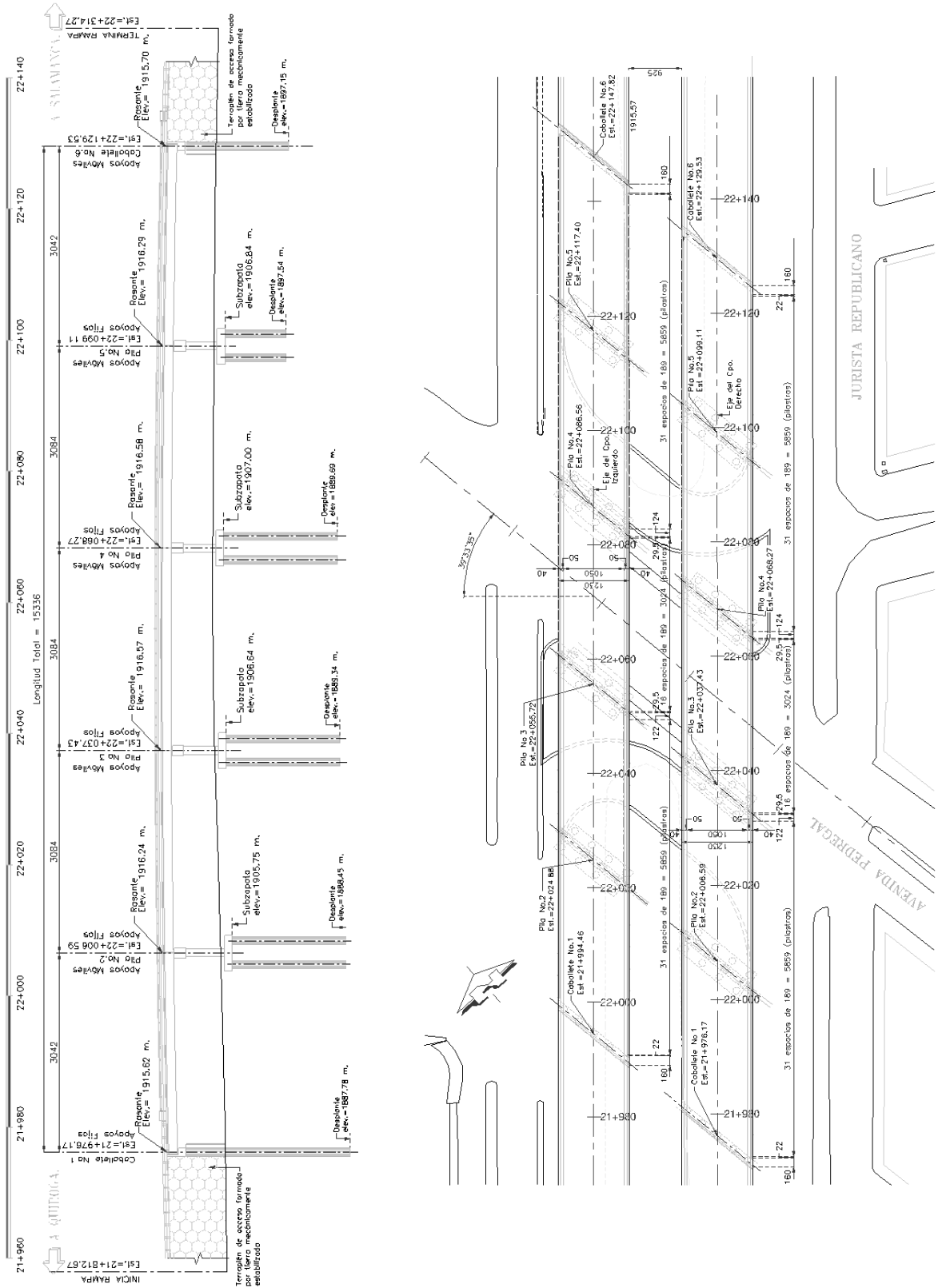
2.2. Puente El Pedregal

El puente El Pedregal es el segundo de los puentes en sentido poniente oriente. Está ubicado sobre el libramiento norte en el kilómetro 22+050. En los alrededores se encuentra un conocido centro comercial. Ubicación geográfica: latitud 19°43'30.4" N y longitud 101°13'27.1" W.



2.7. Mapa de localización del puente El Pedregal.

2.2.1. Plano general del puente

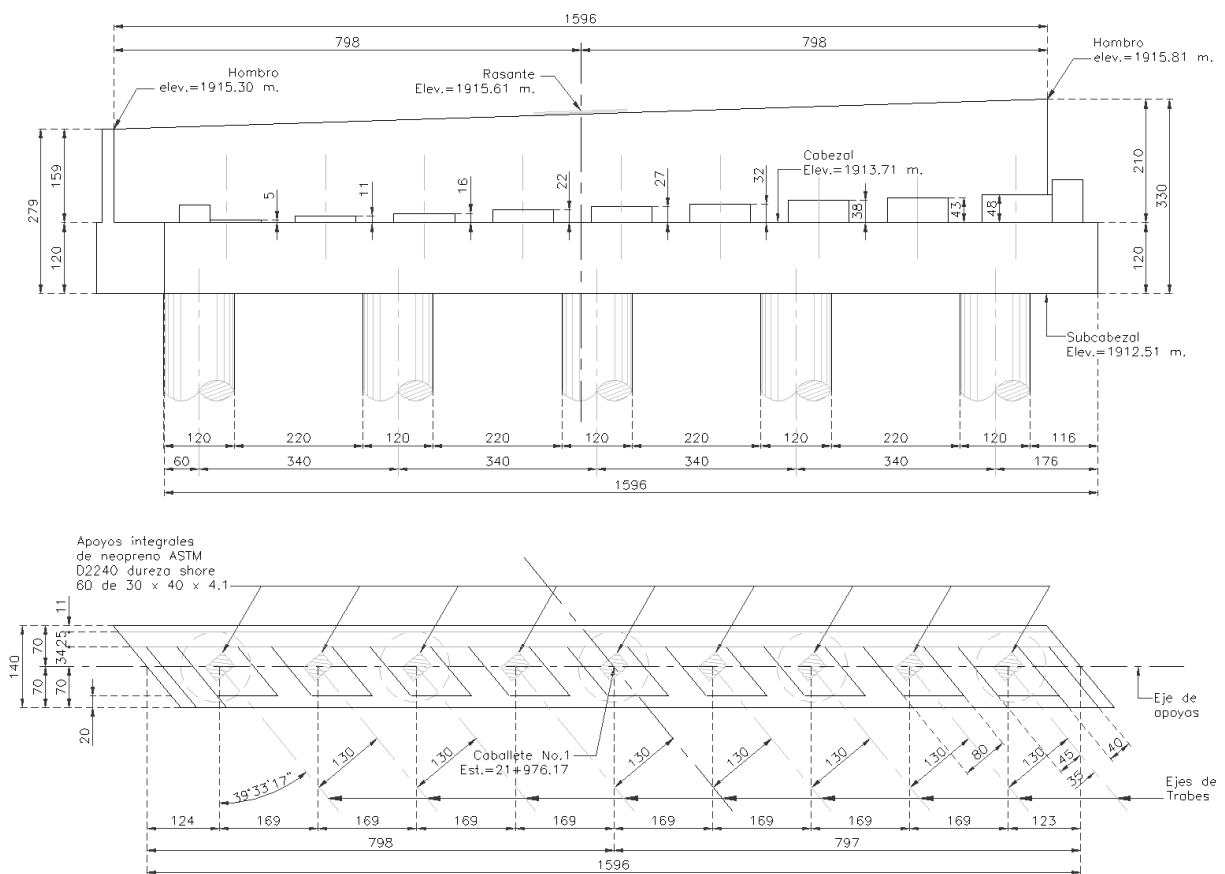


2.8. Corte longitudinal y planta del puente.

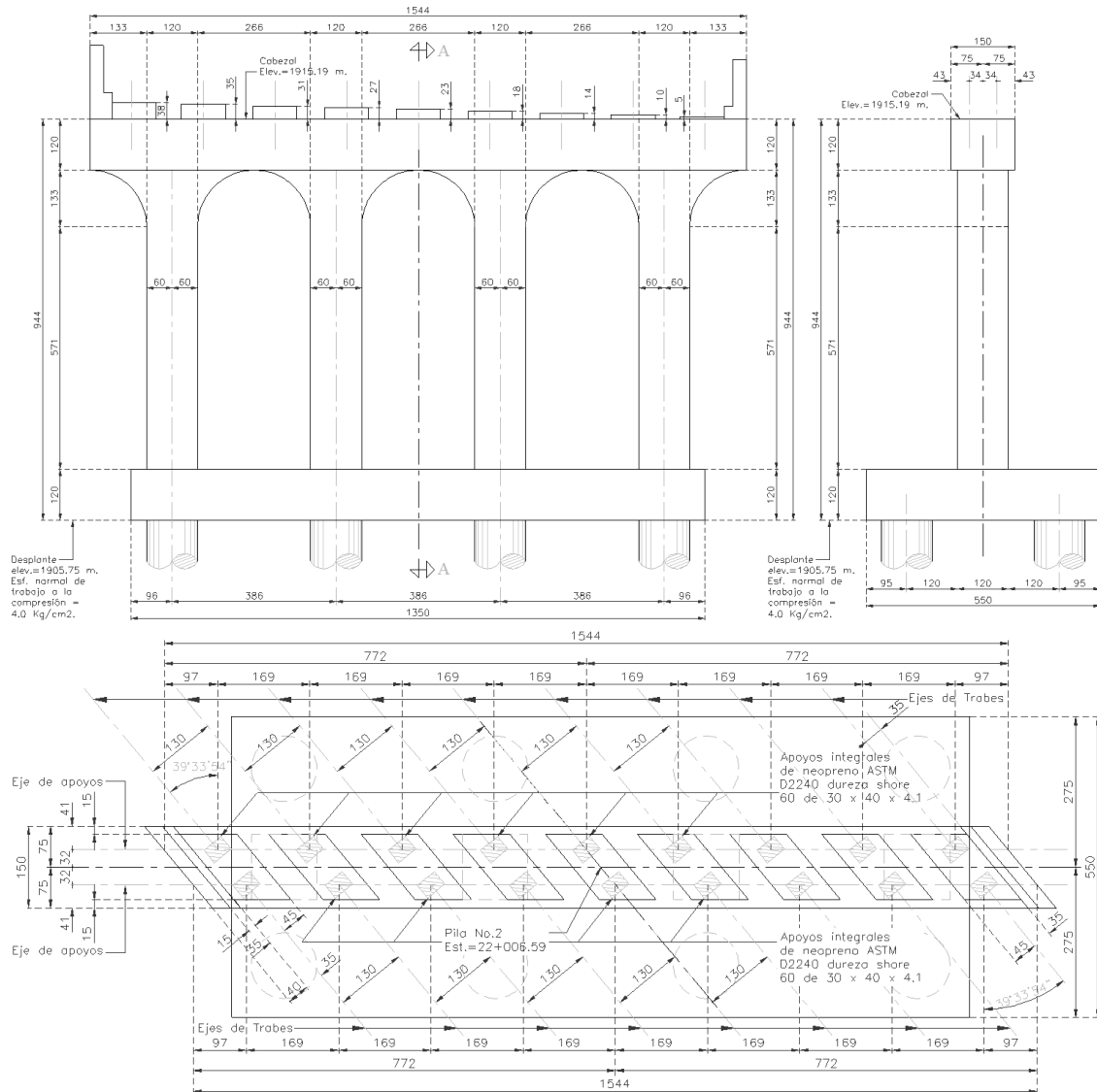
El puente cuenta con una longitud total de 153.36 metros dividida en cinco claros. Las losas son de concreto reforzado con $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ y soportadas por nueve traves AASHTO tipo IV con $f'c = 400 \text{ kg/cm}^2$. El ancho total es de 12.30 metros donde se albergan 3 carriles de circulación. El vehículo de diseño utilizado de acuerdo a la SCT fue el T3-S2-R4.

La medición de vibración ambiental se realizó sobre el cuerpo derecho (dirección Salamanca) sobre los primeros dos claros en el sentido del cadenamamiento. Al igual que el puente La Central, los primeros dos claros tienen continuidad en la losa. El claro central es simplemente apoyado y los últimos dos claros son continuos.

2.2.2. Subestructura

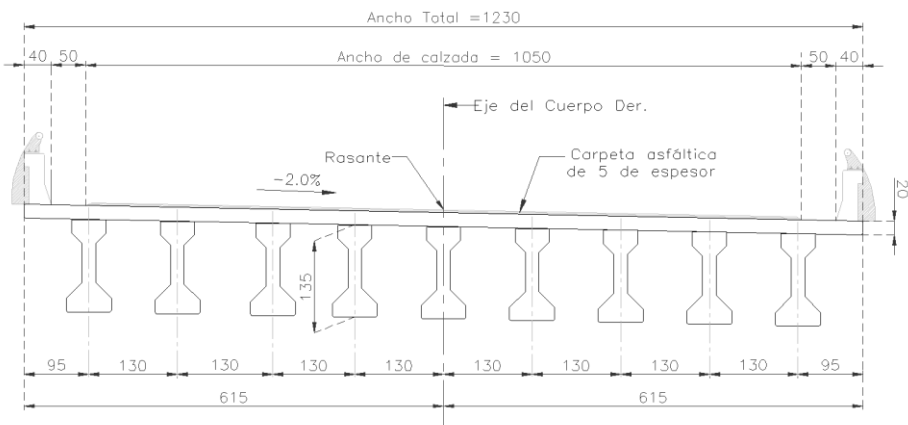


2.9. Corte longitudinal y planta del caballote número uno.



2.10. Corte en elevación, lateral y planta de la pila número dos.

2.2.3. Superestructura



2.11. Corte transversal de la superestructura

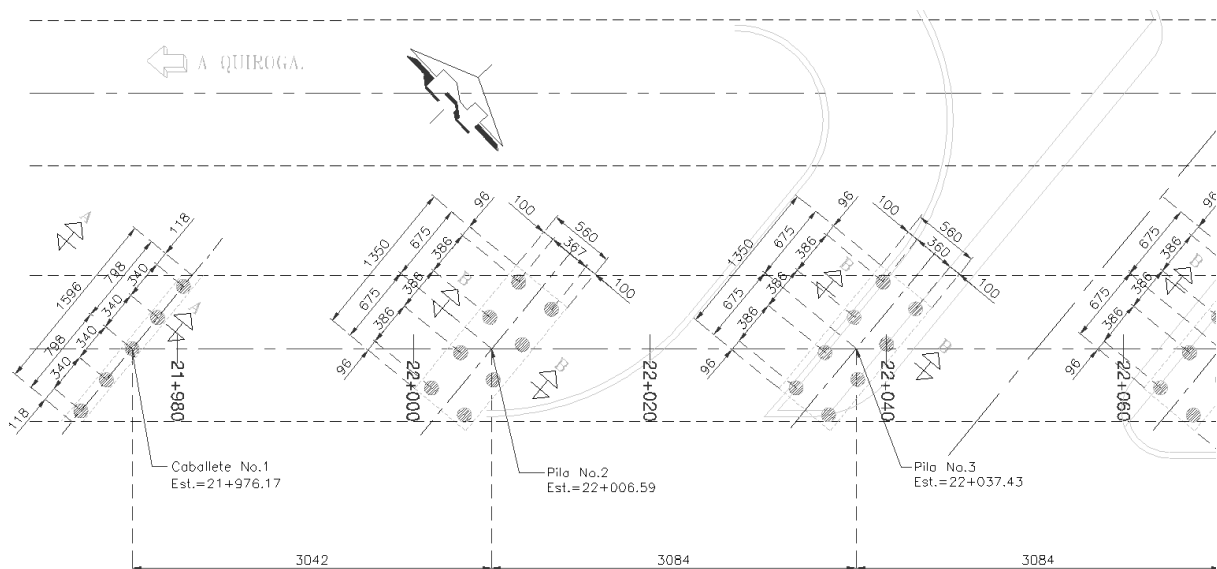
2.2.4. Cimentación

En referencia al puente La Central se pueden apreciar ciertas diferencias, la primera de ellas es que el tablero tiene un esviajamiento de poco más de 39 grados; la cimentación en este puente es profunda con pilas de cimentación de 120 cm de diámetro y una capacidad de carga de 200 toneladas por pila; como se observa en la figura 2.12, los caballetes están soportados por cinco pilas de cimentación y ocho en el caso de las pilas, en este último, en dos filas de cuatro. La profundidad de las distintas pilas de cimentación se resume en la siguiente tabla.

Tabla @ Longitud de pilas de cimentación del puente El Pedregal

Apoyo	Zapata o cabezal (m.s.n.m)	Desplante (m.s.n.m)	Longitud (m)
Caballote no. 1	1912.51	1887.78	25.93
Pila no. 2	1905.75	1888.45	18.50
Pila no. 3	1906.64	1889.34	18.50
Pila no. 4	1907.00	1889.70	18.50
Pila no. 5	1906.84	1897.54	10.50
Caballote no. 6	1912.81	1897.15	16.86

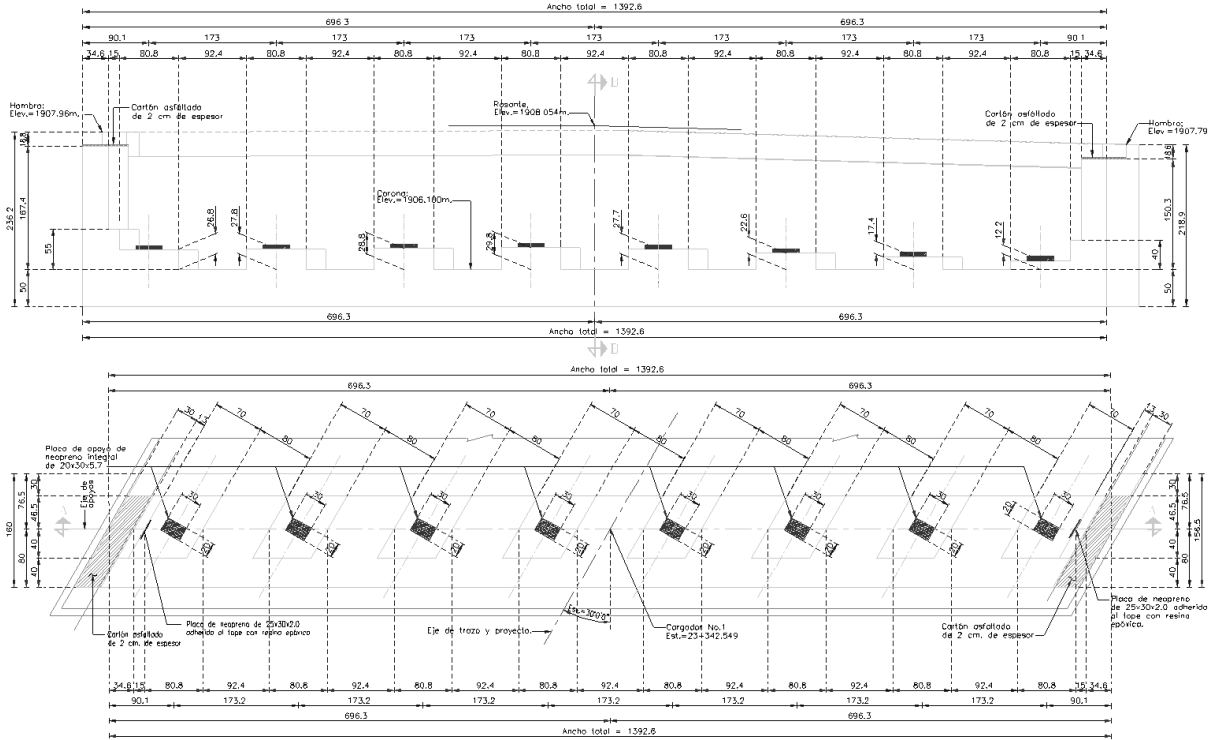
La configuración de las traveses y tipo de apoyos es la misma que para el puente La Central (ver figuras 2.5 y 2.6).



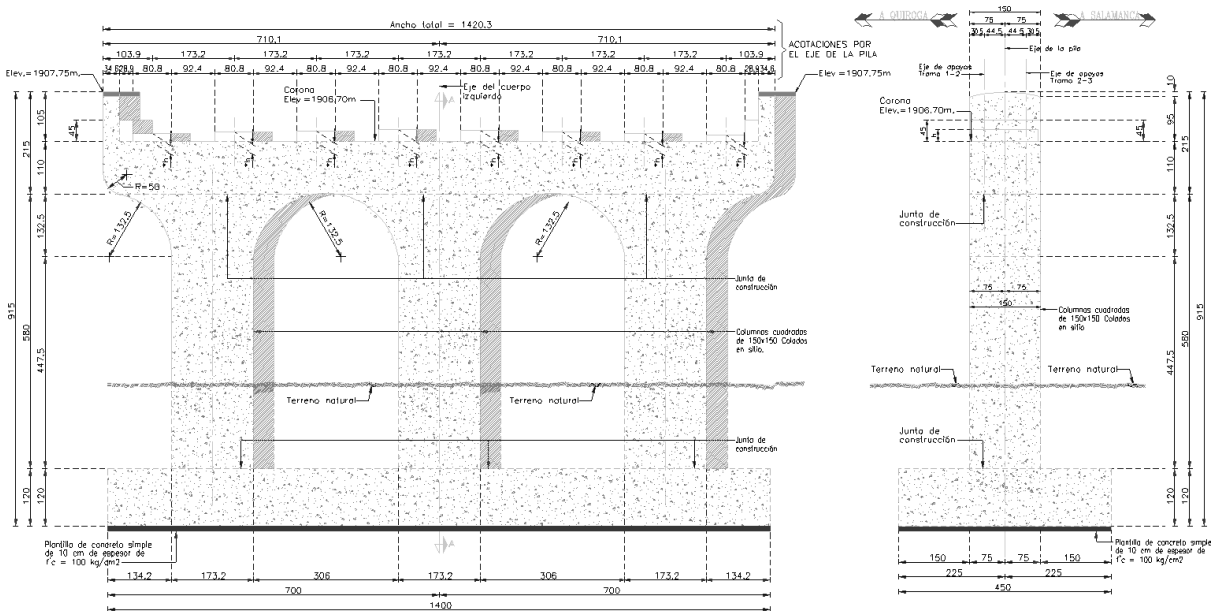
2.12. Ubicación y distribución de las pilas de cimentación.

La medición de vibración ambiental se realizó sobre el cuerpo izquierdo (dirección Quiroga) sobre los primeros dos claros en el sentido del cadenamamiento.

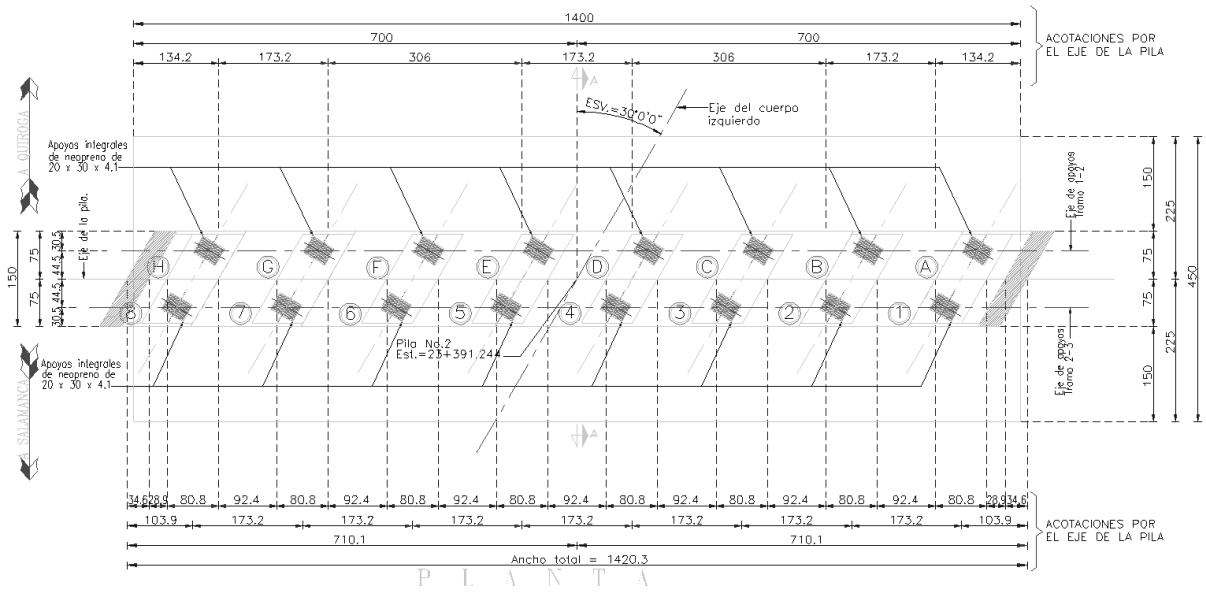
2.3.2. Subestructura



2.16. Corte longitudinal y planta del caballete número uno.

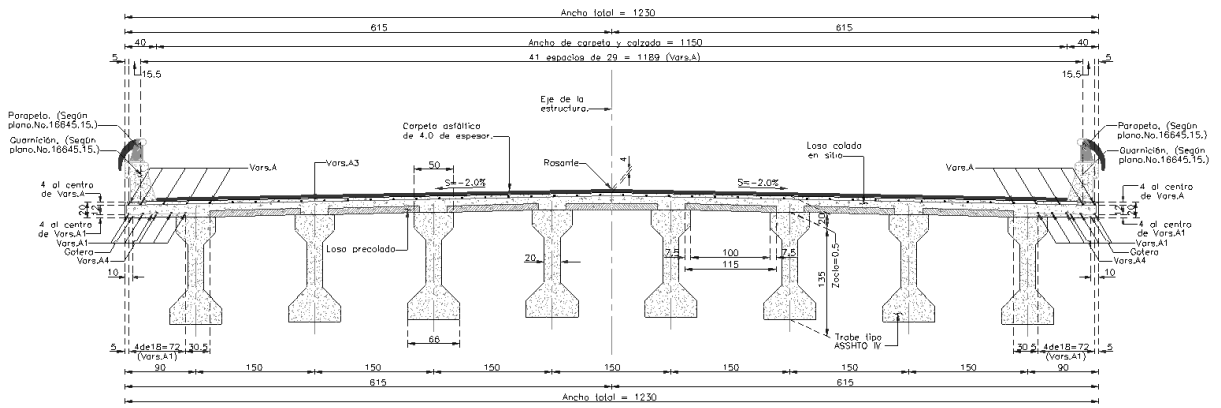


2.17. Corte en elevación y lateral de la pila número dos.

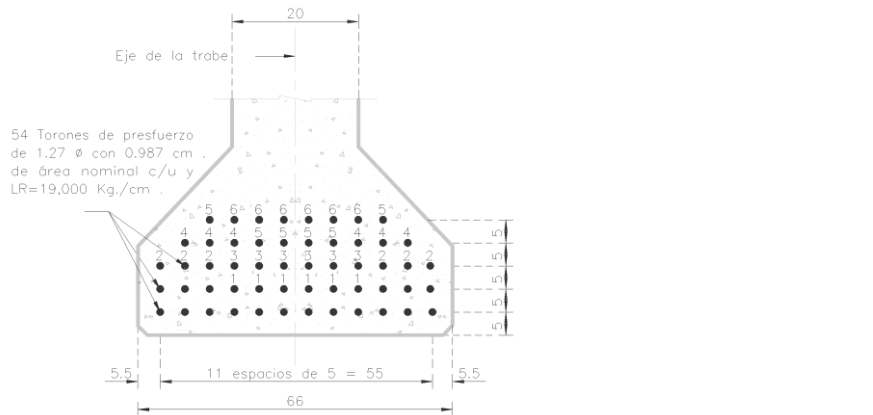


2.18. Planta de la pila número dos.

2.3.3. Superestructura



2.19. Corte transversal de la superestructura



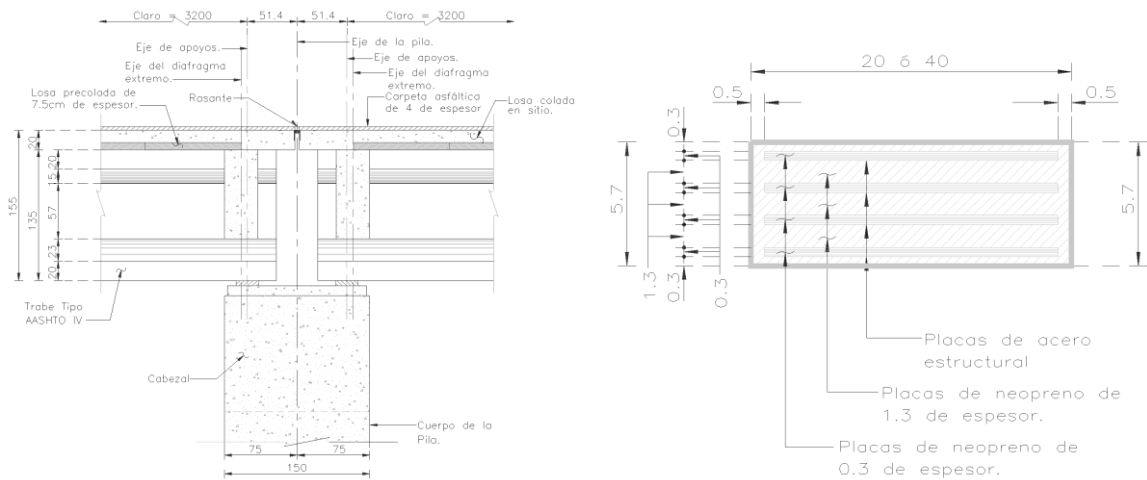
2.20. Distribución de torones en traves.

Al igual que en los casos anteriores, los torones se encamisán con tubos de plástico en los extremos de las traveses, en las longitudes indicadas en la tabla siguiente.

Tabla @ Encamisado de torones en trabe AASHTO tipo IV

No. de torón (ver imagen #)	1	2	3	4	5	6
Longitud encamisada (m)	3.50	5.00	6.20	7.70	10.00	12.20

2.3.4. Apoyos de neopreno



2.21. Apoyos de neopreno

Todos los claros del puente El Lago son simplemente apoyados. Para este puente la empresa proyectista decidió colocar apoyos de un espesor de 5.7 cm sobre los caballetes y de 4.1 cm sobre las pilas.

A continuación, se presenta una tabla con las características de los puentes.

Tabla @ Geometría de los puentes en estudio

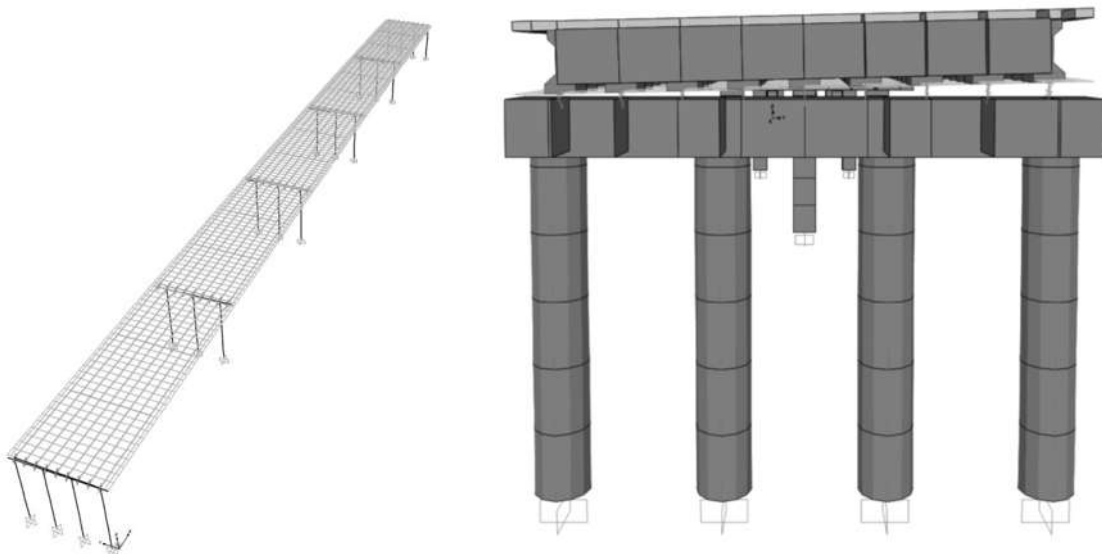
Parámetro	La Central	El Pegregal	El Lago
Longitud total y longitud del claro (m)	152.56 / 30	153.36 / 30	230.16 / 32
Esviajamiento	0	39° 33' 35"	30°
Número de traveses	9	9	8
Espesor (z) del cabezal en caballete / pilas (m)	1.20 / 1.20	1.20 / 1.20	0.50 / 1.10
Número de columnas en caballetes (m)	4	5	-
Número de columnas en pilas (m)	3	4	3
Sección de columnas en caballete (m)	Ø1.20	Ø1.20	-
Sección de columnas en pilas (m)	1.20 / 1.20	1.20 / 1.20	1.74 / 1.50
Espesor / Largo / Ancho de apoyos en caballetes (cm)	4.1 / 30 / 40	4.1 / 30 / 40	5.7 / 20 / 30
Espesor / Largo / Ancho de apoyos en pilas (cm)	4.1 / 30 / 40	4.1 / 30 / 40	4.1 / 20 / 30

* Para el puente El Pedregal, como ya se explicó, se requirió el uso de cimentación profunda. En el caso de los caballetes, el cabezal se apoya directamente sobre las pilas de cimentación.

2.4. Modelos numéricos

Una vez descritas las dimensiones y características de cada puente se realizaron los correspondientes modelos numéricos en el software SAP2000. Lo que se busca con estos modelos es obtener las propiedades dinámicas y compararlas con las obtenidas de las mediciones de campo. En los siguientes apartados se explica cómo se elaboraron los modelos, se describen las consideraciones para cada puente y los resultados que se obtienen del análisis.

2.4.1. Modelo del puente La Central



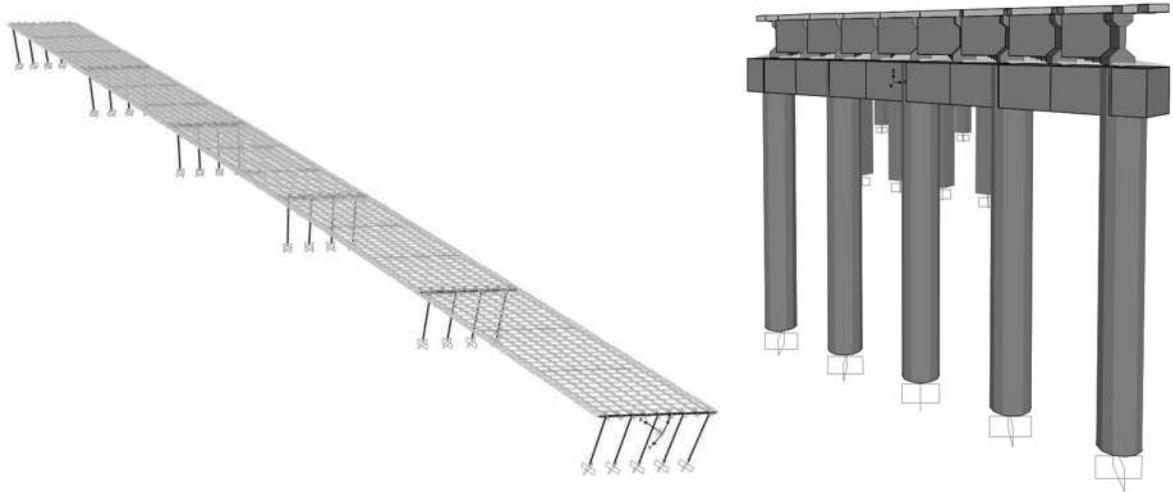
2.22. Vista 3D y perspectiva transversal.

Las columnas, traveses, cabezales y diafragmas se modelaron con elementos tipo frame. Las secciones transversales se indican en los apartados anteriores. Los apoyos de neopreno se modelaron con elementos tipo link de acuerdo a la configuración mostrada en las figuras 2.2 y 2.6. De acuerdo al proyecto geométrico los apoyos están colocados sobre bancos de diferentes alturas. Debido a sus dimensiones estos bancos no presentan deformaciones por flexión, por lo tanto, se tiene la necesidad de modelarlos como barras rígidas, para lo cual se usaron elementos tipo link. Para la losa del puente se utilizaron elementos tipo Shell. Otros elementos no estructurales como los parapetos y el asfalto se modelaron como cargas.

Los elementos columna se discretizaron en seis tramos de aproximadamente 1.5 metros, dependiendo de la altura de las columnas. Los elementos tipo Shell, así como las traveses, se dividieron en tramos de 1 metro longitudinalmente. Transversalmente los elementos Shell están conectados a las traveses.

2.4.2. Modelo del puente el Pedregal

Una característica importante, a diferencia del puente anterior, es la presencia de un esviajamiento de $39^{\circ}33'35''$. Los apoyos de neopreno son iguales que para el puente La Central. Los primeros dos claros, así como los últimos dos, tienen continuidad en la losa.



2.23. Vista 3D y perspectiva transversal.

Cabe mencionar que en el plano general de proyecto (figura 2.8) se especifica la ubicación de apoyos móviles y fijos, como si se tratara de apoyos con propiedades distintas entre sí; pero en los detalles de las pilas y caballetes se encuentra especificado que todos los apoyos (independientemente de su ubicación) tienen las mismas características.

2.4.3. Modelo del puente el lago

Para el puente El Lago (figura 2.24) también se tiene esviajamiento, pero con magnitud de 30° . Los claros son más largos y la losa no tiene continuidad. Los apoyos para este caso varían entre las pilas y los caballetes, para el primero son apoyos de 4.1 cm y para el segundo de 5.7 cm.

El modelado de los elementos estructurales se realizó con el mismo tipo de elementos para los tres puentes. Las losas se discretizaron en 30 tramos al igual que las traveses. Las columnas, a pesar de que son considerablemente más cortas, se dividieron también en seis tramos.

2.4.4. Diseño de apoyos de neopreno

Para el modelado de los apoyos es primordial conocer su rigidez vertical y lateral. Debido a la falta de esta información, se calcularon éstas a partir de la sección transversal y la dureza del neopreno.

Para todos los apoyos se usó neopreno de dureza 60, que de acuerdo a la tabla @ tiene las siguientes propiedades:

- Módulo de elasticidad $E = 45.36 \text{ kg/cm}^2$
- Módulo de cortante $G = 10.81 \text{ kg/cm}^2$
- Constante del material $k = 0.57$
- Módulo de Bulk $K = 11722.73 \text{ kg/cm}^2$

Conocidas las propiedades y la sección del apoyo se requiere calcular tres parámetros: factor de forma, área adherida de neopreno y módulo de compresión. Estos parámetros son necesarios para calcular la rigidez vertical y lateral de los apoyos.

$$S = \frac{L B}{2t_i(L + B)}$$

El factor de forma depende de las dimensiones del apoyo, donde: L es largo, B es ancho y t_i es el espesor de una capa de neopreno.

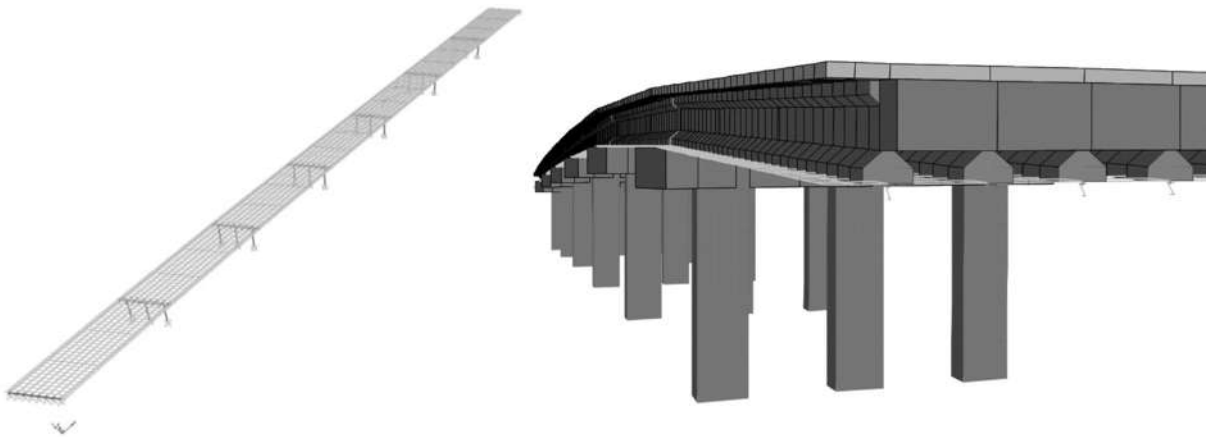
$$E_c = E(1 + 2kS^2)$$

La constante del material se usa para calcular el módulo de compresión del neopreno, donde: E es el módulo de elasticidad y S es el factor de forma.

$$k_l = \frac{GA_b}{T_r} \quad k_v = \frac{E_c A_b}{T_r}$$

Las ecuaciones anteriores corresponden a la rigidez lateral y vertical respectivamente. La primera de estas depende del módulo de cortante y la segunda del módulo de compresión, donde: A_b es el área de neopreno adherida a las placas de acero, es decir, es el área de las placas de acero y T_r es el espesor total de neopreno en el apoyo (tomando en cuenta los recubrimientos).

Finalmente se resume en la siguiente tabla las rigideces correspondientes a cada configuración de apoyo.



2.24. Vista 3D y perspectiva transversal.

Tabla @ Rigidez vertical y lateral de los apoyos de neopreno

Puente / apoyo	k_l	k_v
La Central / 30 x 40 x 4.1	381.90	81059.53
El pedregal / 30 x 40 x 4.1	381.90	81059.53
El Lago / 20 x 30 x 4.1	186.05	19748.71
El Lago / 20 x 30 x 5.7	132.30	14043.53

Tabla @ Propiedades del neopreno convencional [#referencia]

Dureza Shore A	Módulo de elasticidad		Módulo de cortante		Constante del material	Módulo de Bulk	
	lb / plg ²	N / mm ²	lb / plg ²	N / mm ²		lb / plg ²	N / mm ²
30	133	0.92	44	0.3	0.93	145000	1000
35	171	1.18	49	0.37	0.89	145000	1000
40	218	1.5	65	0.45	0.85	145000	1000
45	261	1.8	78	0.54	0.8	145000	1000
50	319	2.2	93	0.64	0.73	149350	1030
55	471	3.25	117	0.81	0.64	158050	1090
60	645	4.45	152	1.06	0.57	166750	1150
65	862	5.85	199	1.37	0.54	175450	1210
70	1066	7.35	251	1.73	0.53	184150	1270
75	1363	9.4	322	2.22	0.52	192850	1330

2.5. Análisis modal

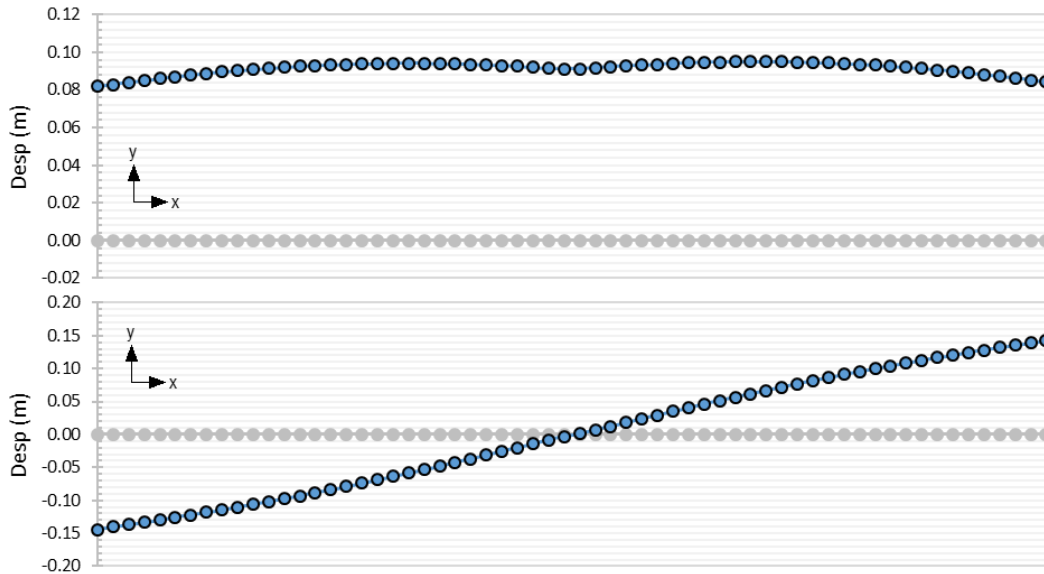
El análisis modal se lleva a cabo con mucha facilidad en el software SAP2000, sin embargo, se debe ser especialmente cuidadoso al momento de definir las fuentes de masa que participarán en el análisis. Si consideramos que al momento de realizar las mediciones los puentes estaban en diferentes etapas de su construcción, la masa correspondiente a cada uno es diferente; por lo tanto, se debe ver reflejado en los modelos. La variación de masa a la que se hace referencia es la carpeta asfáltica.

2.5.1. Análisis modal del puente La Central

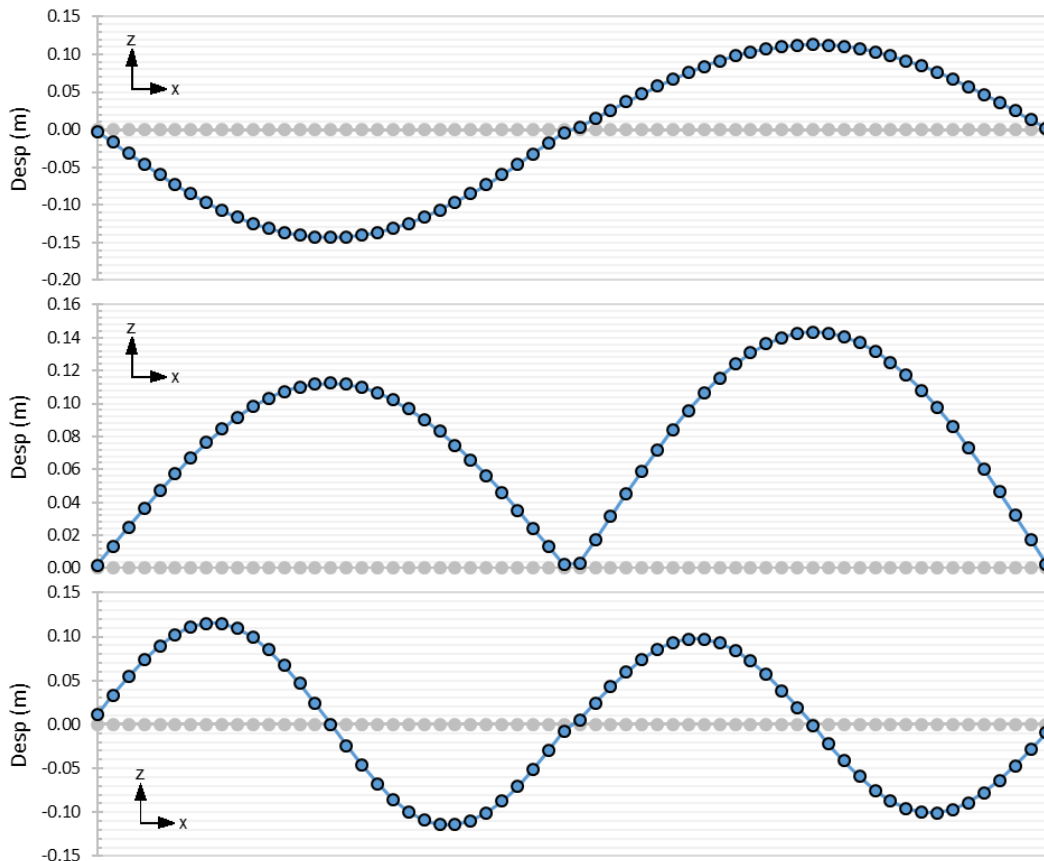
Para el puente La Central se tienen tres casos diferentes: sin carpeta asfáltica, con carpeta en 2/3 partes y con carpeta. Se realizó el análisis de cada caso y se concluyó que, aunque la masa debida a la carpeta es considerable, la diferencia entre los resultados de los modelos es despreciable. A continuación, se muestran los resultados de este análisis.

Es ciertamente complicado lograr una representación adecuada de los modos longitudinales, ya que la losa es muy rígida en esta dirección. Esto significa que cada nodo en la losa se desplaza prácticamente la misma distancia en dirección longitudinal, por lo que bastaría un sólo valor para describir la forma modal adecuadamente.

Para los modos transversales y verticales es ciertamente distinto. Para su representación se tomaron todos los nodos que componen la línea central de los dos claros analizados. En las siguientes figuras se muestran algunos de estos modos.



2.25. Modos transversales, puente La Central. $T = 0.696$ y 0.559 seg. respectivamente.



2.26. Modos verticales, puente La Central. $T = 0.352$, 0.348 y 0.096 seg. respectivamente.

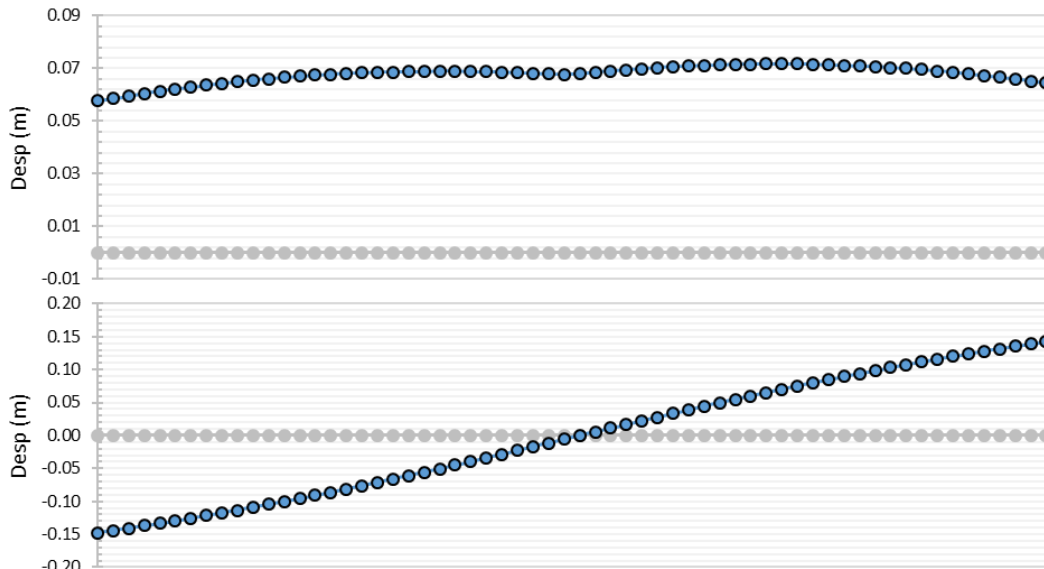
Los cinco modos representados en las figuras anteriores son los principales para el tramo analizado y corresponden a la losa.

Para la obtención de los factores de participación modal, se analizaron los dos claros de interés de manera independiente. Así mismo, de este análisis se obtuvieron las formas modales mostradas anteriormente. La variación con el análisis del puente completo es muy pequeña, ya que se presentan las mismas formas modales y con valores de periodo muy cercanos.

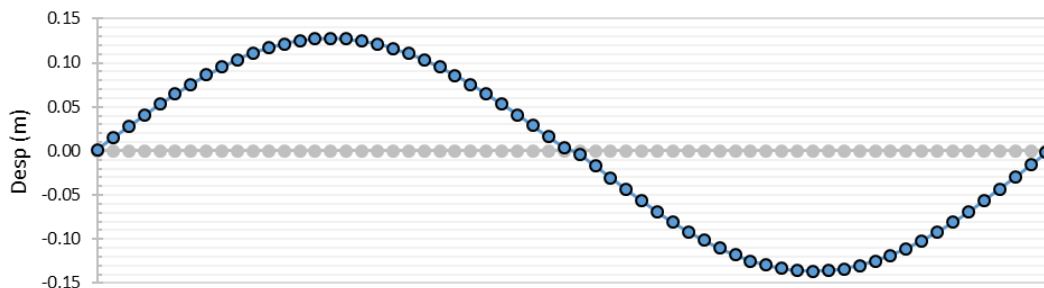
2.5.2. Análisis modal del puente El Pedregal

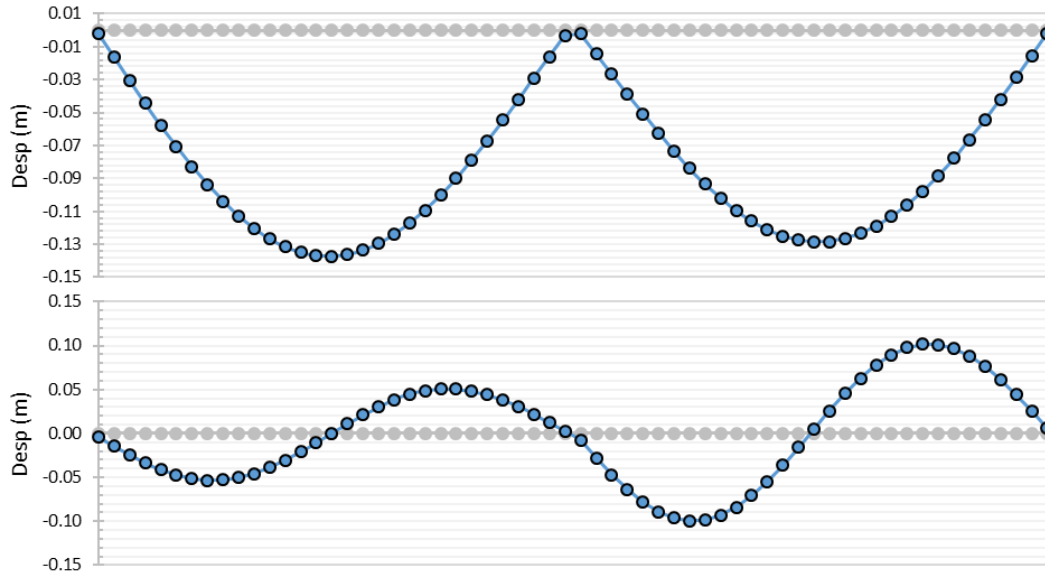
En el puente El Pedregal se presentaron dos casos: con y sin carpeta asfáltica. Al igual que en el modelo anterior, las diferencias producto de la presencia o ausencia de la carpeta asfáltica, no son significativas.

Para las primeras formas modales de traslación se encontró que ambas componentes (transversal y longitudinal) tienen casi la misma relevancia. Esto indicaría que se trata de modos acoplados posiblemente debido al esviajamiento del puente. A continuación, se muestran las principales formas modales. Para los modos acoplados de traslación se despreció, únicamente para su representación, la componente longitudinal.



2.27. Modos transversales, puente El Pedregal. $T = 0.636$ y 0.549 seg. respectivamente.

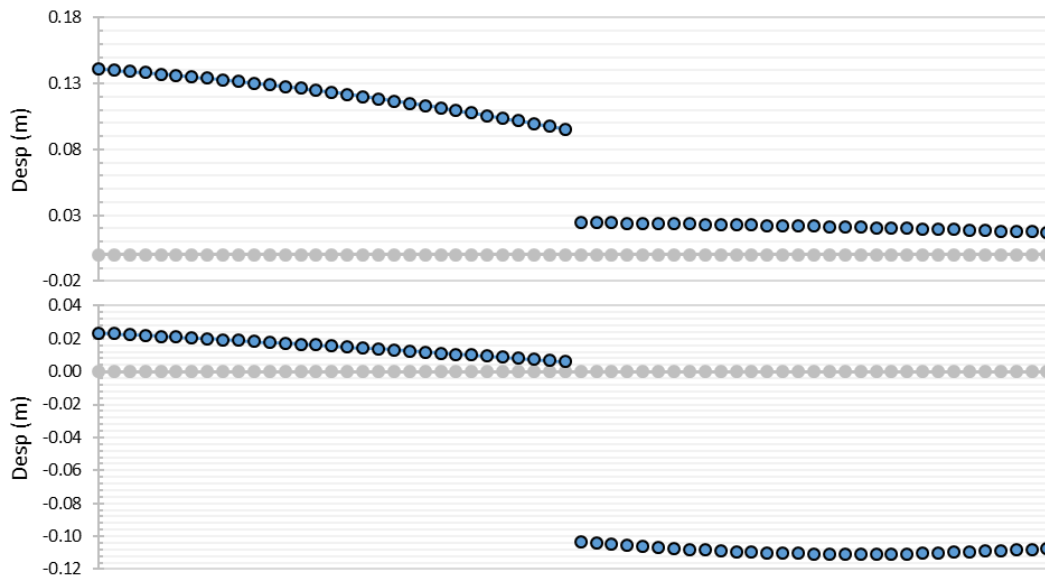


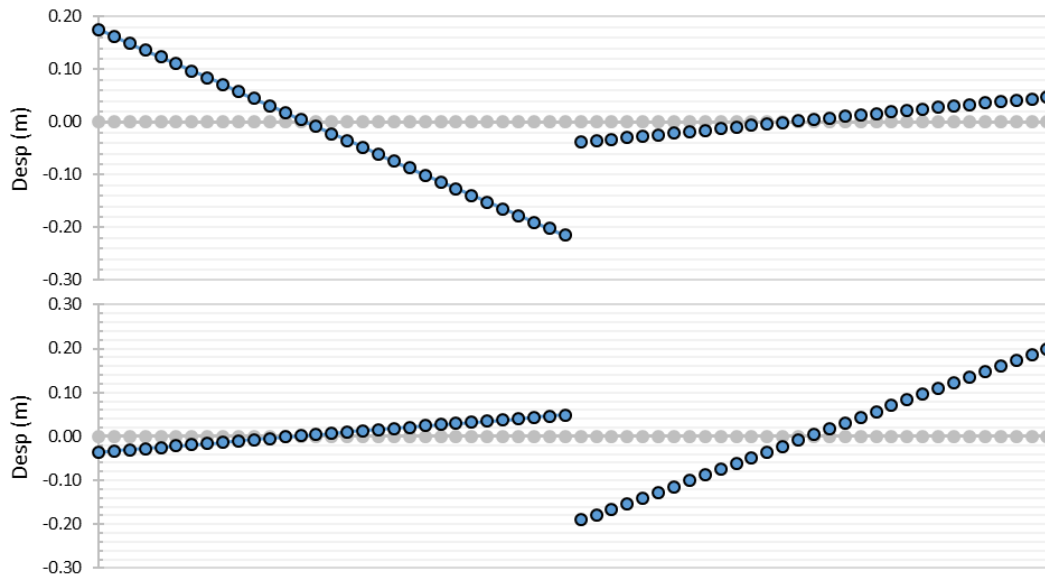


2.28. Modos verticales, puente El Pedregal. $T = 0.331, 0.320$ y 0.095 seg. respectivamente.

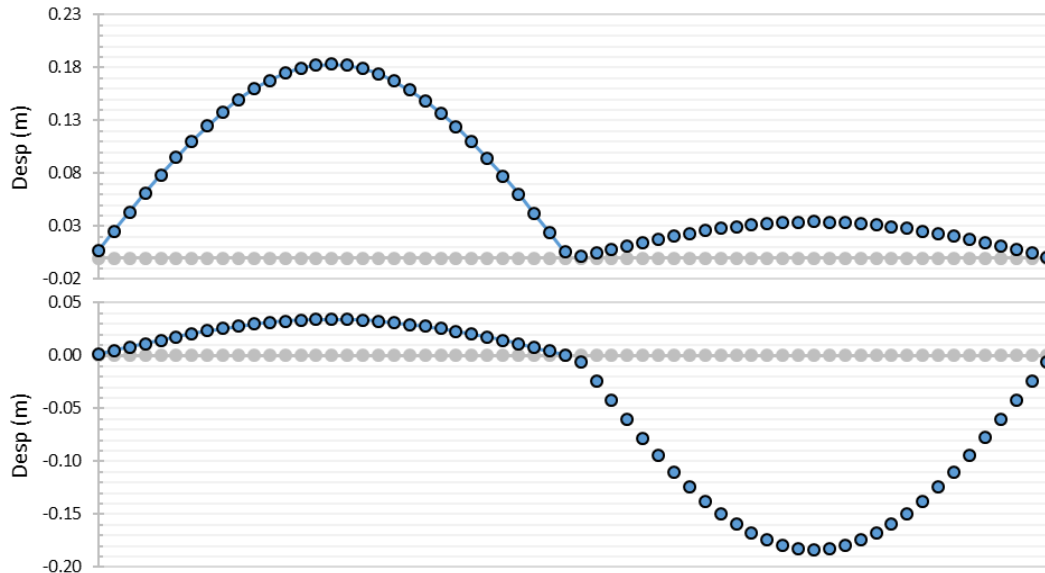
2.5.3. Análisis modal del puente El Lago

Al igual que el puente anterior, en el puente El Lago se midieron las vibraciones ambientales durante dos etapas de su construcción, con y sin carpeta asfáltica. De nuevo las diferencias fueron despreciables. Para este puente se presenta una ligera variación ya antes mencionada, que son los claros simplemente apoyados. Esto lleva a que la representación de los modos se vea como lo muestran las siguientes gráficas. En el primer grupo de gráficas se presentan cuatro modos transversales.





2.29. Modos transversales, puente El Lago. $T = 0.987, 0.916, 0.604$ y 0.569 seg. respectivamente.



2.30. Modos verticales, puente El Lago. $T = 0.401$ y 0.399 seg. respectivamente.



Capítulo III

Vibración ambiental en puentes

Vista inferior del cuerpo izquierdo del puente El Lago.

En este capítulo se describirá el proceso para efectuar una medición de vibración ambiental, los equipos empleados, el procesamiento de las mediciones con el software ARTeMIS y los resultados obtenidos de este análisis.

3.1. Vibración ambiental y equipos

Entendiendo que vibración es la respuesta de una estructura ante una carga o excitación, puede definirse entonces, que vibración ambiental es la respuesta de una estructura sometida a cargas ambientales y/o de servicio. Las cargas ambientales pueden tener distintas fuentes y están principalmente ligadas a lo que ocurre alrededor de la estructura, como puede ser, construcciones aledañas, tránsito vehicular, viento, etc. Las cargas de servicio, a las que se hace mención, son inevitables cuando se quiere medir la vibración ambiental en puentes, ya que resulta problemático interrumpir por completo la circulación vehicular para realizar las mediciones.

Existen dos formas de instrumentar una estructura: la primera es colocar sensores (siempre de manera estratégica) de manera permanente y con monitoreo constante, y en la segunda las mediciones se hacen cada cierto tiempo con equipos portátiles. Para este trabajo se emplearon equipos portátiles como los que se describen en el siguiente apartado.

3.1.1. Acelerómetros

Para medir la vibración ambiental de una estructura se requiere de equipo adecuado. La empresa Kinemetrics fabrica acelerómetros convenientes y prácticos para estudios como este. En particular, el posgrado de ingeniería civil de la UMSNH cuenta con dos sensores triaxiales y tres placas de acero con tres sensores uniaxiales cada una.



3.1. Acelerómetro triaxial y uniaxial, modelos EpiSensor ES-T y ES-U2.

El sensor uniaxial ES-U2 fue diseñado principalmente para aplicaciones de ingeniería estructural, aunque puede ser usado para otros propósitos. El sensor triaxial ES-T consiste en tres sensores

EpiSensor uniaxiales montados ortogonalmente en un pequeño empaque muy práctico. Estos sensores pueden registrar aceleraciones de hasta 4g y tan bajas como las producidas por ruido ambiental. El ancho de banda fue mejorado hasta los 200 Hz para permitir a los ingenieros o científicos estudiar movimientos a altas frecuencias.



3.2. Vista real de los sensores empleados en las mediciones.

3.1.2. Medición de vibración ambiental

Para realizar una medición de vibración ambiental se requiere primero seleccionar la estructura a estudiar, después debe proyectarse la posición los sensores en función del espacio disponible en la estructura y de las formas modales que esperan obtenerse. Además, es fundamental contar con equipo adecuado como el descrito en 3.1.1, así como software para la interpretación de los registros y para su procesamiento.

Para este trabajo los casos de estudio son tres puentes nuevos de concreto ubicados en el libramiento norte de Morelia, Mich. Dichos puentes se describen extensamente en el capítulo II.

La posición de los sensores debe ser tal que con la menor cantidad de mediciones se obtenga la mayor información posible. Si lo que se busca es identificar ciertas formas modales, bastaría con ubicar los sensores donde se espera se presenten las mayores amplitudes de dichos modos. Es decir, para un claro dado (tratándose de puentes), si se coloca un solo sensor al centro se obtendrá únicamente un primer modo vertical. Si se colocaran tres sensores a los cuartos del claro, se podría obtener un segundo y quizás un tercer modo vertical.

Para las mediciones de este trabajo el equipo con el que se contó fueron tres placas con tres sensores ES-U2 (uniaxiales) y dos sensores ES-T (triaxiales).

En cuanto al software empleado para el procesamiento de los datos se tiene al programa ARTeMIS Modal Pro de la empresa Structural Vibration Solutions. Este software permite separar los patrones de vibración que pueden medirse físicamente con acelerómetros en formas modales independientes a través de un análisis modal operacional. Se le llama operacional cuando se trata del análisis de la respuesta de estructuras reales, tal como puentes, edificios, presas, etc. También está el análisis modal experimental que se refiere al análisis de modelos en laboratorios.

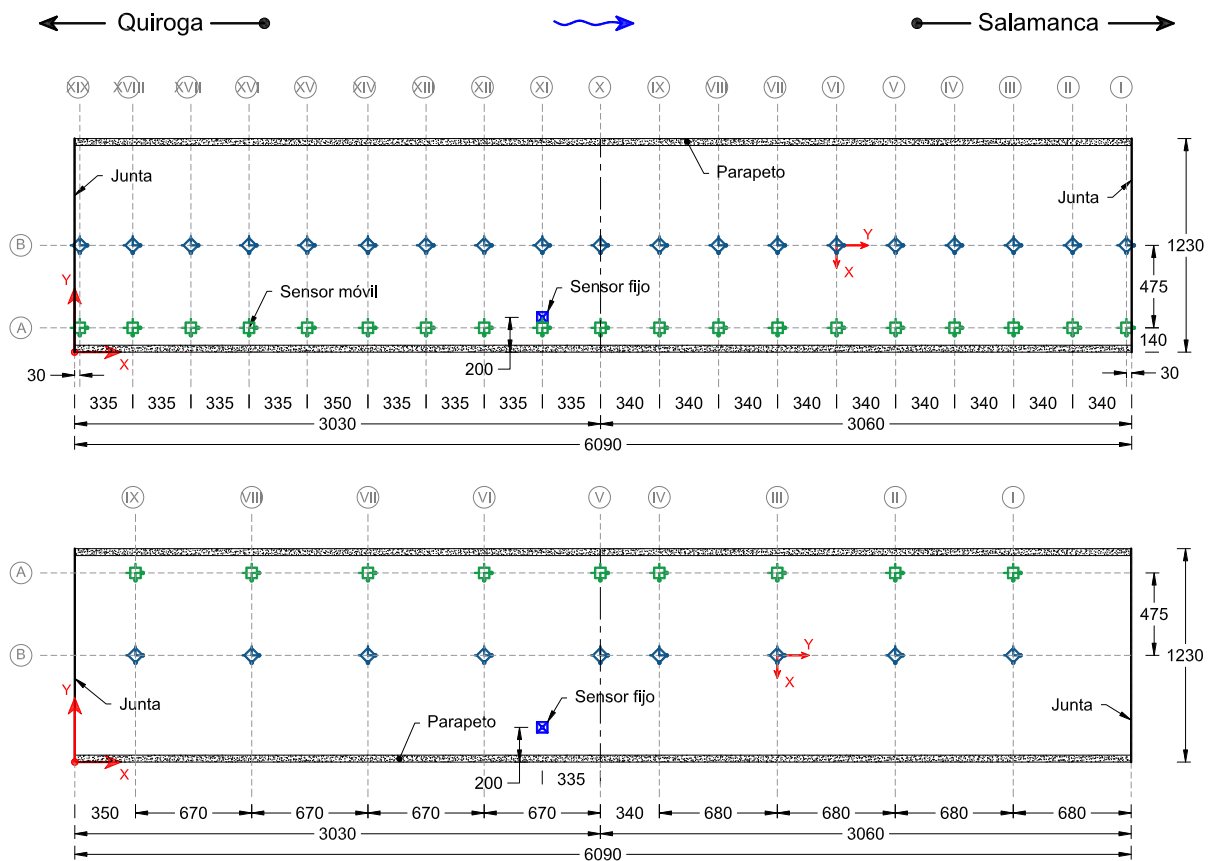
Adicionalmente una parte importante de un estudio de vibración ambiental es realizar mediciones periódicas. Esto con el fin de detectar posibles cambios en las propiedades dinámicas de las estructuras, que en caso de presentarse indicarían la presencia de daño en la estructura. A esto se le conoce como monitoreo de la salud estructural. Para este trabajo, se realizaron tres mediciones para cada puente, las cuales se resumen a continuación por fecha y puente.

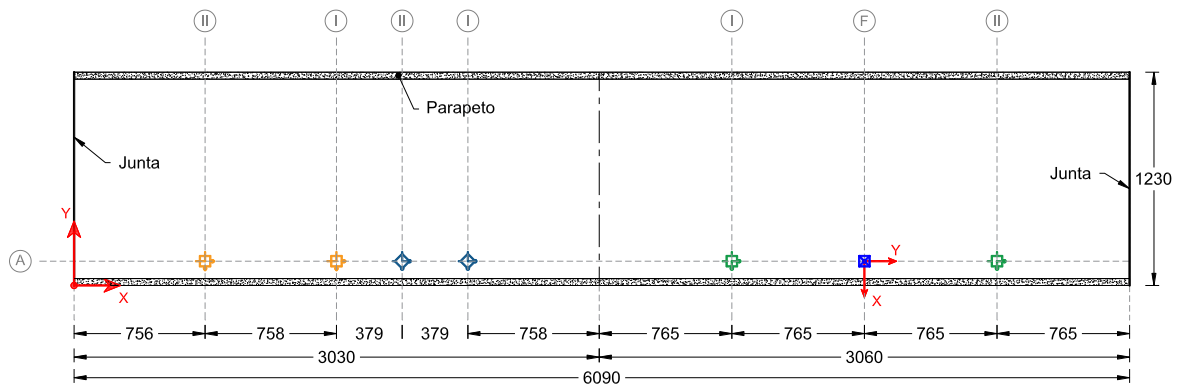
Tabla @ Histórico de mediciones

Fecha	15/11/14	12/12/14	10/01/15	12/01/15	20/02/15	24/02/15	30/11/15
Puente	Central	Central	Lago	Pedregal	Lago	Pedregal	Central, Lago y Pedregal

Para la instrumentación de los puentes, el posicionamiento de sensores es esencial y es el objetivo principal de este estudio. Es lógico pensar que entre más posiciones medidas o registradas con sensores el resultado será más preciso y así es. La cuestión no es simplemente instrumentar toda la estructura con sensores (lo cual sería muy costoso tanto en tiempo como en lo económico), sino buscar el mínimo necesario para estimar adecuadamente los parámetros dinámicos de la estructura.

Las siguientes figuras muestran la posición final de los sensores para cada medición realizada. El primer grupo de croquis representa las tres mediciones realizadas al puente La Central.





3.3. Croquis de mediciones del puente La Central.

Como se aprecia en las figuras anteriores, la instrumentación no fue constante debido a varios problemas. El primero fue la falla de la placa tres, que afectó las primeras dos mediciones y llevó a la pérdida de toda una línea de información. El segundo problema fue la falta de una adecuada planeación a largo plazo. Por último, la tercera figura muestra una sola línea de mediciones debido a que el puente ya se encontraba en servicio y detener totalmente el tráfico en la zona es muy complicado.

En los tres casos los sensores se colocaron de modo que el eje "y" coincidiera con el eje longitudinal del puente. Cabe resaltar que, para la primera medición, el puente aun no tenía carpeta asfáltica; para la segunda medición se había colocado carpeta en 2/3 partes y para la tercera medición se tenía en su totalidad la carpeta asfáltica.



3.4. Mediciones en el puente La Central el día 15/11/2014.

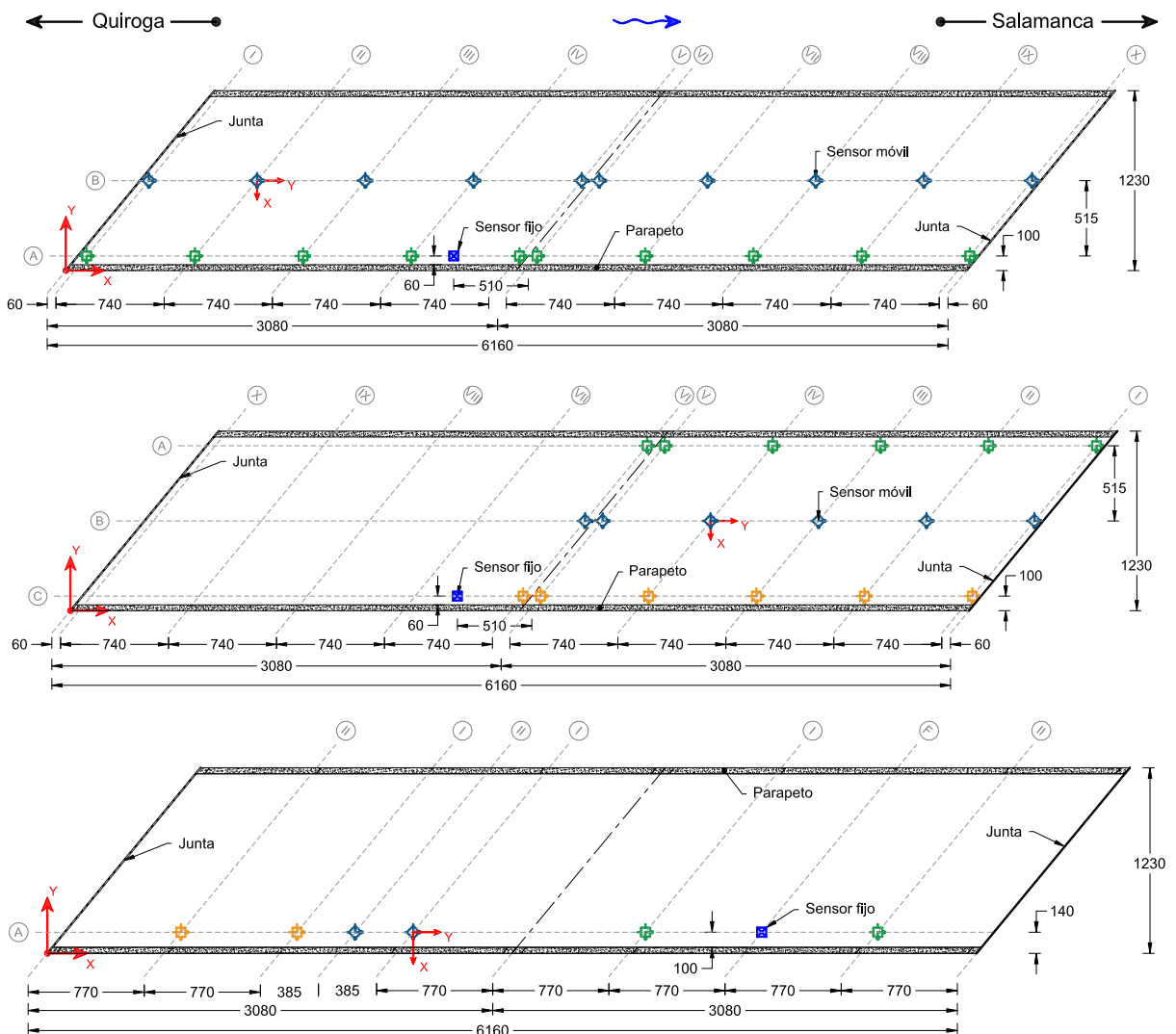


3.5. Mediciones en el puente La Central el día 12/12/2014.



3.6. Mediciones en el puente La Central el día 30/11/2015.

El siguiente grupo de croquis representa las tres mediciones realizadas en el puente El Pedregal. Al igual que en el puente La Central, debido a la falla de la placa 3 se perdió una línea de datos en la primera medición. Para la segunda medición se empleó el segundo sensor triaxial como reemplazo, pero debido a que la obra estaba en proceso no se pudo terminar la medición del puente. La tercera medición presentó los mismos inconvenientes que en el puente anterior.



3.7. Croquis de mediciones del puente El Pedregal.

Para el puente El Pedregal, las primeras dos mediciones se realizaron cuando aún no se tenía carpeta asfáltica. Para la última medición el puente se encontraba en servicio. La posición de los sensores para este puente se respetó que fuera a los cuartos del claro.

A continuación, se muestran algunas imágenes de las mediciones.



3.8. Mediciones en el puente El Pedregal el día 12/01/2015.

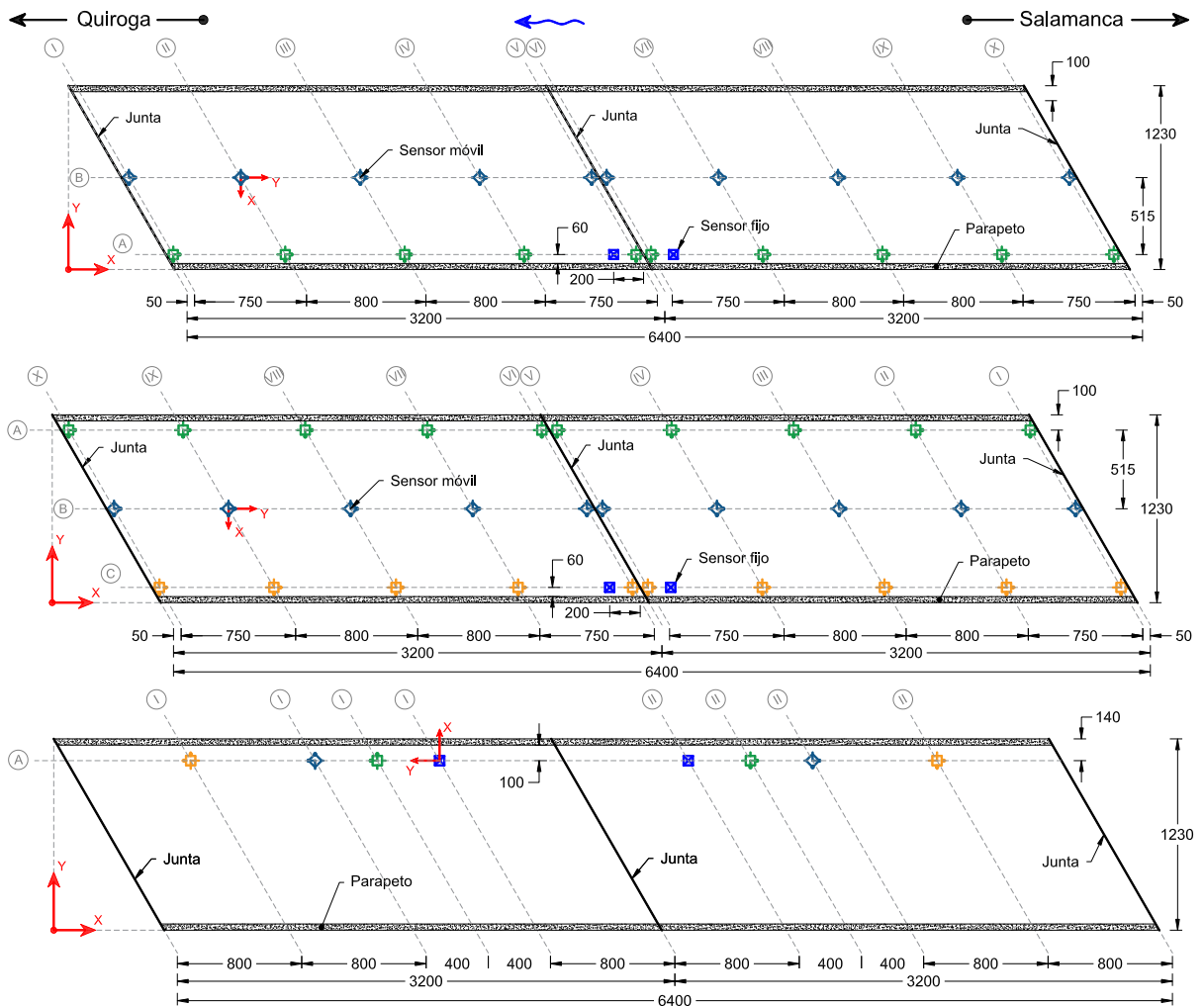


3.9. Mediciones en el puente El Pedregal el día 24/02/2015.



3.10. Mediciones en el puente El Pedregal el día 30/11/2015.

Finalmente, las mediciones del puente El Lago se describen con el siguiente grupo de croquis. La primera medición sobre este puente también resultó afectada por la falla de la placa 3. Para la segunda y tercera medición no se tuvieron contratiempos. De la misma manera que para el puente El Pedregal, se mantuvo la posición de los sensores a los cuartos del claro.



3.11. Croquis de mediciones del puente El Lago.

La segunda medición es la única en la que se logró un barrido completo de la superestructura. En este puente solo la primera medición se realizó cuando aún no había carpeta asfáltica. Como se puede apreciar en los croquis, debido a la existencia de una junta que separa los claros, se tuvo la necesidad de instrumentar los claros individualmente. Las mediciones, al igual que en el puente El Pedregal, siguieron el esviamiento respectivo. Las imágenes siguientes muestran las características descritas.



3.12. Medición sobre el puente El Lago el día 10/01/2015.



3.13. Medición sobre el puente El Lago el día 20/02/2015.



3.14. Medición sobre el puente El Lago el día 30/11/2015.

Resumiendo, es necesario resaltar los siguientes problemas que se presentaron en las mediciones de vibración ambiental.

- La falla de la placa con número tres afectó cuatro mediciones (dos del puente La Central y una tanto para el puente El Pedregal como para el puente El Lago) debido a que no se revisaron los registros obtenidos en su debido momento.
- La falta de una adecuada planeación a largo plazo (respecto al posicionamiento de los sensores) dificulta llevar a cabo una correcta optimización, así como un buen monitoreo de la salud estructural.

Una vez se tienen las mediciones de vibración ambiental, el paso que sigue es realizar un análisis modal con el software disponible.

3.2. Análisis modal operacional

El análisis modal operacional (OMA por sus siglas en inglés) se emplea para obtener los parámetros dinámicos de una estructura bajo sus condiciones de operación. Las mediciones que emplea este análisis son las vibraciones naturales de las estructuras, que se miden con la ayuda de acelerómetros. Estas mediciones son relativamente rápidas y representativas de las condiciones reales de funcionamiento de una estructura. Sin embargo, como la intensidad de las

vibraciones naturales es muy baja y éstas suelen estar contaminadas con ruido, su análisis es más complicado.

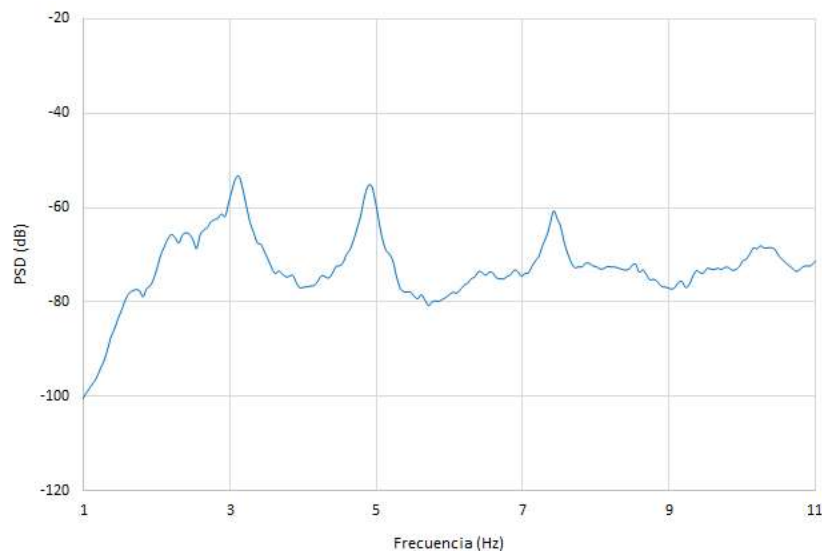
Existen varias técnicas para llevar a cabo un análisis modal operacional y se clasifican en dos, las que se desarrollan en el dominio del tiempo y en el dominio de frecuencia. En el dominio de la frecuencia se encuentran técnicas como la identificación de picos (PP), la descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD) y la descomposición en el dominio de la frecuencia mejorada (EFDD). En el dominio del tiempo por su parte se tiene la técnica de excitación natural (NExT) y la identificación con subespacios estocásticos (SSI).

En el presente trabajo solo se mostrarán las técnicas en el dominio de la frecuencia PP (identificación de picos) y FDD (descomposición en el dominio de la frecuencia).

3.2.1. Identificación de picos (PP)

Es la técnica de identificación más simple y se desarrolla en el dominio de la frecuencia. Su concepto se basa en que la función de respuesta alcanza valores extremos cerca de las frecuencias naturales de la estructura. Estas frecuencias naturales se determinan con los picos que se presentan en la gráfica de la función de densidad espectral de potencia (PSD por sus siglas en inglés). Esta gráfica representa como se distribuye la energía para cada frecuencia transformando las aceleraciones medidas al dominio de la frecuencia a través de la transformada discreta de Fourier.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de la gráfica de la función de densidad espectral de potencia, donde los picos representan las frecuencias naturales.



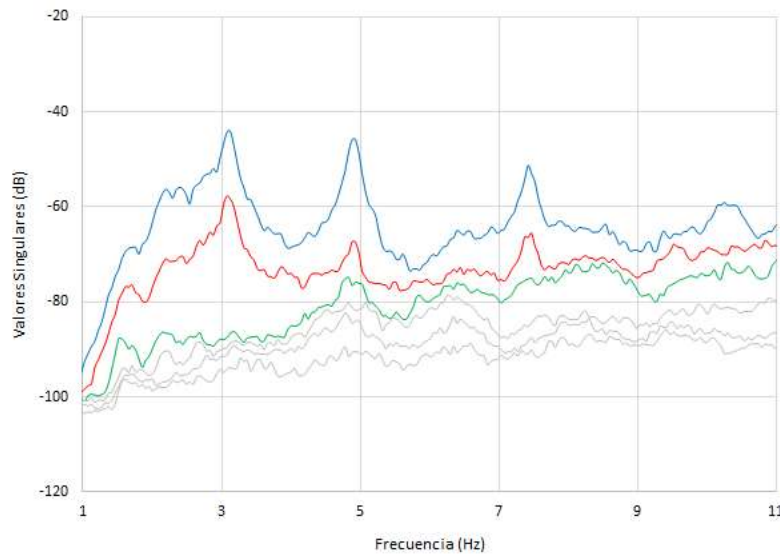
3.15. Función de densidad espectral de potencia. Tomada de

Las unidades en que se expresa la función de densidad espectral en el dominio de la frecuencia son $(m/s^2)^2/Hz$.

3.2.2. Descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD)

La descomposición en el dominio de la frecuencia es similar a la técnica de identificación de picos, ya que las frecuencias naturales siguen siendo representadas por los picos de la gráfica de la función de densidad espectral de potencia.

Esta técnica consiste en descomponer la función de densidades espectrales de potencia del sistema en un conjunto de PSD para sistemas de un grado de libertad, estas PSD se conocen como valores singulares y su gráfica se muestra en la siguiente figura. Las frecuencias naturales se obtienen igual que en la técnica PP, por observación. El mayor valor singular representa la fuerza del modo de vibración dominante para todas las frecuencias. Los otros valores singulares pueden representar modos escondidos detrás del dominante o ruido.



3.16. Valores singulares de la matriz de densidades espectrales. Tomada de

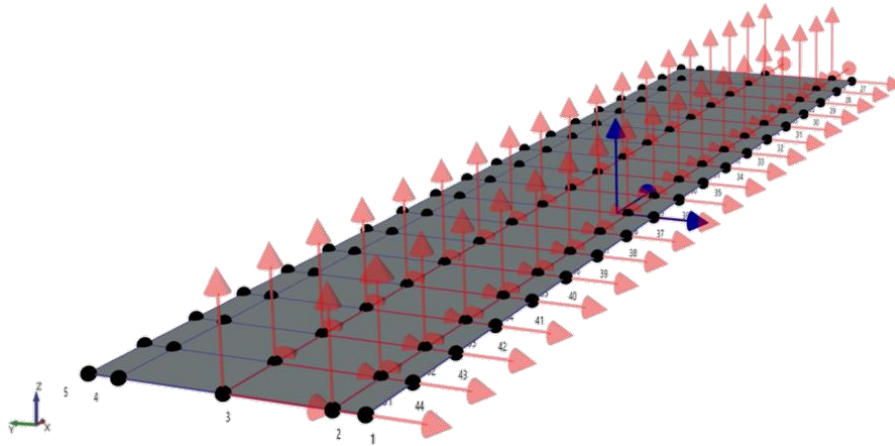
Con esta técnica se logra identificar modos muy cercanos entre sí a partir de los diferentes valores singulares.

El análisis modal operacional se llevará a cabo empleando el software ARTeMIS Modal Pro. Para realizar este análisis se cuenta en el programa con tres elementos para el modelado de la estructura, que son puntos, líneas y superficies. Posteriormente debe incorporarse al modelo la información producto de las mediciones de vibración ambiental. Por último, se ingresan algunos valores al programa, como la frecuencia máxima de búsqueda y la resolución. La resolución se refiere al número de puntos que se graficarán en el intervalo de frecuencias escogido.

Una vez hecho lo anterior solo resta analizar el modelo. El programa se encarga de realizar la estimación modal a través de distintas técnicas de identificación. La que se empleó en este trabajo es la descomposición en el dominio de la frecuencia.

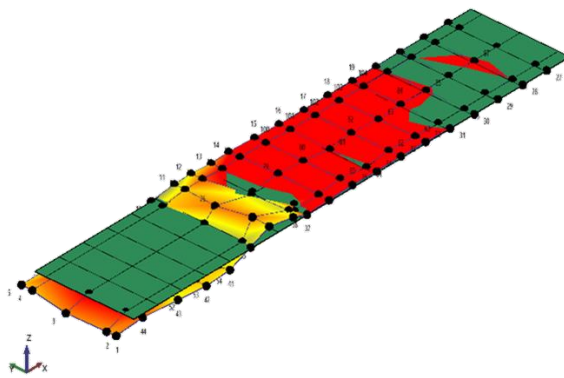
3.2.3. Análisis del puente La Central

Para el puente la central se tienen tres modelos disponibles. El más completo, en cuestión del número de sensores, es el correspondiente a la medición de noviembre de 2014. Cuenta con dos líneas de 19 mediciones cada una y su configuración se muestra a continuación.

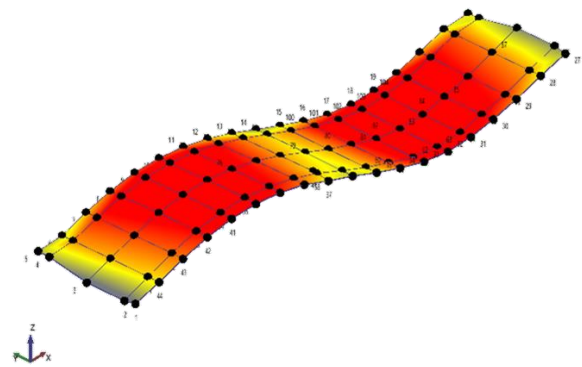


3.17. Vista 3D del modelo en ARTeMIS con posición y dirección de sensores. Medición 11/2014.

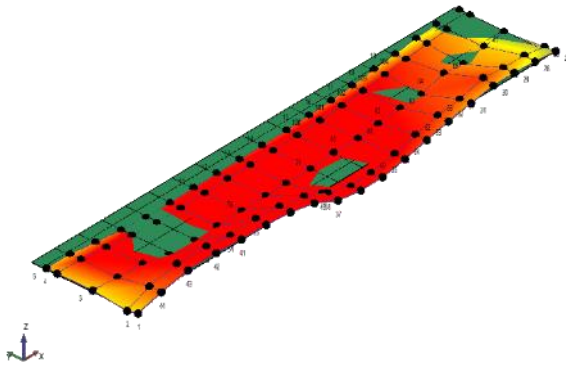
El análisis modal operacional para este modelo arrojó los siguientes resultados. Para cada una de las formas modales se indican el periodo y frecuencia correspondientes, así como la dirección principal.



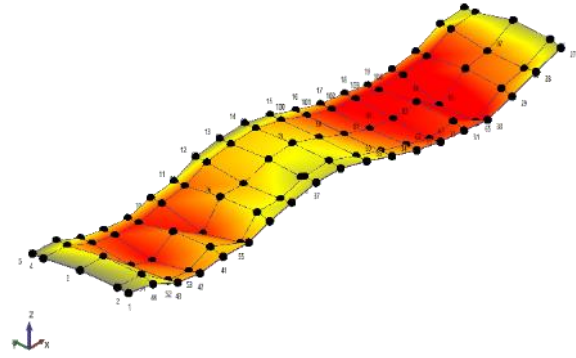
Primera forma modal
Longitudinal
 $T = 0.371 \text{ seg}, f = 2.695 \text{ Hz}$



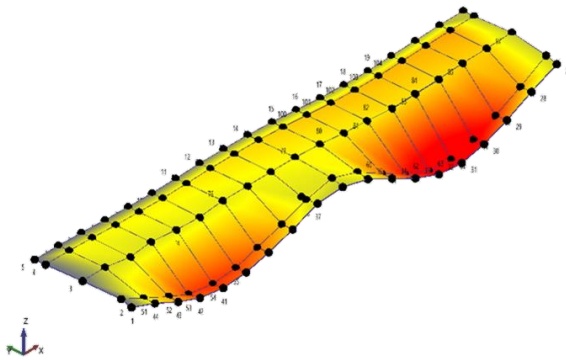
Segunda forma modal
Vertical
 $T = 0.294 \text{ seg}, f = 3.398 \text{ Hz}$



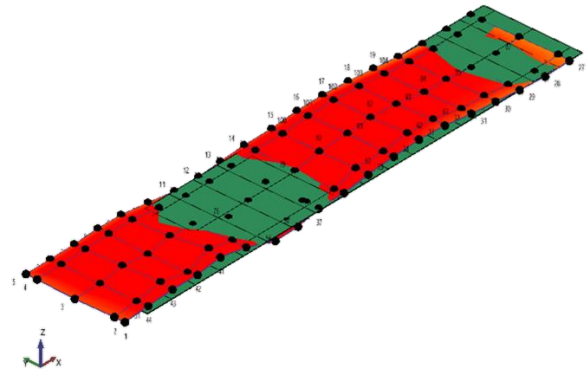
Tercera forma modal
Transversal
 $T = 0.239 \text{ seg}, f = 4.180 \text{ Hz}$



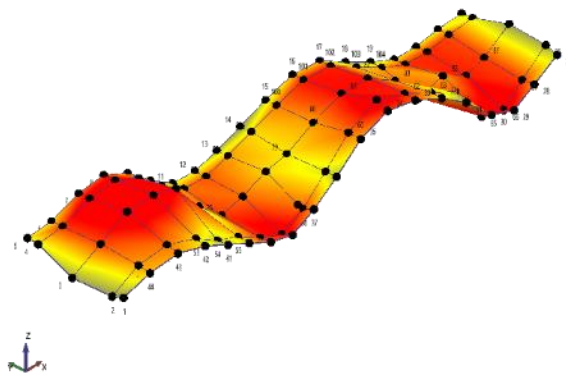
Cuarta forma modal
Vertical
 $T = 0.215 \text{ seg}, f = 4.648 \text{ Hz}$



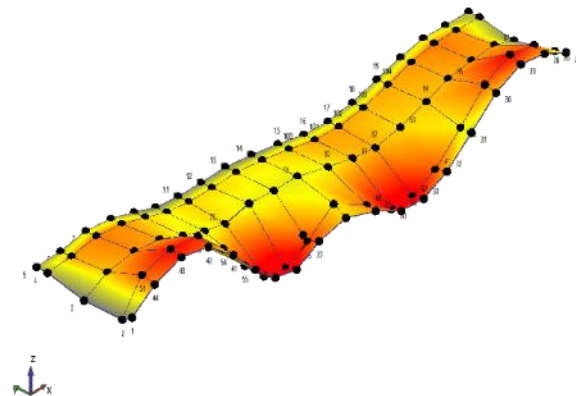
Quinta forma modal
Torsional
 $T = 0.195 \text{ seg}, f = 5.117 \text{ Hz}$



Sexta forma modal
Longitudinal
 $T = 0.137 \text{ seg}, f = 7.305 \text{ Hz}$



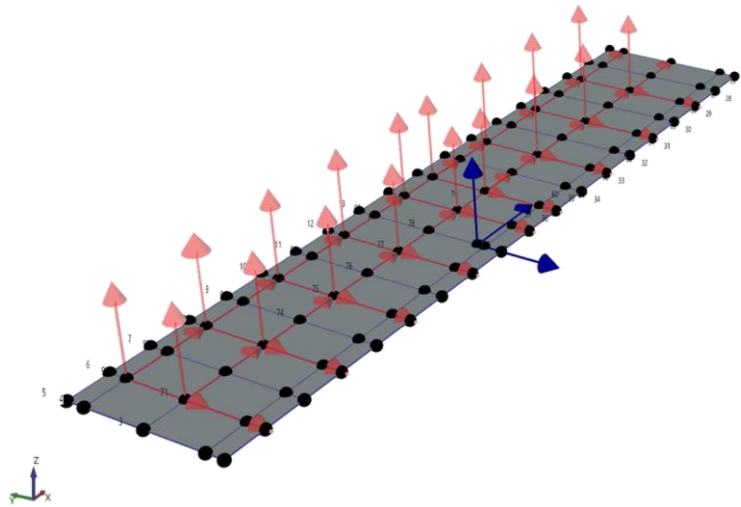
Séptima forma modal
Vertical
 $T = 0.080 \text{ seg}, f = 12.541 \text{ Hz}$



Octava forma modal
Vertical
 $T = 0.072 \text{ seg}, f = 13.906 \text{ Hz}$

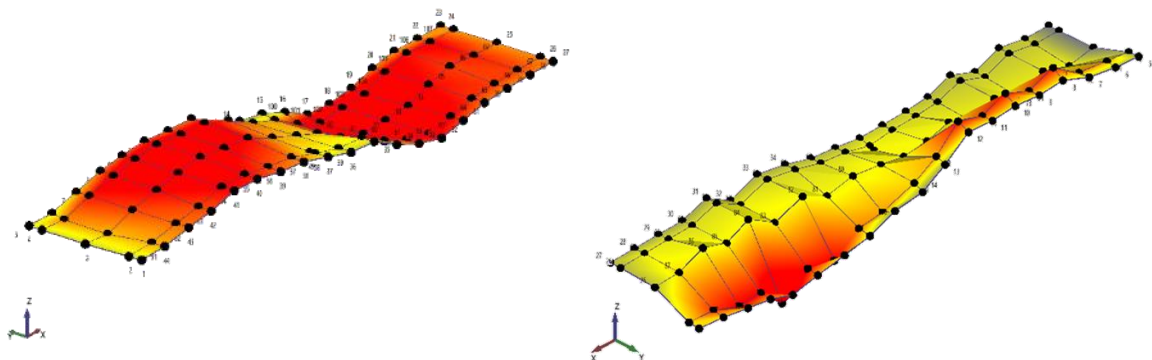
En resumen, las gráficas anteriores muestran cuatro formas modales verticales, dos longitudinales, una transversal y otra que muy posiblemente se trate de una forma modal torsional (quinta forma modal). Aunque es posible, no es conveniente darlo por seguro, ya que para confirmar dicha propuesta habría que tener los registros que se perdieron debido a la falla de una de las placas. En cuanto a las dos formas modales longitudinales, se podría decir que una de éstas es la correcta, pero dado que tienen frecuencias tan distintas se decidió mostrar ambas.

El siguiente modelo de la central (diciembre 2014) consta de dos líneas de sensores con nueve mediciones cada una. Esto implica que para este análisis se cuenta con menos de la mitad de la información comparado con el modelo anterior. Inclusive, antes de llevar a cabo el análisis ya es lógico intuir que los resultados que pueden esperarse deben ser parecidos al modelo anterior (más completo) pero menos precisos o incluso con pérdida de información.



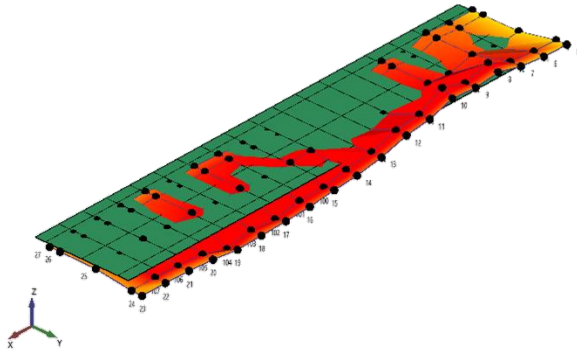
3.19. Vista 3D del modelo en ARTEMIS con posición y dirección de sensores. Medición 12/2014.

El análisis modal operacional para este modelo arroja los siguientes resultados. Para cada una de las formas modales se indican el periodo y frecuencia correspondientes, así como la dirección principal.

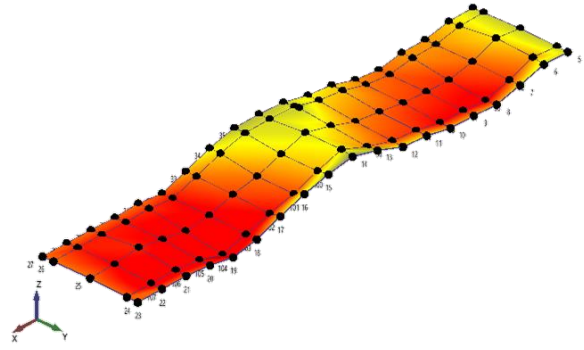


Primera forma modal
Vertical
 $T = 0.309 \text{ seg}, f = 3.238 \text{ Hz}$

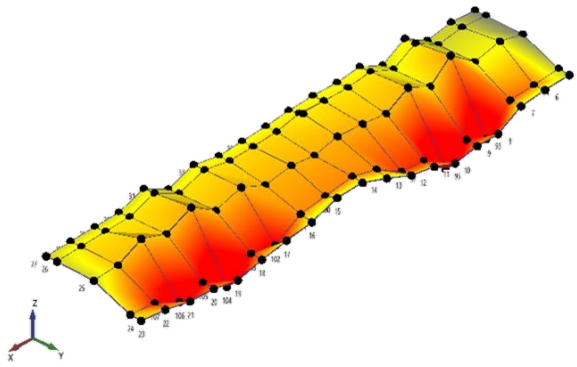
Segunda forma modal
Torsional
 $T = 0.269 \text{ seg}, f = 3.711 \text{ Hz}$



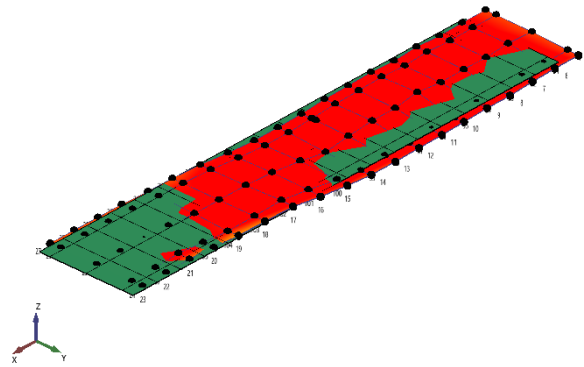
Tercera forma modal
Transversal
 $T = 0.259 \text{ seg}, f = 3.867 \text{ Hz}$



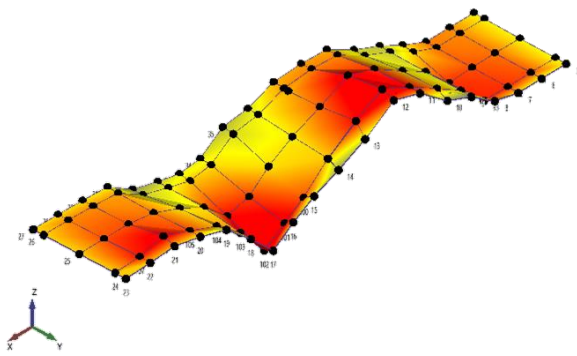
Cuarta forma modal
Vertical
 $T = 0.229 \text{ seg}, f = 4.375 \text{ Hz}$



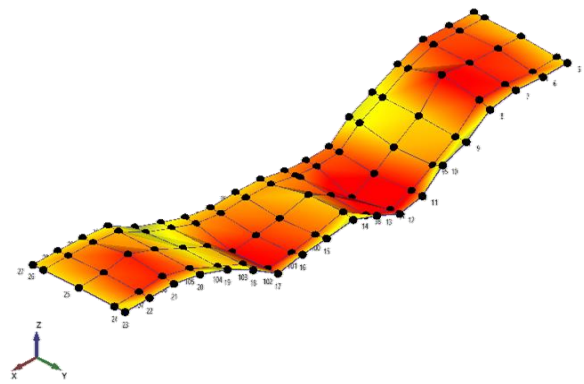
Quinta forma modal
Torsional
 $T = 0.203 \text{ seg}, f = 4.922 \text{ Hz}$



Sexta forma modal
Longitudinal
 $T = 0.154 \text{ seg}, f = 6.484 \text{ Hz}$



Séptima forma modal
Vertical
 $T = 0.083 \text{ seg}, f = 12.031 \text{ Hz}$



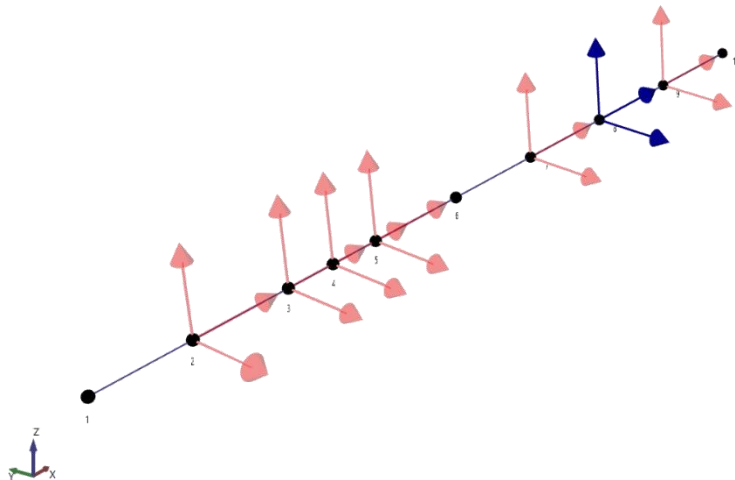
Octava forma modal
Vertical
 $T = 0.078 \text{ seg}, f = 12.891 \text{ Hz}$

3.20. Formas modales (OMA) del puente La Central (dic/2014).

Para este modelo se obtuvieron las mismas cuatro formas modales verticales, una forma modal longitudinal, una transversal y dos torsionales. De manera general pueden observarse las siguientes diferencias entre los dos modelos ya analizados:

- Independientemente de la forma modal, en todos los casos se presentó que, en el modelo de diciembre 2014 todas las formas modales disminuyeron su frecuencia. Esto puede interpretarse como que el sistema se flexibilizó.
- Se identificó una nueva forma modal que puede interpretarse como torsional por las mismas razones que en el modelo anterior.
- Visualmente se aprecian ciertos problemas con el movimiento de las formas modales, que pueden deberse a distintos motivos, por ejemplo, a la reducción del número de mediciones o a errores en los registros.

Finalmente se tiene el modelo correspondiente a la última medición sobre el puente La Central. Debido a la presencia de tráfico solo se pudo instrumentar el costado del puente junto al carril de baja velocidad. La cantidad de puntos instrumentados se redujo considerablemente, siendo siete el total de posiciones de los sensores.

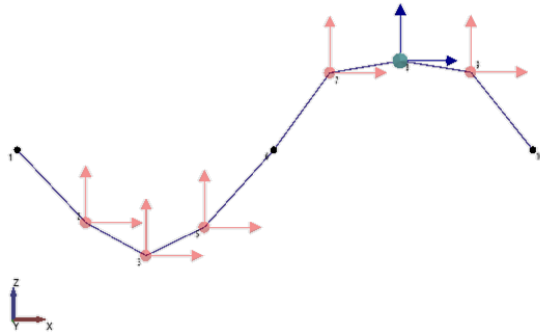


3.21. Vista 3D del modelo en ARTEMIS con posición y dirección de sensores. Medición 11/2015.

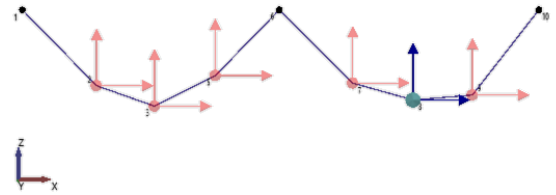
Para el modelo de esta medición bastó con trazar una línea con longitud igual al largo de los dos claros en estudio y ubicar los sensores a las distancias correspondientes. El análisis modal operacional para este modelo arrojó los siguientes resultados.

Para este modelo las únicas formas modales que se logró identificar fueron las cuatro verticales. La magnitud de las frecuencias se mantuvo igual para los primeros dos modos y disminuyó para las dos formas modales restantes.

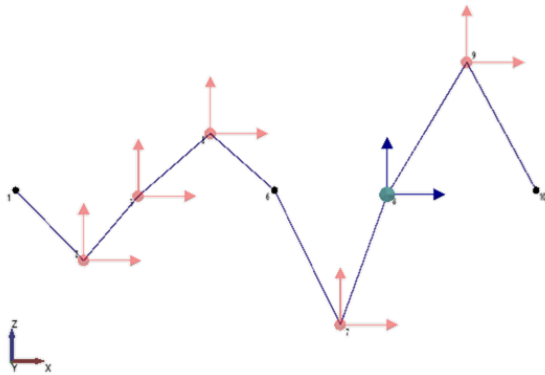
Para el OMA de este modelo se decidió eliminar el nodo número 4, ya que al parecer estaba generando un movimiento asincrónico con los demás.



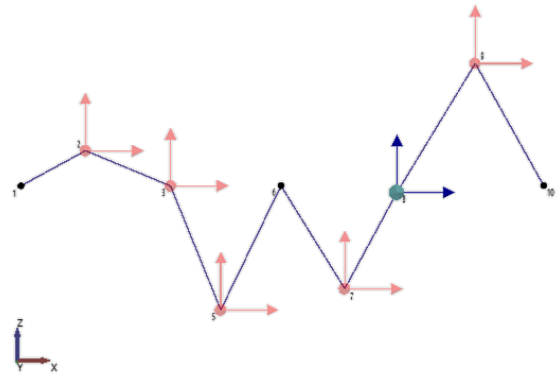
Primera forma modal
Vertical
 $T = 0.309 \text{ seg}, f = 3.242 \text{ Hz}$



Segunda forma modal
Vertical
 $T = 0.229 \text{ seg}, f = 4.375 \text{ Hz}$



Tercera forma modal
Vertical
 $T = 0.085 \text{ seg}, f = 11.797 \text{ Hz}$



Cuarta forma modal
Vertical
 $T = 0.080 \text{ seg}, f = 12.500 \text{ Hz}$

3.22. Formas modales (OMA) del puente La Central (nov/2015).

Capítulo IV

Optimización de la instrumentación



Vista lateral del cuerpo derecho del puente El Lago.

Para la optimización de la instrumentación se pueden emplear diversos métodos. Un camino poco técnico, para la optimización de la instrumentación, es el método de aproximaciones sucesivas. Su aplicación consiste en “quitar sensores” del mallado inicial, es decir, hacer un modelo con menos información de la que realmente se tiene. Una vez analizado este modelo “simplificado”, se compara con el inicial y se concluye si los resultados reflejan adecuadamente lo esperado. Si con la simplificación se pierde información importante, se deberá descartar la propuesta.

Una manera de saber si los resultados obtenidos son lo suficientemente buenos, es aplicando, por ejemplo, el método de correlación modal.

4.1. Método MAC (Modal Assurance Criterion)

El criterio de correlación modal o MAC permite obtener la correlación entre dos vectores modales (φ_i, ϑ_i) mediante la expresión:

$$MAC(\varphi_i, \vartheta_i) = \frac{|\varphi_i^T \vartheta_i|^2}{(\varphi_i^T \varphi_i)(\vartheta_i^T \vartheta_i)}$$

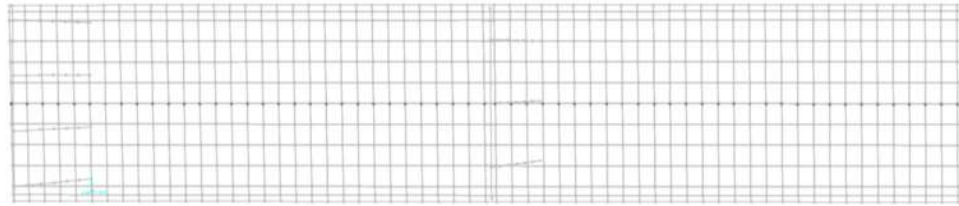
Donde los vectores modales representan dos estados de una misma estructura. El primero (φ_i) representa un estado inicial o de referencia y el segundo (ϑ_i) a un estado que se espera tenga diferentes propiedades. Finalmente, lo que se desea obtener con este criterio es una relación de la variación de los parámetros dinámicos de una estructura y concluir si existe o no daño.

La correlación total entre los vectores está representada por un valor del MAC igual a uno y para una nula correlación, el valor MAC es igual a cero. Una limitación importante de este criterio es que al ser el valor MAC un escalar, solo se permite detectar la presencia de daño, pero no su magnitud o localización.

4.1.1. Método MAC para modelos numéricos

Para aplicar el método MAC se necesitan dos vectores para contrastarlos. El primer vector será el resultado del análisis del modelo numérico completo y el segundo se obtendrá con una simplificación de los mismos resultados.

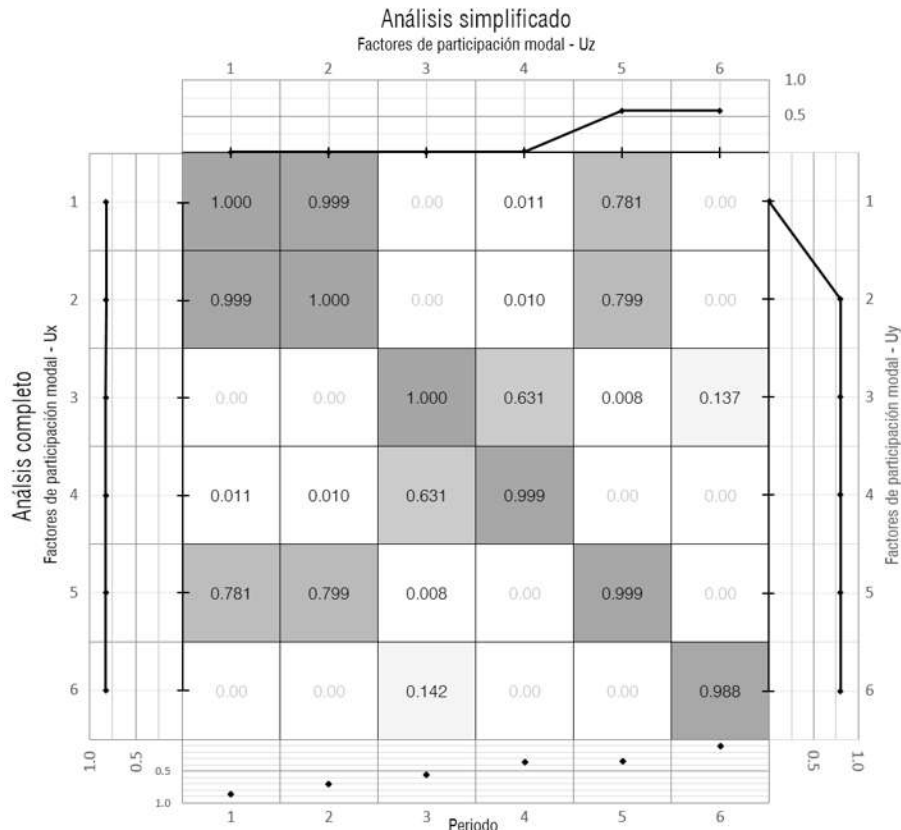
Los resultados a los que se refiere el párrafo anterior son los desplazamientos de los nodos. Los nodos considerados forman una línea al centro de la losa y a lo largo del puente, como se muestra a continuación:



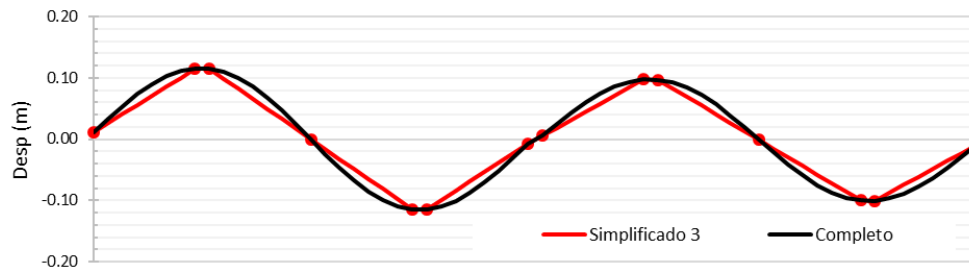
4.1. Nodos considerados para método MAC.

Seleccionados los nodos a considerar se obtiene para cada uno los desplazamientos, en las tres direcciones y para las formas modales de interés, que en este caso corresponden a la losa. Por último, el análisis simplificado consiste en “eliminar” nodos y hacer una interpolación lineal entre los nodos restantes. Esta interpolación tiene la finalidad de rellenar la información para poder hacer conformable la multiplicación de matrices en el método MAC. Se analizaron cuatro métodos simplificados, desde eliminar la mitad de los nodos hasta solo conservar tres nodos por claro (uno en cada extremo y uno al centro). Finalmente, después de hacer la correlación del modelo completo contra cada uno de los modelos simplificados, se observó que para la mayoría de los casos la última simplificación (figura 4.7) era suficientemente buena. Sin embargo, una de las formas modales verticales en los puentes La Central y El Pedregal (figura 4.3) requirió usar una simplificación con más información. Por lo tanto, para estos dos puentes se utilizó la tercera simplificación.

A continuación, pueden observarse los resultados de aplicar el método MAC.



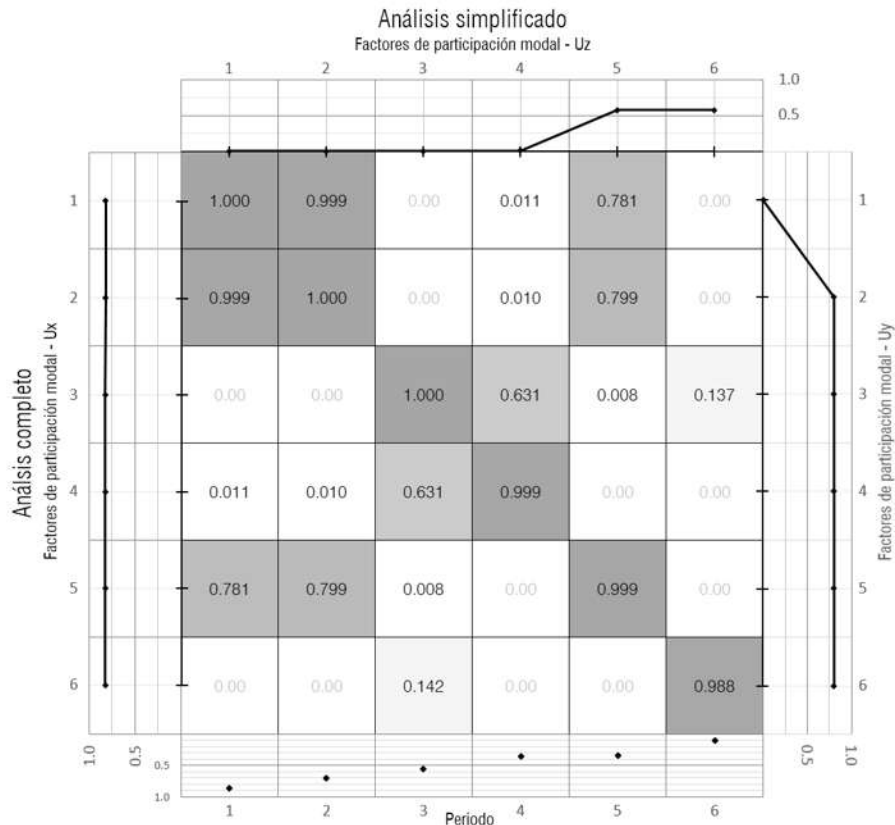
4.2. Matriz MAC para el puente La Central (S3).



4.3. Comparación modelo simplificado 3 vs. Completo.

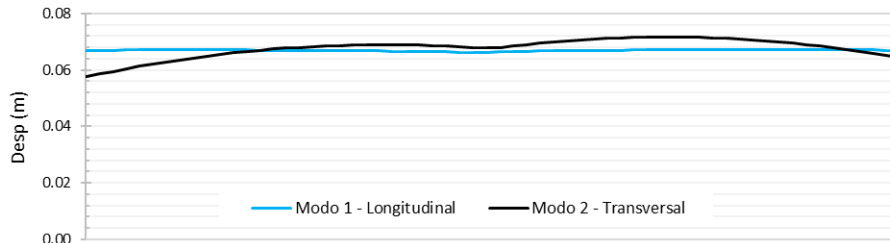
Para el puente La Central se presentaron seis modos de interés. De acuerdo a los factores de participación modal, el primer modo es en sentido transversal, el modo 2 y 3 son longitudinales y el resto son verticales. Como se aprecia en la matriz MAC anterior (figura 4.2), la diagonal principal es la correlación de cada modo con su correspondiente simplificado, donde los resultados reflejan una alta correlación para todos los casos. Con esto se concluye que la simplificación es claramente adecuada para representar la respuesta de la estructura.

En la matriz MAC también existen otros valores de correlación altos. Estos valores no representan una falla del método o del análisis, aparecen debido a que la correlación se realiza solo con una componente del desplazamiento; lo que ocasiona que geométricamente resulten similares dos formas modales distintas (figura 4.5).



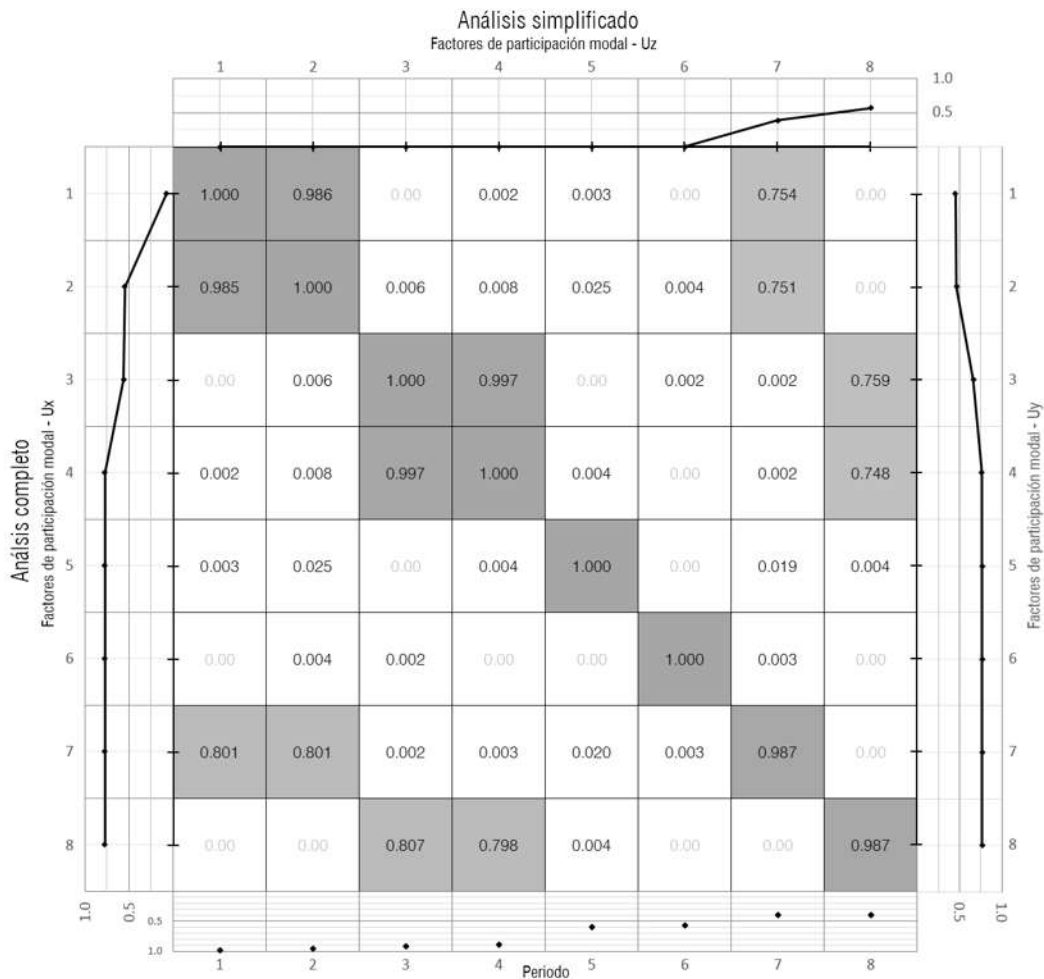
4.4. Matriz MAC para el puente El Pedregal (S3).

Uno de estos valores altos es, por ejemplo, el valor MAC (2,1) de 0.999 corresponde a la correlación entre las siguientes formas modales:



4.5. Formas modales 1 y 2 del modelo numérico del puente El Pedregal.

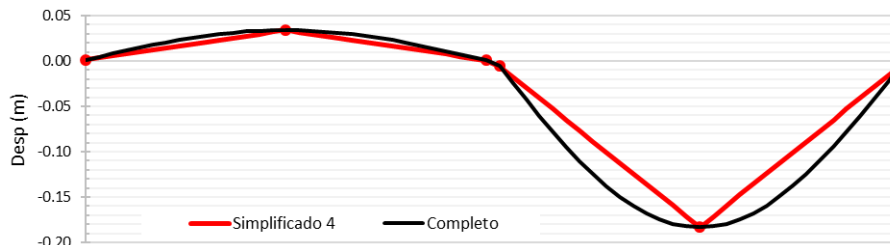
Al tomar los factores de participación modal se sabe que el primer modo es longitudinal y el segundo es transversal, pero el vector de desplazamientos necesario para el método MAC solo incorpora los desplazamientos en la dirección principal del modo. Por lo tanto, si graficamos estos desplazamientos obtenemos una gráfica como la 4.5, donde es visible la similitud entre las formas modales.



4.6. Matriz MAC para el puente El Lago (S4).

Los resultados de la matriz MAC para el puente El Pedregal son muy similares al puente La Central. La diferencia principal entre estos dos puentes es el esviamiento que presenta el primero, pero no se reflejó de manera importante en su comportamiento. Para el puente El Lago se presentaron ocho formas modales de interés. Éstas, respecto a los otros dos puentes, son diferentes debido a que la losa no tiene continuidad en los claros analizados. La matriz MAC (figura 4.6) también refleja una alta correlación, pero con la cuarta simplificación del modelo.

En las tres matrices MAC están representados los factores de participación modal en dirección longitudinal, transversal y vertical (parte izquierda, derecha y superior de la gráfica respectivamente). En la parte inferior se graficaron los periodos correspondientes a las formas modales.



4.7. Comparación modelo simplificado 4 vs. Completo.

Las matrices MAC muestran buenos resultados para los tres puentes. Sin embargo, este es un análisis muy simple que consiste en eliminar información del análisis numérico e interpolar linealmente con la información restante. El siguiente paso es analizar los resultados que se obtuvieron de las mediciones en campo.

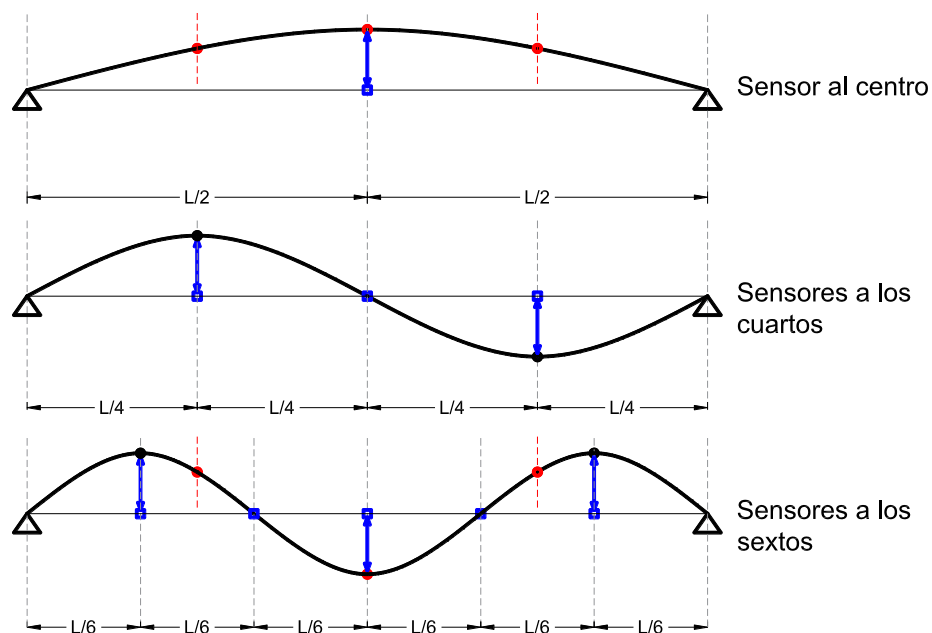
4.1.2. Método MAC para mediciones de vibración ambiental

De manera análoga que, para los modelos de elemento finito, los resultados del análisis modal operacional serán simplificados de cierta manera y posteriormente contrastados con la versión completa a través del método MAC.

Para los resultados de los OMA se tomará como punto de partida la configuración óptima de los sensores obtenida con el procesamiento de los resultados del análisis modal. En el apartado anterior se concluyó que la tercera simplificación era suficientemente buena tanto para el puente La Central como para El Pedregal. En términos generales esta simplificación consiste en instrumentar cada claro en estudio con sensores a los cuartos y al centro del mismo. El puente El Lago se analizó con la cuarta simplificación que consta de ubicar un solo sensor al centro del claro.

La instrumentación con un solo sensor al centro del claro (figura 4.8) nos permite obtener un primer modo vertical. Para un segundo modo (también vertical), la posición del sensor, coincide con un punto nodal; esto impide identificar la segunda forma modal. Finalmente, puede obtenerse una respuesta para una tercera forma modal, pero debido a la falta de mayor información del comportamiento del resto del claro, no sería posible identificarlo como un tercer

modo. Una diferencia notable sería que el tercer modo se espera que se presente a frecuencias considerablemente más altas que el primero.



4.8. Ubicación de sensores vs forma modal vertical.

Instrumentar a los sextos del claro es un barrido mucho más completo y deseable, pero a comparación del anterior requiere de mucho más tiempo de medición y espacio disponible. Esta instrumentación, que puede considerarse suficiente, permite obtener fácilmente hasta un tercer modo vertical como se aprecia en la figura anterior. En dicha figura las flechas azules indican el movimiento que resultaría del análisis modal operacional al emplear la instrumentación indicada.

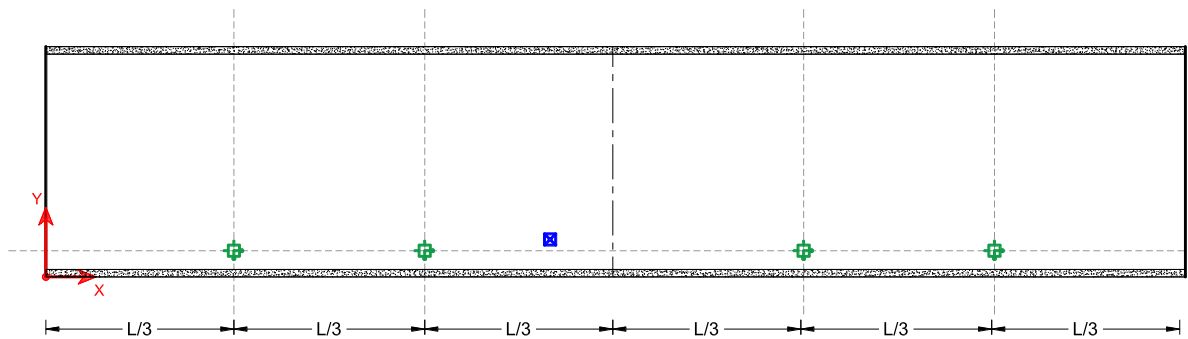
Por último, se tiene la instrumentación a los cuartos del claro. Ésta parece ser la configuración más adecuada, pensando claro en los modos verticales ya que se alcanza a detectar incluso el tercer modo vertical con menor número de mediciones. También es importante mencionar que, esta instrumentación no nos dará la geometría exacta, por ejemplo, del tercer modo vertical. Esto simplemente porque la ubicación de los sensores no coincide con los puntos de mayor amplitud modal para dicho modo. Por lo tanto, para corregir esto podría emplearse algún método de ajuste de curvas y así obtener una geometría más parecida a lo esperado. De lo contrario se emplea una simple interpolación lineal entre los valores de la respuesta que se conocen. Una vez se realizó la interpolación, se aplica el método MAC para calcular la correlación entre el modo completo y el simplificado.

A diferencia de la metodología empleada en el apartado anterior, la simplificación para las mediciones de vibración ambiental debe hacerse antes del análisis modal operacional, es decir, una vez decidida la configuración a emplear, se elimina la información de los sensores no deseados y solo entonces se procede con el OMA. Una vez realizado éste debe rehacerse la identificación de los modos. Si los modos se mantienen, es decir, no se pierde ninguna forma

modal con la simplificación, se puede concluir que es una buena optimización. Si se llega a perder alguna forma modal se debe evaluar la importancia de esta y valorar si es aceptable la pérdida. Si no se pierde ninguna forma modal, se aplica el método MAC para revisar la correlación entre los modos obtenidos por ambos análisis modales operacionales.

Debido al problema ya planteado de una mala planeación a largo plazo de la posición de los sensores, no es completamente posible tener siempre un sensor justamente a los cuartos del claro, por lo tanto, para los posteriores análisis se conservará el sensor que esté lo más cerca posible de la posición buscada.

Para la primera medición sobre el puente La Central, cabe recordar que cuenta con 19 mediciones a lo largo de los dos claros, los sensores que se conservarán para la simplificación se indican en la siguiente figura.



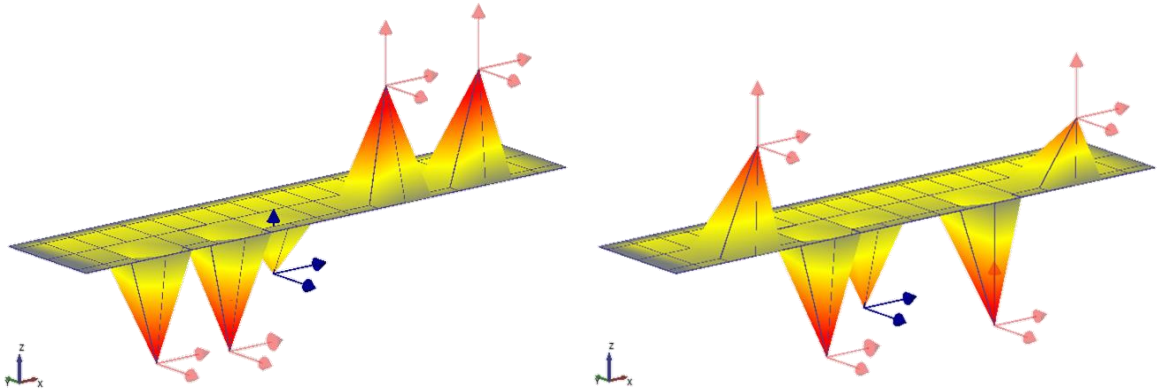
4.9. Croquis de sensores para modelo simplificado del puente La Central (noviembre 2014).

Como puede observarse para esta simplificación, debido a la posición inicial de los sensores, se requirió conservar aquellos ubicados a los tercios del claro, además del sensor fijo de referencia.

Análisis OMA puente La Central (noviembre 2014) simplificado

En el análisis del modelo simplificado se logró identificar todas las formas modales que se identificaron en el análisis del modelo completo. Es de esperarse que, al eliminar puntos de mediciones, las formas modales sean representadas mediante pocos valores y por lo tanto, la gráfica que arroja el programa será más difícil de interpretar. Lo que se busca es extraer las únicamente las amplitudes de los puntos donde se conservaron las mediciones. Con estos, se realizan interpolaciones con el fin de rellenar información para los nodos libres y así hacer conformable la multiplicación de matrices en el método MAC.

Para ejemplificar se muestran a continuación dos de las formas modales que se obtuvieron con el modelo simplificado.



Segunda forma modal
Vertical
 $T = 0.294 \text{ seg}, f = 3.398 \text{ Hz}$

Octava forma modal
Vertical
 $T = 0.072 \text{ seg}, f = 13.906 \text{ Hz}$

4.10. Formas modales (OMA) del puente La Central simplificado (nov/2014).

Finalmente puede aplicarse a estos resultados el criterio de correlación modal. A continuación, se muestra la matriz MAC para la medición de noviembre de 2014 sobre el puente La Central.

Análisis completo

Análisis simplificado	0.835	0.181	0.433	0.509	0.670	0.005	0.055	•	7
	0.183	0.996	0.026	0.113	0.003	0.039	0.004	•	6
	0.486	0.030	0.958	0.521	0.902	0.007	0.085	•	5
	0.594	0.072	0.571	0.970	0.611	0.007	0.00	•	4
	0.612	0.002	0.829	0.593	0.997	0.005	0.032	•	3
	0.026	0.076	0.008	0.00	0.004	0.765	0.00	•	2
	0.090	0.003	0.134	0.00	0.015	0.002	0.889	•	1
								0.4	0.2

4.11. Matriz MAC para el puente La Central (OMA – nov/2014).

Conclusiones

El objetivo de este estudio es poder llegar a una configuración de la instrumentación en puentes (con características similares a los estudiados) tal, que permita identificar apropiadamente las formas modales, pero con el menor número de sensores posible.

Una vez se realizaron los análisis correspondientes se puede concluir lo siguiente:

- Antes de comenzar a realizar las mediciones de vibración ambiental debe hacerse una buena planeación tanto del número de mediciones a realizar como de la configuración de los sensores sobre el puente. Debido a que el objetivo de este trabajo es obtener una configuración óptima, es de vital importancia, poder contar con distintas ubicaciones de los sensores y así determinar cuáles son las más convenientes.
- Aplicar un proceso de optimación como tal es muy complicado, ya que debido a la dependencia que se tiene del software especializado, no hay una relación que pueda obtenerse de manera directa entre la propuesta de optimación y los resultados de los análisis.
- Los registros de las mediciones de vibración ambiental no son infalibles, ya que están sujetos a diversos errores al momento de realizar la medición. Estos pueden deberse a problemas con los equipos, a un mal uso de estos, a excesivo ruido en los registros, etc.
- La identificación de sistemas con la técnica FDD, a pesar de ser una de las más simples, es suficientemente buena para los propósitos de este trabajo.
- La cantidad de sensores es importante cuando se espera obtener frecuencias muy altas. Para las frecuencias que se esperaba obtener en este estudio, una cantidad mínima de sensores fue suficiente para identificar las formas modales apropiadamente.
- La configuración más óptima, para puentes con las características de los analizados, es colocar los sensores a los cuartos del claro y en un solo lado de la calzada. Para obtener formas modales de torsión debe forzosamente instrumentarse ambos lados de la calzada.

Referencias

- Döhler, M., Hille, F., Mevel, L. y Rücker, W. (2014). Structural health monitoring with statistical methods during progressive damage test of S101 Bridge. *Engineering Structures*. No. 69: 183-193.b.
- Wenzel, H. y Furtner, P. (2006). Damage detection and bridge classification by ambient vibration monitoring – application of BRIMOS at two stay cable bridges in China. *The Proceeding of 4th China – Japan – US Symposium on Structural Control and Monitoring*. Junio. Lugar
- Chang, P. C., Flatau, A. y Liu S. C. (2003). Review paper: Health monitoring of civil infrastructure. *Structural Health Monitoring*. No. 2: 257:267.
- Santos, J. P., Crémona, C., Orcesi, D. y Silveira, P. (2013). Multivariate statistical analysis for early damage detection. *Engineering Structures*. No. 56: 273:285.
- Li, Z. X., Chan, T. H. T. y Ko, J. M. (2001). Fatigue analysis and life prediction of bridges with structural health monitoring data – Part I: methodology and strategy. *International Journal of Fatigue*. No. 23: 45-53.
- Li, Z. X., Chan, T. H. T. y Ko, J. M. (2001). Fatigue analysis and life prediction of bridges with structural health monitoring data – Part II: application. *International Journal of Fatigue*. No. 23: 55-64.
- McCullan, J. J., Galchev, T., Peterson, R. L., Gordenker, R., Zhang, Y., Lynch, J. y Najafi, K. (2014). Long-term testing of vibration harvesting system for the structural health monitoring of bridges. *Sensors and Actuators A: Physical*. No. 217: 139-150.
- Moschas, F. y Stiros, S. (2011). Measurement of the dynamic displacements of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and and accelerometer. *Engineering Structures*. No. 33: 10-17.
- Orcesi, A. D. y Frangopol, D. M. (2011). Optimization of bridge maintenance strategies base don structural health monitoring information. *Engineering Structures*. No. 33: 26-41.
- Kulprapha, N. y Warnitchai, P. (2012). Structural health monitoring of continuous prestressed concrete bridge using ambient termal responses. *Engineering Structures*. No. 40: 20-38.
- Contreras, Z. M. y Valdés G. J. (2008). Análisis y comparación de técnicas de identificación de parámetros dinámicos en sistemas estructurales. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Veracruz, Veracruz.